

# Výskyt a toxicita akrylamidu v potravinách

Pavλίna Ondrušová

---

Bakalářská práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav analýzy a chemie potravin  
akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavína Ondrušová**  
Osobní číslo: **T12807**  
Studijní program: **B2901 Chemie a technologie potravin**  
Studijní obor: **Technologie a řízení v gastronomii**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výskyt a toxicita akrylamidu v potravinách**

Zásady pro vypracování:

### **I. Teoretická část**

- 1. Charakteristika a popis akrylamidu, vlastnosti**
- 2. Výskyt a vznik akrylamidu při technologických operacích**
- 3. Toxicita a zdravotní účinky akrylamidu – vliv na lidské zdraví**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. VELÍŠEK, J. a J. HAJŠLOVÁ. *Chemie potravin II*. Tábor: OSSIS, 2009. ISBN 978-80-86659-16-9.
2. ESKIN, N.A.M., H. CHI-TAO and F. SHAHIDY. *Biochemistry of Foods*. 3rd ed. Waltham: Academic Press, 2013. ISBN 978-0-12-242352-9.
3. LINEBACK, D. R., J. R. COUGHLIN and R. H. STADLER. Acrylamide in Foods: A Review of the Science and Future Considerations. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2012, 3, 15-35.
4. FORSTOVA, V., B. BELKOVA, K. RIDDELLOVA et al. Acrylamide formation in traditional Czech leaved wheat-rye breads and wheat rolls. *Food control*. 2014, 38, 221-226.
5. KUKUROVÁ, K., L. MARKOVÁ, A. BEDNÁRIKOVÁ a Z. CIESAROVÁ. Nástroje znižovania akrylamidu v cereálných výrobkoch. *Potravinárstvo*. 2010, 4, 317-321.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Soňa Škrovánková, Ph.D.**  
Ústav analýzy a chemie potravin

Datum zadání bakalářské práce:

**20. ledna 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**7. května 2015**

Ve Zlíně dne 20. ledna 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



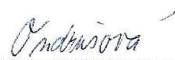
  
Ing. Jiří Mlček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 3.5.2015

  
.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

V bakalářské práci je charakterizován akrylamid, procesní kontaminant a potenciální lidský karcinogen, a jeho vznik v potravinách během tepelné úpravy potravin. Také jsou popsány rizikové potraviny, u nichž se v průběhu tepelné přípravy předpokládá zvýšený obsah této látky, a možnosti snížení akrylamidu v těchto potravinách. Práce se věnuje i toxickým účinkům akrylamidu a shromažďuje doposud zjištěné informace ze studií provedených na zvířatech a lidech.

Klíčová slova: Akrylamid, vznik, rizikové potraviny, minimalizace, toxicita

## **ABSTRACT**

In the bachelor thesis an acrylamide, a process contaminant and potential human carcinogen, and its formation in foods during the thermal processing and preparation are characterized. Risk foods, with higher possibility of an increased content of the substance, and the options of acrylamide reduction in foods are also described. The toxic effects of acrylamide and information from studies conducted on animals and humans are given in the thesis too.

Keywords: Acrylamide, formation, risk foods, minimization, toxicity

Na tomto místě bych chtěla poděkovat Ing. Soni Škrovánkové, Ph.D za cenné rady a vedení při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, kamarádům a blízkým za jejich podporu během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 AKRYLAMID</b> .....	<b>10</b>
1.1 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI .....	11
<b>2 VZNIK AKRYLAMIDU V POTRAVINÁCH</b> .....	<b>13</b>
2.1 VZNIK AKRYLAMIDU Z ASPARAGINU A REDUKUJÍCÍCH CUKRŮ .....	15
2.2 VZNIK AKRYLAMIDU Z LIPIDŮ .....	17
<b>3 VÝSKYT AKRYLAMIDU</b> .....	<b>19</b>
3.1 MONITORING VÝSKYTU AKRYLAMIDU .....	21
3.2 AKRYLAMID V ČR A SR .....	23
3.3 MINIMALIZACE AKRYLAMIDU V POTRAVINÁCH .....	26
3.4 RIZIKOVÉ POTRAVINY .....	27
3.4.1 Brambory .....	27
3.4.2 Výrobky z brambor .....	28
3.4.3 Obiloviny a výrobky z nich .....	31
3.4.3.1 Chléb .....	31
3.4.3.2 Perníky, sušenky .....	32
3.4.3.3 Snídaňové cereálie .....	35
3.4.4 Káva .....	35
3.4.5 Ostatní rizikové potraviny .....	36
3.4.5.1 Pražené mandle .....	36
3.4.5.2 Olivy .....	38
3.4.5.3 Sušené ovoce .....	39
3.4.5.4 Dětská výživa .....	40
<b>4 TOXICITA A ZDRAVOTNÍ ÚČINKY AKRYLAMIDU</b> .....	<b>41</b>
4.1 VSTUP AKRYLAMIDU DO LIDSKÉHO ORGANISMU .....	42
4.2 ZDRAVOTNÍ RIZIKA AKRYLAMIDU .....	42
4.2.1 Karcinogenní účinky akrylamidu .....	43
4.2.2 Neurotoxické účinky akrylamidu .....	44
4.2.3 Reprodukční toxicita akrylamidu .....	44
<b>5 METODY STANOVENÍ AKRYLAMIDU</b> .....	<b>45</b>
5.1 KAPALINOVÁ CHROMATOGRRAFIE .....	45
5.2 PLYNOVÁ CHROMATOGRRAFIE .....	46
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>52</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>53</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>54</b>



## ÚVOD

V dubnu roku 2002 Národní úřad pro potraviny ve Švédsku zveřejnil prohlášení o výskytu akrylamidu v některých tepelně upravených potravinách. Toto prohlášení přitáhlo pozornost po celém světě, protože v roce 1994 byl akrylamid klasifikován Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC), jako pravděpodobný karcinogen pro člověka [1].

Hlavními zdroji akrylamidu v lidské stravě jsou především bramborové výrobky (hranolky a bramborové lupínky), ale taktéž výrobky z obilovin (chléb, cereálie, pečivo a sušenky), a pražená káva. To je dáno především přítomností reakční složek nacházejících se v surovině, které se podílejí na formování akrylamidu [2].

Akrylamid vzniká v potravinách přirozeně, jako procesní kontaminant v průběhu tepelného zpracování. Za hlavní mechanismus jeho tvorby v potravinách je považována reakce redukujících cukrů (například monosacharidů glukózy nebo fruktózy) s aminokyselinou asparagin prostřednictvím Maillardových reakcí za vysokých teplot. Obvykle při teplotách 120 °C a výše, kterých bylo dosaženo v průběhu smažení, pečení, pražení nebo grilování. V dnešní době jsou známy i jiné mechanismy vzniku akrylamidu v potravinách, například vznik z lipidů. Intenzita tvorby akrylamidu závisí na počáteční koncentraci prekurzorů a jejich poměru, jakož i na teplotě, délce zpracování, aktivitě vody a pH [2].

Vzhledem k možnému zdravotnímu riziku souvisejícímu s příjmem akrylamidu z potravin vydala Světová zdravotnická organizace (WHO) doporučení související s minimalizací akrylamidu v potravinách [3].

Akrylamid je chemická sloučenina, která se používá i při syntéze polyakrylamidu. Polyakrylamid má široké uplatnění v průmyslu, využívá se při výrobě barviv, lepidel, kosmetiky a cementových pojiv, a také jako koagulant při čištění odpadních vod [1].

## 1 AKRYLAMID

V současné době je kladen důraz jak na kvalitu potravin, tak i na jejich bezpečnost. Potraviny mohou být kontaminovány nejen mikroorganismy, ale také látkami organickými a anorganickými. Látky, které se do potravin dostávají neúmyslně zemědělskou prvovýrobou, skladováním, dopravou, ale i během technologického nebo kulinárního zpracování, se nazývají potravinové kontaminanty. Ty se často rozlišují na exogenní, pocházející z vnějších zdrojů a endogenní, vznikající v potravine vlivem různých fyzikálních a chemických vlivů. Pro kontaminanty vznikající z přirozeně se vyskytujících složek potravinářských surovin, při zpracovatelských operacích se používá termín procesní nebo technologické kontaminanty [4].

Za procesní kontaminanty jsou považovány látky toxické, resp. potenciálně zdravotně závadné, které vznikají v průběhu tepelného zpracování potravin, kdy dochází k mnoha různým reakcím. Soubor těchto reakcí se obecně označuje termínem Maillardovy reakce. V průběhu těchto reakcí dochází ke vzniku žádoucích sensoricky aktivních látek, ale také k tvorbě škodlivých sloučenin. Jednou z nich je akrylamid [4].

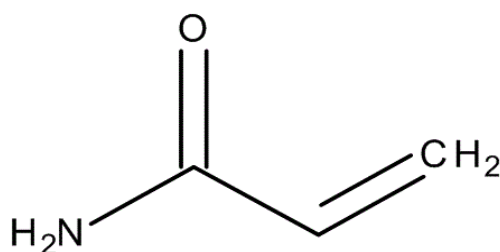
Akrylamid je monomer, který snadno polymeruje. Jako polymer má akrylamid široké uplatnění v chemicko-technologickém průmyslu při čištění odpadních vod, jako těsnicí materiál při stavbě přehrad, tunelů, vodních nádrží, dále také pro zpevnění půdy při stavbě silnic, jako pojivo v papírenském průmyslu, v obalových materiálech a také jako aditivum při výrobě průmyslových a kosmetických produktů [5]. Zpočátku byl vyroben pro komerční účely reakcí akrylonitrilu s hydratovanou kyselinou sírovou. Akrylamid má také uplatnění ve vědeckém výzkumu, kde se využívá, jako polyakrylamidový gel v elektroforéze a genetickém inženýrství [6]. Samotný polyakrylamid není toxický, ale ve většině případů obsahuje rezidua nepolymerizovaného akrylamidu, který toxické účinky vykazuje [5].

Řada studií naznačuje, že akrylamid je genotoxický, karcinogenní, toxický a neurotoxický pro centrální nervový systém člověka. Testy na laboratorních zvířatech, která byla vystavena příjmu akrylamidu, prokázaly zvýšené riziko nádorů dělohy, štítné žlázy, centrálního nervového systému a dalších orgánů. Z těchto důvodů Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny zařadila akrylamid do skupiny látek s označením 2A, tedy jako „potenciální lidský karcinogen“. Je tedy pochopitelné, že objev švédských vědců ze Stockholmské univer-

zity v roce 2002, kteří poukázali na přítomnost akrylamidu v některých potravinách, vyvolal rozruch. [5]

### 1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Akrylamid neboli prop-2-enamid, jehož strukturní vzorec je zobrazen na obrázku (Obr. 1), se vyskytuje ve formě krystalické (Obr. 2), nebo jako vodný roztok. V krystalické formě je akrylamid bezbarvá až bílá látka, bez chuti a zápachu, která ve své molekule obsahuje reaktivní dvojnou vazbu a amidovou skupinu. Je to látka amfoterní, to znamená, že vykazuje jak kyselé, tak zásadité vlastnosti [7].



Obr. 1. Akrylamid

Za pokojové teploty je tato látka stabilní. Při zahřátí na teplotu tání, popřípadě vystavením ultrafialového záření, snadno polymeruje za vzniku polyakrylamidu. Polymerace akrylamidu nastává přes radikálovou reakci s dvojnou vazbou [8]. Rozkladem za vysoké teploty uvolňuje akrylamid štiplavý dým a oxidy dusíku. V tabulce (Tab. 1) je uveden přehled fyzikálně-chemických vlastností akrylamidu [7].



Obr. 2. Krystalická forma akrylamidu [9]

*Tab. 1. Přehled fyzikálně-chemických vlastností akrylamidu [10]*

<b>Vlastnost</b>	<b>Hodnota</b>
Molekulová hmotnost [g.mol <sup>-1</sup> ]	71,08
Hustota (při 30 °C) [g.ml <sup>-1</sup> ]	1,122
Bod tání [°C]	84,5
Teplota varu (při 3,3 kPa) [°C]	136
Tenze par (při 25 °C) [Pa]	0,9

Rozpustnost akrylamidu v polárních a nepolárních rozpouštědlech se dosti liší. Akrylamid je velmi dobře rozpustný zvláště ve vodě, metanolu, etanolu, dimethyléteru a acetonu, ale prakticky nerozpustný v nepolárních organických rozpouštědlech, jako je benzen a heptan. Tabulka (Tab. 2) znázorňuje přehled rozpustnosti akrylamidu v různých rozpouštědlech [7].

*Tab. 2. Rozpustnost akrylamidu [10]*

<b>Rozpouštědlo</b>	<b>Rozpustnost (při 30 °C) [g/100ml]</b>
Voda	215,5
Metanol	155
Etanol	86,2
Aceton	61,3
Etylacetát	12,6
Heptan	6,8
Chloroform	2,7

## 2 VZNIK AKRYLAMIDU V POTRAVINÁCH

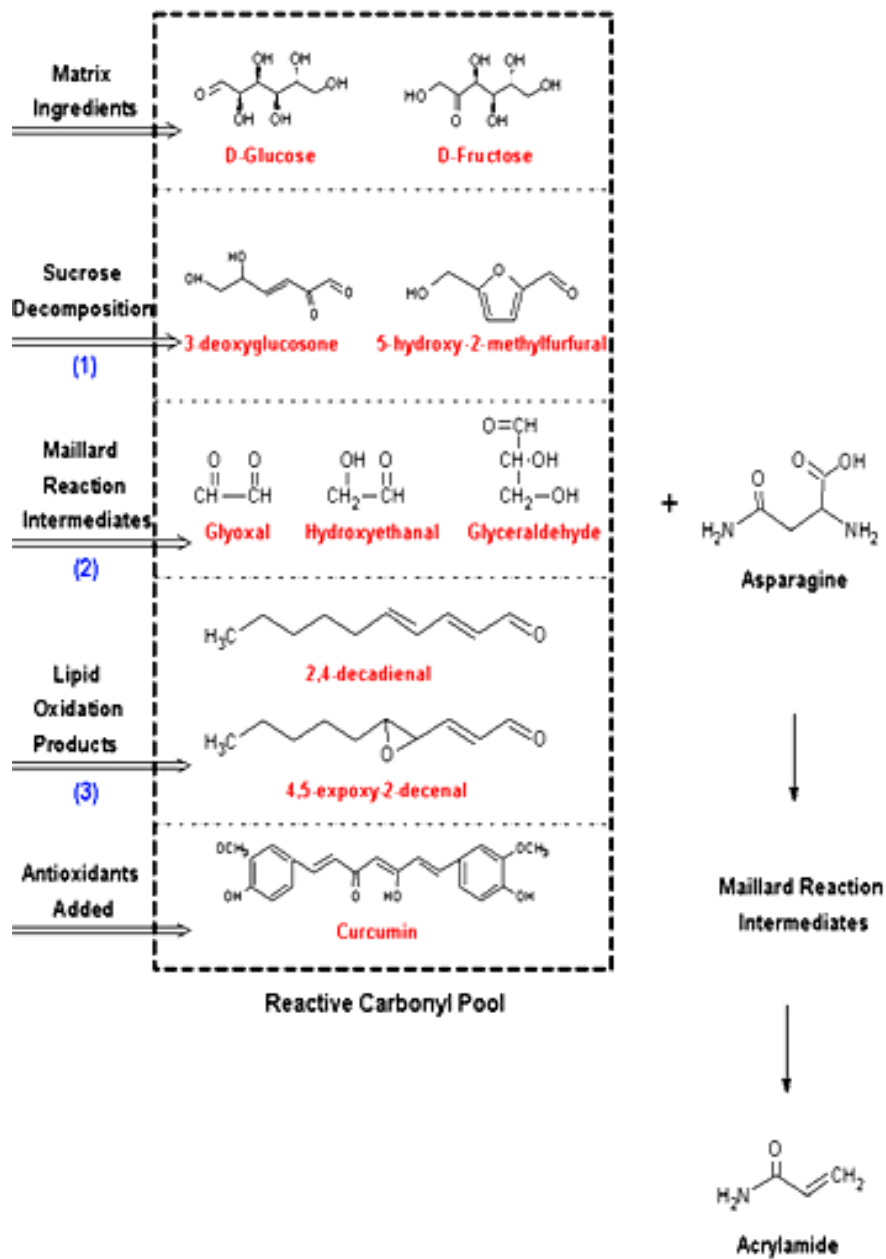
Akrylamid se v žádné formě do potravin nepřidává. Jeho přítomnost v potravinách lze vysvětlit kontaminací z vnějšího prostředí, například kontaktem s obalovými materiály, ale jak se ukázalo nejčastějším důvodem přítomnosti akrylamidu v potravinách je jeho vznik během tepelné úpravy potravin [11].

Díky své jednoduché struktuře je možný vznik akrylamidu v potravinách různými mechanismy. Za hlavní mechanismus vzniku akrylamidu je považována reakce mezi volnou neesenciální aminokyselinou asparaginem a redukujícími cukry jako součást Maillardových reakcí, které patří mezi nejvýznamnější a zároveň nejrozšířenější chemické reakce probíhající během skladování a zpracování potravin [11].

Maillardovy reakce v podstatě zahrnují všechny reakce týkající se sloučenin obsahující aminoskupiny s redukujícími cukry, které jsou přítomny v potravinách [12]. V průběhu těchto reakcí dochází ke vzniku velmi reaktivních karbonylových sloučenin, které reagují vzájemně, nebo s přítomnými aminokyselinami. Společným znakem těchto reakcí je vznik hnědých pigmentů zvaných melanoidy, a proto se tyto reakce nazývají také reakce neenzymového hnědnutí [13]. Současně vznikají i látky senzorycky aktivní, které dodávají produktům charakteristickou chuť, vzhled a vůni. Ale může také docházet ke vzniku látek škodlivých, které mohou mít mutagenní a karcinogenní vlastnosti [12].

Studie prokázaly, že se akrylamid nejčastěji tvoří při teplotě 120-210 °C, nejvíce akrylamidu vzniká v rozmezí teplot 120-170 °C. Jeho tvorba je však možná i při teplotě 100 °C, kdy dochází k tvorbě N-glykosidu, který se poté štěpí mezi vazbou atomů C-N a vytváří meziprodukt, z něhož může akrylamid vzniknout [14].

Další možné reakční cesty vzniku akrylamidu jsou reakce asparaginu s dalšími látkami obsahující karbonylové sloučeniny [15]. Obrázek (Obr. 3) znázorňuje možné reakce vzniku akrylamidu. Jak je uvedeno na obrázku, reaktivní karbonylové sloučeniny jsou zapotřebí k urychlení přeměny asparaginu na akrylamid. Karbonylové sloučeniny mohou pocházet ze složek potravinářské matrice, z rozkladu sacharózy, nebo karbonylových sloučenin ( $\alpha$ -hydroxykarbonylových či  $\alpha$ -dikarbonylových sloučenin), které jsou součástí Maillardových reakcí, z oxidace lipidů a dalších možných sloučenin [16].



Obr. 3. Možné reakce vzniku akrylamidu [16]

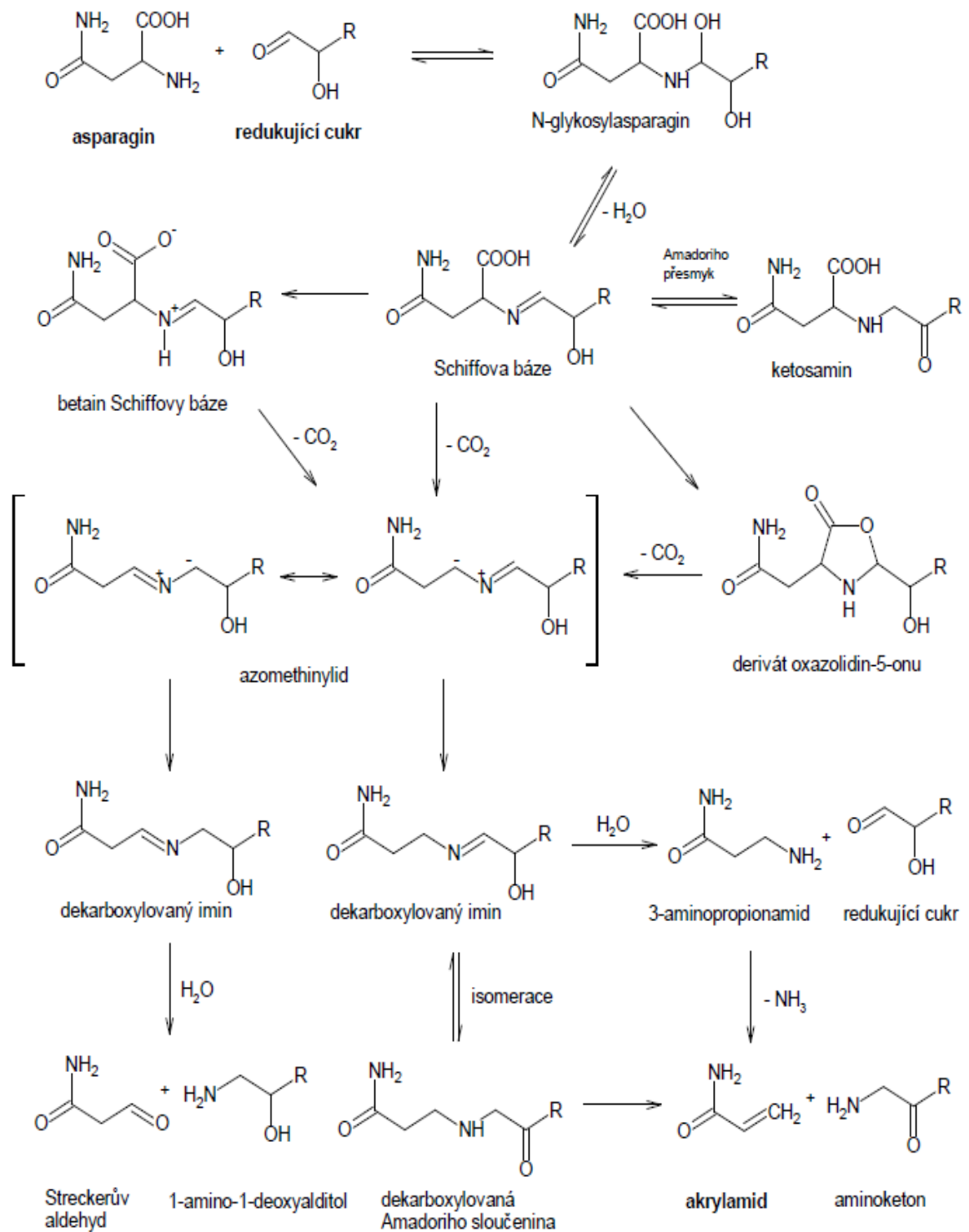
## 2.1 Vznik akrylamidu z asparaginu a redukujících cukrů

Za hlavní prekurzor vzniku akrylamidu je považována aminokyselina asparagin. Geneticky kódovaná neesenciální aminokyselina asparagin byla poprvé izolována ze šťávy chřestu v roce 1806. Asparagin hraje důležitou roli v regulaci metabolismu dusíku v rostlinách. Jeho výskyt v potravinách před tepelnou úpravou je jednou z hlavních příčin vzniku akrylamidu. Hladiny asparaginu v potravinách se značně liší. Nejvyšší množství asparaginu bylo nalezeno v bramborách a to  $93,9 \text{ mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$  [17].

Tvorba akrylamidu začíná reakcí redukujících cukrů nebo karbonylových sloučenin ( $\alpha$ -hydroxykarbonylových či  $\alpha$ -dikarbonylových sloučenin) s aminokyselinou asparagin, což má za následek vznik N-glykosylasparaginu. Pokud nejsou přítomny redukující cukry, ani jiné  $\alpha$ -hydroxykarbonylové či  $\alpha$ -dikarbonylové sloučeniny, dochází pouze k deaminaci asparaginu a vzniká fumaramová kyselina [4].

Vzniklý produkt dehydratuje za vysoké teploty a vzniká Schiffova báze, která ve vodném prostředí dekarboxyluje na příslušný azomethinylid. Další alternativou přeměny Schiffovy báze je vznik betain Schiffovy báze, jejíž dekarboxylací získáme opět azomethinylid, popřípadě může u Schiffovy báze dojít k Amadoriho přesmyku na ketosamin. Ketosamin však není přímým prekurzorem akrylamidu, spíše se podílí na vzniku sensoricky aktivních látek [4].

Decarboxylovaný azomethinylid se rozloží na imin, který může reagovat jedním ze dvou způsobů. Může se hydrolyzovat na aminopropionamid a redukující cukr a následně, po odstranění aminové skupiny z aminopropionamidu vznikne akrylamid. Vzniklý imin může ale také isomerovat na dekarboxylovanou Amadoriho sloučeninu. Z Amadoriho sloučeniny následně vzniká rozštěpením kovalentní vazby mezi uhlíkem a dusíkem akrylamid a aminoketon. Na obrázku (Obr. 4) je znázorněno schéma vzniku akrylamidu reakcí redukujících cukrů s asparaginem [4].



Obr. 4. Vznik akrylamidu v Maillardových reakcích [4]

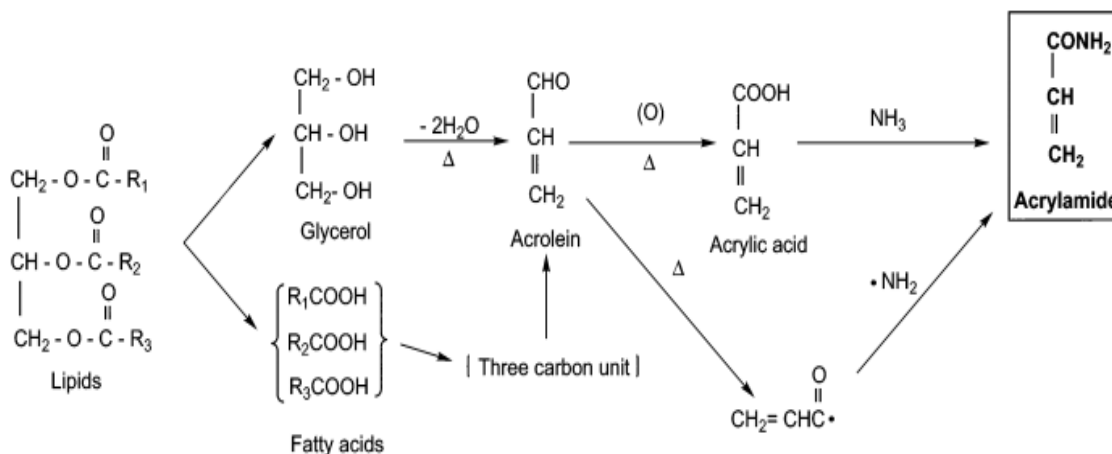


## 2.2 Vznik akrylamidu z lipidů

Další možná hypotéza vzniku akrylamidu je reakcí aminokyselin s lipidy. Mnoho tepelných úprav zahrnuje použití olejů. Zdali má druh oleje vliv na tvorbu akrylamidu není zcela objasněno. Existují různé hypotézy. Někteří vědci se přiklánějí k tomu, že větší množství polárních monoacylglycerolů a triacylglycerolů v palmovém oleji může být důvodem zrychlené tvorby akrylamidu při použití palmového oleje na fritování. Také ve smaženém vzorku s použitím olivového oleje byly naměřeny vyšší hodnoty akrylamidu oproti použití oleje kukuřičného či řepkového. Vědci se však přiklánějí k názoru, že akrylamid není vytvořen z prekurzorů přítomných v oleji samotném [18].

Na druhé straně, bylo studiemí prokázáno, že produkty lipidů, které vznikají jejich oxidací, by se měly vzít v úvahu [18]. Bylo zjištěno, že za zvýšené teploty vzniká z lipidů akrolein, který se považuje za významný prekurzor akrylamidu. Například při zahřátí některých stolních olejů na 300 °C po dobu 2 hodin se vytvoří velké množství akroleinu [16].

Tvorba akrylamidu z lipidů, která je znázorněna na obrázku (Obr. 5) začíná rozkladem lipidů na glycerol, který tvoří akrolein přes dehydratační reakce. Akrolein se oxiduje, čímž dojde ke vzniku akrylové kyseliny, která následně reaguje s amoniakem za vzniku akrylamidu. Za nejvýznamnější zdroj amoniaku při tepelném zpracování potravin je považována aminokyselina asparagin [16].



Obr. 5. Vznik akrylamidu z lipidů [16]

Reakcí kyseliny akrylové a amoniaku vzniká velké množství akrylamidu, což naznačuje, že akrylamid a akrolein mohou hrát důležitou roli při tvorbě akrylamidu v potravinách bohatých na lipidy [16]

S kyselinou akrylovou mohou reagovat i jiné aminokyseliny, jako je například glutamin, za vzniku akrylamidu, avšak k nejvýraznější tvorbě akrylamidu dochází při reakci s asparaginem [16].

### 3 VÝSKYT AKRYLAMIDU

Zjištění přítomnosti akrylamidu v potravinách se pojí s nehodou, ke které došlo při výstavbě železničních tunelů. Průnik této látky do životního prostředí zapříčiněn technologickou chybou vyvolal akutní neurotoxické symptomy u stavebních dělníků, postižena byla také hospodářská zvířata a další živočichové v dané lokalitě. Nehoda způsobila i kontaminaci povrchových vod, která vedla k vysokému úhynu ryb. V rámci toho se začali vědci o akrylamid více zajímat [4].

V dubnu 2002 uveřejnila Švédská národní potravinová správa (The Swedish National Food Administration) informaci o přítomnosti akrylamidu v potravinách upravovaných za vysokých teplot. Tato zpráva uvádí, že by akrylamid mohl být v relativně vysokých koncentracích produkován v potravinách bohatých na sacharidy, jako jsou například smažené brambory a pečené cereální výrobky [15]. Krátce po oznámení výskytu akrylamidu v potravinách začaly světové instituce zabývající se bezpečností potravin ověřovat informaci o potenciálním lidském karcinogenu v potravinách. Přítomnost akrylamidu byla potvrzena [2].

Akrylamid se jako kontaminant nachází v mnoha skupinách potravin. Potravinářské výrobky získané z rostlinných surovin mají tendenci obsahovat vysoké množství akrylamidu, což je způsobeno především přítomností reakčních složek, které se podílejí na tvorbě akrylamidu. Jedná se hlavně o glukózu, fruktózu a asparagin. Naopak masné výrobky obsahují akrylamidu jen málo nebo žádný, protože se v nich vyskytuje minimální množství prekurzorů akrylamidu [2].

Akrylamid obsahují zvláště výrobky ze smažených brambor, jako jsou zejména hranolky a brambůrky, dále pak pečené cereální výrobky, chléb, toastový chléb, snídaňové cereálie, káva a pečivo. Přehled potravin s nejčastějším výskytem akrylamidu je zobrazen v tabulce (Tab. 3) [15].

I sušené ovoce může obsahovat vysokou hladinu akrylamidu, a to také v případě tepelného zpracování pod 120 °C. Potravin, které se jedí čerstvé, nebo vařené při nízkých teplotách akrylamid obvykle neobsahují, popřípadě jen v nepatrných koncentracích [5].

Další možností, jak může docházet ke kontaminaci potravin je uvolňování akrylamidu z obalových materiálů, akrylamidových polymerů. Nepředpokládá se však, že tímto způso-

bem by docházelo k takové kontaminaci potravin, jaká nastává při jejich tepelné úpravě nad 120 °C [11].

Za další zdroj akrylamidu pro lidský organismus lze považovat tabákový kouř, kosmetiku obsahující polyakrylamidové gely a pitnou vodu. Ke kontaminaci pitných vod může dojít snadno, a to díky vysoké mobilitě akrylamidu v půdě a podzemních vodách [5].

Tab. 3. Potraviny s nejčastějším výskytem akrylamidu a jeho obsah [11]

Potravina	Obsah AA [ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
Cereálie a cereální produkty	7834
Cereálie a těstoviny (surové, vařené)	47
Cereálie a těstoviny (opékané, smažené, grilované)	820
Chléb a rohlíky	3436
Pečivo a keksy	7834
Snídaňové cereálie	1346
Pizza	763
Ryby a mořské produkty	233
Maso a vnitřnosti	313
Mléko a mléčné výrobky	36
Ořechy a olejniny	1925
Bramborové pyré, kaše, vařené brambory	69
Pečené brambory	1270
Bramborové lupínky	4080
Bramborové hranolky	5312
Bramborové krokety (mražené)	750
Káva (výluh), hotová	116
Káva (mletá, instantní, nebo pražená, ne výluh)	1291
Kakaové extrakty	4948
Bezkofeinová káva	5399
Kávoviny	7300
Kakaové produkty	909
Cukrovinky a med	112
Zelenina vařená nebo konzervovaná	25
Zelenina tepelně zpracovaná (pečená, smažená, grilovaná)	202
Ovoce sušené, smažené, tepelně zpracované	770
Alkoholické nápoje (pivo, víno, gin)	46
Chuťové přísady a omáčky	1168
Sušené mléko pro dětskou výživu	15
Dětská výživa (konzervovaná, zavařená)	121

### 3.1 Monitoring výskytu akrylamidu

V současné době neexistuje právní předpis, který by obsah akrylamidu v potravinářských výrobcích nějakým způsobem reguloval [15]. Přestože se nestanovily žádné limitní hodnoty, byla vydána doporučení Evropské Komise 2007/331/ES, podle kterého byl v letech 2007-2009 monitorován obsah akrylamidu v potravinách produkovaných v členských státech Evropské unie. Od roku 2010 monitoring pokračoval na základě doporučení Komise 2010/307/ES. Sledování bylo zaměřeno na ty potraviny, u kterých se předpokládá vysoká koncentrace akrylamidu. Směrné hodnoty (Tab. 4) stanovené tímto doporučením pouze poukazují na nutnost zkoumání, nejedná se o bezpečnostní limity. K donucovacímu opatření, nebo vydání rychlého varování by se proto mělo přistoupit pouze na základě řádného posouzení rizika provedeného pro každý případ zvlášť, ale nikoli jen z důvodu překročení směrné hodnoty. Cílem jednotlivých monitoringů bylo získat jasnou představu o obsahu akrylamidu v potravinách, a také informace o dietárním příjmu akrylamidu celé populace. Nejnovější doporučení Komise o zkoumání množství akrylamidu v potravinách pochází ze dne 8. listopadu 2013. Toto doporučení je platné pro rok 2013 i 2014 a na základě výsledků zkoumání z těchto let posoudí komise situaci a rozhodne o potřebě přijetí dalších vhodných opatření [19].

Množství monomerního akrylamidu z obalových materiálů, které přicházejí do kontaktu s potravinami, upravuje Vyhláška Ministerstva zdravotnictví. Jedná se o vyhlášku č. 38/2001 Sb. o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmů. Tato vyhláška sděluje, že se z obalového materiálu nesmí do potravin dostat větší množství akrylamidu než  $0,01 \text{ mg.kg}^{-1}$  [20].

V případě přítomnosti akrylamidu v pitné vodě, je třeba splňovat limity dané Vyhláškou Ministerstva zdravotnictví č. 376/2000 Sb. Tato vyhláška stanovuje požadavky na pitnou vodu, rozsah a četnost její kontroly. V právním předpisu činí limitní hodnota akrylamidu na litr pitné vody  $0,1 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$  [21].

Další právní předpis zabývající se akrylamidem je nařízení Komise (EU) č. 366/2011. Toto nařízení se týká ochrany lidského zdraví a životního prostředí a omezuje uvádění na trh a používání akrylamidu v cementu a ve všech prostředcích využívaných pro cementování. Mezní hodnota pro akrylamid v cementu je 0,1 % [22].

Z důvodu přítomnosti polyakrylamidových gelů v kosmetických přípravcích může docházet ke kontaminaci těchto výrobků monomerním akrylamidem. Limity pro obsah akrylamidu v kosmetice se nacházejí ve Vyhlášce Ministerstva zdravotnictví č. 26/2001 Sb. [23].

Tab. 4. Směrné hodnoty akrylamidu na základě údajů EFSA z let 2007–2012 [19]

Potravina	Směrná hodnota [ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
Hranolky k přímé spotřebě	600
Bramborové lupínky z čerstvých brambor a z bramborového těsta	1000
Měkký chléb	
a) Pšeničný chléb	80
b) Měkký chléb jiný než pšeničný chléb	150
Snídaňové cereálie (kromě ovesné kaše)	
a) výrobky z otrub a celozrnné cereálie, pufované zrní	400
b) pšeničné a žitné výrobky	300
c) výrobky z kukuřice, ovsa, pšenice špaldy, ječmene a rýže	200
Sušenky a oplatky	500
Krekry s výjimkou bramborových krekrů	500
Křupavý chléb	450
Perník	1000
Výrobky podobné ostatním výrobkům této kategorie	500
Pražená káva	450
Instantní (rozpustná) káva	900
Náhražky kávy	
a) převážně obilné náhražky kávy	2000
b) jiné náhražky kávy	4000
Příkrmy pro kojence jiné než obilné příkrmy	
a) bez švestek	50
b) se švestkami	80
Sušenky a suchary pro kojence a malé děti	200
Obilné příkrmy pro kojence a malé děti	50

### 3.2 Akrylamid v ČR a SR

V současné době nejsou k dispozici údaje o skutečném příjmu akrylamidu z potravin, protože odhad expozice akrylamidem ve střední Evropě nebyl doposud proveden. Proto, byla v České a Slovenské republice provedena studie, zabývající se průzkumem spotřeby vybraných potravin s předpokládaným zvýšeným obsahem akrylamidu v potravinových produktech a byl vytvořen odhad příjmu akrylamidu u jednotlivých skupin spotřebitelů a distribuce příjmu akrylamidu během dne [24].

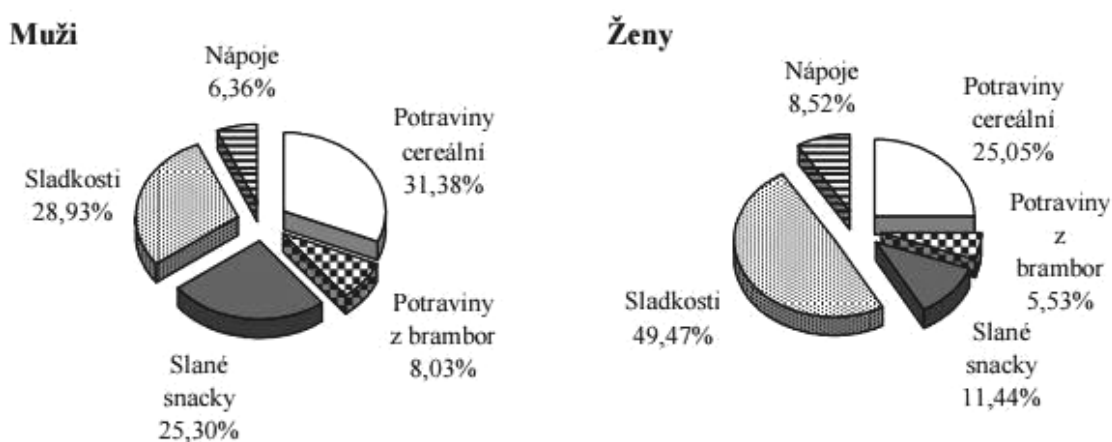
Pro stanovení průměrného denního příjmu akrylamidu byla použita metoda dotazníku, který byl zaměřen především na běžně konzumované potravinářské výrobky, u nichž se v průběhu tepelné přípravy předpokládá tvorba akrylamidu. Seznam některých dotazovaných potravin je uveden v tabulce (Tab. 5), zároveň je u každého potravinářského výrobku uveden průměrný denní příjem akrylamidu zjištěný z dotazníku [24].

Tab. 5. Denní příjem dotazovaných potravin [24]

Potravina	Příjem akrylamidu [ $\mu\text{g}\cdot\text{den}^{-1}$ ]	
	Min	Max
Chléb konzumní	0,439	10,890
Pečivo	1,187	28,567
Topinka, pečený toast	0,302	32,189
Smažené hranolky	0,054	15,123
Smažené bramborové placky	1,058	1,378
Bramborové chipsy	0,034	28,133
Perník plněný	0,018	5,680
Slané snacky	0,038	6,862
Sladké sušenky neplněné	0,656	104,958
Snídaňové cereálie	0,058	10,923
Káva	1,103	19,067
Müsli tyčinky	0,026	0,364

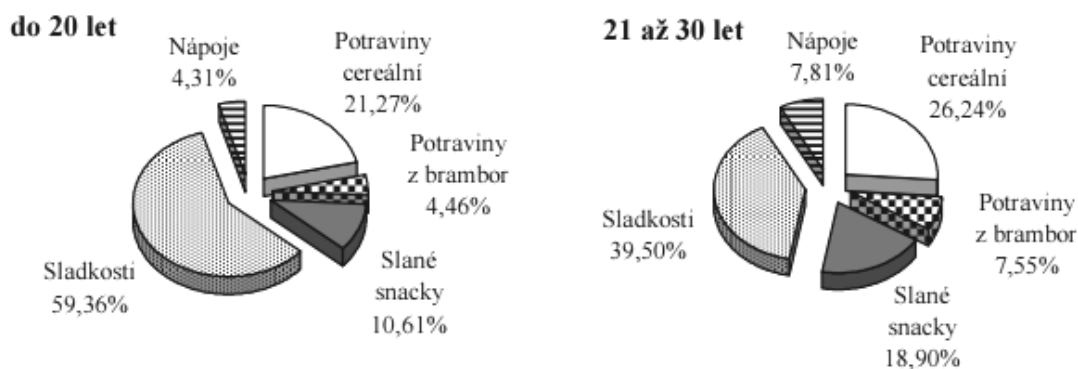
Průzkum spotřebitelských zvyklostí byl proveden na náhodné skupině spotřebitelů. Celkově bylo osloveno 285 lidí, kteří měli rozdílné vzdělání, zaměstnání a byli z různých okresů České a Slovenské republiky. Z celkového počtu dotazovaných tvořilo 69 osob muži a 216 osob ženy [24].

Při porovnání zatížení lidského organismu akrylamidem je patrný rozdíl v podílu jednotlivých potravin u mužů a žen (Obr. 6). U mužů jsou hlavními zdroji akrylamidu cereální výrobky, sladkosti (perníky, sušenky) a slané snacky. U žen jsou dominantním zdrojem akrylamidu v každodenní stravě sladkosti [24].

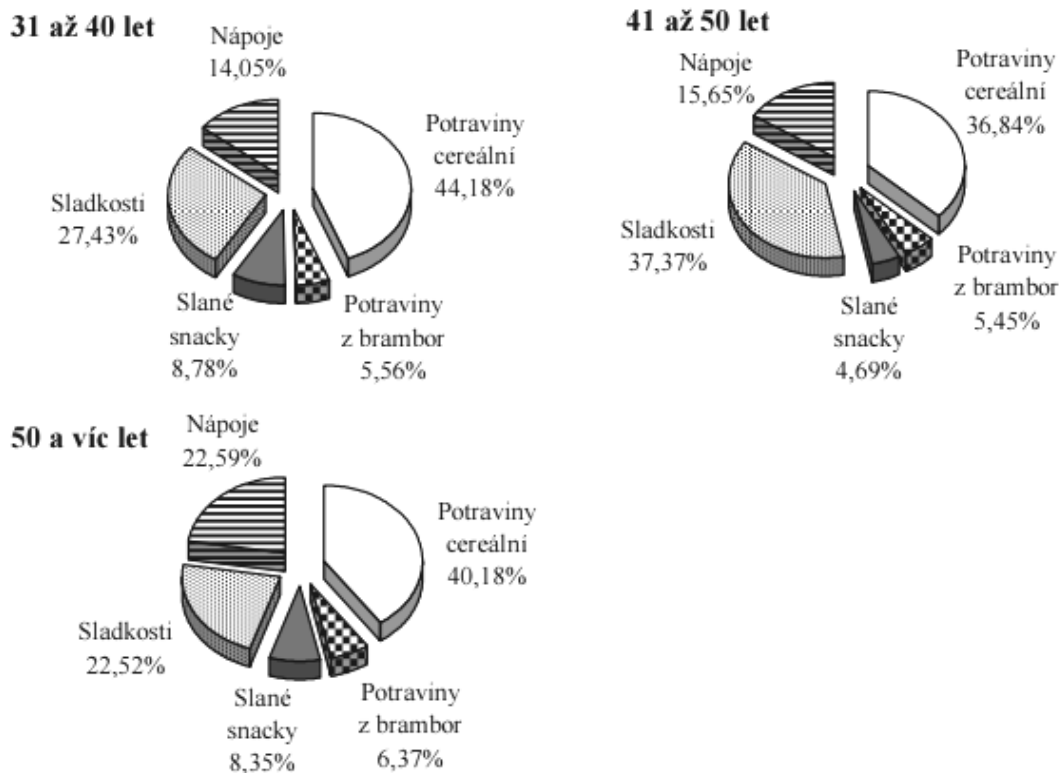


Obr. 6. Procentní zastoupení jednotlivých potravin u mužů a žen [24]

Zajímavé je i porovnání denního příjmu akrylamidu s rostoucím věkem dotazovaných. S přibývajícím věkem se především snižuje příjem sladkostí a naopak dochází k nárůstu konzumace cereálních potravin a nápojů, tedy hlavně kávy (Obr. 7) [24].

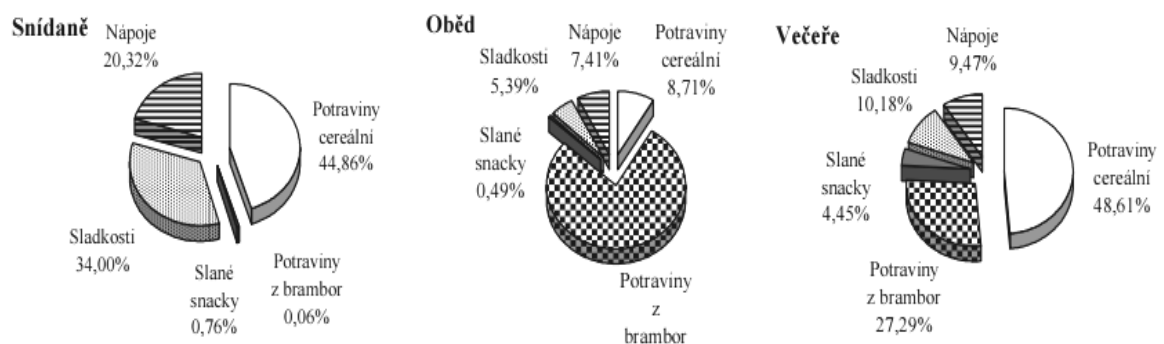






Obr. 7. Rozdíly v zastoupení potravin v denním příjmu akrylamidu se zvyšujícím se věkem [24]

Výrazné rozdíly byly zjištěny i v podílu potravin na denním příjmu akrylamidu v hlavních jídlech (Obr. 8). Dle očekávání byly hlavními zdroji akrylamidu během snídaně cereální potraviny, sladkosti a také nápoje. Během oběda velmi výrazně převládají potraviny z brambor, což není překvapující, vzhledem k tomu, že brambory jsou nejrozšířenější příloha. Při večeři dominují potraviny cereální a také v menší míře výrobky z brambor [24].



Obr. 8. Procentuální zastoupení potravin podílejících se na denním příjmu AA [24]

### 3.3 Minimalizace akrylamidu v potravinách

V návaznosti na oznámení přítomnosti akrylamidu v potravinách a vzhledem k možným zdravotním rizikům souvisejících s příjmem této látky z potravin byly podniknuty kroky, které vedly k pochopení vzniku akrylamidu a určení potenciálních cest ke snížení jeho obsahu v potravinách. Bylo vynaloženo značné úsilí na celosvětové úrovni, aby se vypracovaly strategie snižující obsah akrylamidu především v rizikových potravinách. Na základě těchto strategií byla sepsána pravidelně aktualizovaná příručka *Acrylamide Toolbox* vydaná Konfederací potravinářského a nápojového průmyslu EU (CIAA). Tato příručka podává kompletní obraz o metodách vedoucích ke snížení obsahu akrylamidu v potravinách [3].

Akrylamid se vyskytuje převážně v potravinách bohatých na redukující cukry a asparagin, které jsou považovány za hlavní prekurzory jeho tvorby. Z doposud poznaného mechanismu tvorby akrylamidu, který vzniká během tepelné úpravy potravin, lze výsledný obsah akrylamidu v potravinách ovlivnit cestou snížení hladiny prekurzoru ve výchozích surovinách, nebo úpravou technologických procesů. Úprava procesů zahrnuje především omezení množství, nebo úplnou náhradu kypřících látek, ale také úpravu pH, teploty, obsahu vody, času, skladování anebo přidavek jiných látek, například glycinu či asparaginu. Avšak musí se dbát na zachování sensorických a kvalitativních vlastností výrobku, na mikrobiologickou nezávadnost produktu a nenáročnost zpracování daného výrobku [14].

Možnosti snížení obsahu akrylamidu v potravinách musí být navrženy všeobecně. Je třeba vzít v úvahu rozdíly mezi recepturami produktů, postupy zpracování, zařízením, i rozdíly mezi stejnými výrobky různých značek [25].

V příručce *Acrylamide Toolbox* bylo celkově identifikováno 14 možných parametrů, které ovlivňují obsah akrylamidu v potravinách (každý parametr nemusí být použitelný ve všech kategoriích výrobků) [25]:

1. agronomický
  - množství asparaginu
  - množství sacharidů
2. receptura (ingredience, tvar výrobků aj.)
  - pH
  - kypřící látky
  - přidání dalších látek do receptury
  - změna receptury

### 3. zpracování

- teplota, čas a kontrola obsahu vody
- předběžná úprava
- fermentace
- použití enzymu asparaginasa
- textura výrobku

### 4. finální úprava

- struktura a chuť
- konečná barva produktu
- uskladnění výrobku [25]

Příručka je určena zvláště pro rizikové potraviny. Je však třeba zdůraznit, že ve většině případů neexistuje jediné řešení pro snížení akrylamidu v potravinách, a to i v dané kategorii výrobků [25].

## 3.4 Rizikové potraviny

Na základě dostupných dat se předpokládá, že k dietární expozici západní populace nejvíce přispívají především výrobky z brambor, jako jsou smažené hranolky (16-30 %), smažené bramborové lupínky (6-46 %), dále káva (13-39 %), pečivo a sladké sušenky (10-20 %), chléb a křehký chléb (10-30 %) a v malé míře i další potraviny (< 10 %). Rozdíly k celkovému příjmu akrylamidu se odvíjí od složení potravního koše v různých zemích. Například podíl kávy na celkovou expozici v Holandsku se odhaduje na 13 %, kdežto ve Švédsku je až 39 %. Pro střední Evropu je příjem akrylamidu spojen zvláště s konzumací smažených a pečených bramborových výrobků [4].

### 3.4.1 Brambory

Brambory představují jednu z nejvýznamnějších plodin určených k výživě populace. Jsou denně konzumovány miliony lidí z celého světa a patří mezi čtvrtou nejpěstovanější plodinu, jejíž světová produkce činí kolem 300 milionů tun ročně. Proto je přítomnost akrylamidu v bramborových výrobcích důvodem znepokojení, a několik projektů začalo tento problém řešit. Množství akrylamidu v hotovém výrobku závisí již na výchozí surovině [26].

Bramborové hlízy (*Solanum tuberosum ssp. Tuberosum L.*) jsou jediným využitelným orgánem bramborového trsu. Složení hlíz je ovlivněno odrůdou, hnojením, půdně klimatic-

kými podmínkami, agrotechnikou, stupněm zralosti při sklizni, podmínkami skladování apod. Mezi základní látky hlízy patří hlavně voda, dále je to škrob, cukry, dusíkaté látky, vláknina, tuk, minerální látky, vitaminy, alkaloidy, organické kyseliny, polyfenoly aj. Jednotlivé látky nejsou v hlíze rovnoměrně rozloženy. V poslední době je věnována pozornost aminokyselině, která je v bramborách zastoupena v největším množství, a to asparaginu a též redukujícím cukrům. [27].

Asparagin patří mezi nejdůležitější aminokyselinu při tvorbě akrylamidu. Koncentrace volného asparaginu v bramborové hlíze se pohybuje v rozmezí 4-25 mg.g<sup>-1</sup> suché hmotnosti. Obsah redukujících cukrů (převážně glukózy a fruktózy) se pohybuje v rozmezí 0,04 až 4,8 mg.g<sup>-1</sup> suché hmotnosti v hlízách. Množství prekurzorů záleží na odrůdě a pěstitelských podmínkách [28].

Jednou z nejdůležitějších pěstitelských podmínek je typ půdy, podmínky a použité hnojivo. Typ půdy a místní atmosférické podmínky ovlivňují velikost hlíz, distribuci a složení. Bylo zjištěno, že je-li teplota v závěrečné fázi růstu nízká, následkem může být nepříjemně vysoká hladina cukru v hlízách [27]. Při pěstování se zkoumal také vliv hnojení. Zjistilo se, že snížením obsahu síry v hnojivu brambor lze dosáhnout snížení produkce akrylamidu během jejich zpracování [14].

Vliv na množství redukujících cukrů má i skladování. Z různých studií vyplývá, že nezralé hlízy mají tendenci obsahovat vyšší koncentraci redukujících cukrů než hlízy vyzrálé.

Proto by měly být skladovány jen hlízy vyzrálé a to za určitých skladovacích podmínek.

Teplota skladování by měla být kolem 8 °C. Snížení teploty pod 8 °C má za následek nárůst obsahu redukujících cukrů [11].

### 3.4.2 Výrobky z brambor

Jde o výrobky z konzumních brambor, které jsou upravené technologickým procesem, zejména smažením, vařením a sušením a určené pro přímou spotřebu anebo další kuchyňskou úpravu [27].

Na výrobu bramborových produktů se využívá technologie snížení teploty (chlazené, mražené výrobky), zvýšení teploty (blanširované výrobky), nebo odnětí vody (sušené, smažené výrobky) [27].

Bramborový průmysl vyvinul řadu před smažených bramborových výrobků, a to buď chlazených, nebo zmrazených. Tyto výrobky (Obr. 9) jsou charakteristické tvorbou akrylamidu

při konečné přípravě, ať už v restauracích, stravovacích službách, nebo v domácnostech [26].

Aktuální expozice člověka akrylamidem je vysoce variabilní, protože kuchaři a spotřebitelé mají různé preference, pokud jde o změnu barvy a mají rozvinuté individuální přípravné techniky, aby splnily své specifické požadavky. Kromě toho, profesionální a domácí spotřebiče mají různé regulace tepelného zařízení. Minimalizace tvorby akrylamidu závisí na dvou faktorech, snížení prekurzorů v surovinách a optimalizace tepelného ošetření. Oba tyto faktory je třeba pečlivě zvážit, protože sensorická a výživová kvalita výrobků musí být zachována [26].



*Obr. 9. Výrobky z brambor – hranolky [29]*

Jedna z hlavních strategií minimalizace akrylamidu v polotovarech je snížení množství volného asparaginu a redukujících cukrů před tepelnou úpravou suroviny. Pro nízké množství prekurzorů je třeba pečlivě vybrat bramborové hlízy [11]. Vznik akrylamidu je také velmi ovlivněn stupněm pH. Obecně lze říci, že minimalizovat obsah akrylamidu je možné snížením pH, a to například přidáním vybrané organické kyseliny, kterou může být kyselina citrónová, kyselina askorbová nebo kyselina octová. Nevýhodou uvedené aplikace je, že může dojít k ovlivnění vlastností konečného výrobku, jako je kyselá chuť nebo nedostatečné zbarvení. Zároveň může dojít ke zvýšené tvorbě jiných škodlivých látek, například 3-monochlorpropandiolu [3].

Množství akrylamidu v polotovarech z velké části ovlivňuje teplota a čas tepelné úpravy. Při experimentu s tepelnou úpravou hranolek bylo zjištěno, že konečná koncentrace akrylamidu silně souvisí s teplotou, při které byly hranolky dokončeny, a nikoli s teplotou před-smažení. Zatímco množství akrylamidu bylo relativně nízké při teplotách mezi 150 a 175 °C, při teplotách kolem 180 – 190 °C došlo k dramatickému nárůstu. Nízké teploty smažení jsou však spojeny s negativními dopady na kvalitu, jako je například vyšší množství tuku a negativní změny textury v konečném výrobku. Je také důležité sledovat konečnou vlhkost produktů tak, aby nebyly příliš suché nebo příliš měkké a vlhké, jinak budou spotřebiteli zamítnuty [26].

Trhu s hotovými výrobky dominují bramborové lupínky (Obr. 10). Stejně jako u bramborových polotovarů i zde závisí množství akrylamidu zvláště na prekurzorech v použitých surovinách a tepelném ošetření [26].



Obr. 10. Bramborové lupínky [30,31]

Snížením koncentrace prekurzorů akrylamidu se sníží tvorba akrylamidu v konečném výrobku. Několik studií zjistilo, že namáčením nakrájených hlíz v destilované vodě po dobu 90 minut se sníží obsah cukrů až o 30 %. Velice účinné je i blanšírování bramborových plátků, čímž může dojít ke snížení obsahu glukózy až o 76 % a asparaginu až o 68 %. To vedlo k velmi významnému snížení tvorby akrylamidu, ale bohužel bylo snížení doprovázeno ztrátou texturní kvality, založené na změnách v buněčné stěně, zejména pektinu a esterifikace pektinu. Ponořením bramborových plátků v organických kyselinách (např. v kyselině citrónové) nedošlo k významnému snížení obsahu glukózy a asparaginu, ale redukoval se vznik akrylamidu v konečném výrobku téměř o 70 % [26].

Co se týče tvorby akrylamidu v závislosti na teplotě, tepelné zpracování nad 170 °C vede k prudkému nárůstu koncentrace akrylamidu v bramborových výrobcích. Proto je třeba teplotu zpracování snížit, avšak tato teplota musí být taková, aby konečný obsah vlhkosti byl méně než 3 %, a tím se zachovala křupavost výrobků, což je značně obtížné, protože při snížení teploty se zvyšuje obsah tuku, čímž dochází k měknutí výrobku. Vědci si myslí, že možným řešením by mohlo být snížení tlaku vzduchu, aby se dosáhlo nižší teploty varu. Některé experimenty ukázaly významné snížení tvorby akrylamidu, např. o 63 %, ve vakuu při smažení o nižší teplotě a to kolem 125 - 140 °C. Chuťové vlastnosti vakuovaných smažených lupínků se významně nelišily od klasicky smažených lupínků, co se týče struktury a chuti, ale barva byla odlišná [26].

### 3.4.3 Obiloviny a výrobky z nich

Obilné výrobky představují také významný zdroj této zdraví škodlivé látky. V porovnání s bramborovými výrobky obsahují menší množství akrylamidu [26]. Mezi výrobky z obilovin, u kterých byl prokázán značný obsah akrylamidu patří zvláště chléb, perníky, různé druhy sušenek a snídaňové cereálie [26,32].

Z hlediska akrylamidu je největší problém přítomnost redukujících cukrů a asparaginu. Je známo, že pro tvorbu akrylamidu v bramborových produktech je mnohem důležitější množství redukujících cukrů, než volný asparagin. Ve výrobcích z obilovin je tomu naopak, volný asparagin je hlavní determinant pro vznik akrylamidu. Vysoký obsah asparaginu je obsažen v endospermech obilných zrn [26].

Z doposud provedených studií lze obecně říci, že množství asparaginu v surovinách, zejména v obilné mouce je klíčovým faktorem tvorby akrylamidu během pečení. Koncentrace volného asparaginu byly studovány v různých typech mouky. Některé studie potvrdily relativně vyšší hladiny asparaginu v žitné mouce ve srovnání s pšeničnou a celozrnnou moukou [26].

Výsledný obsah akrylamidu závisí na receptuře, době a teplotě procesu, podmínkách zpracování a množstvím asparaginu v obilí [11].

#### 3.4.3.1 Chléb

Hladiny akrylamidu nalezené v chlebu jsou poměrně nízké, ale vzhledem k vysokým spotřebám může být relevantním zdrojem expozice akrylamidu. Hladiny akrylamidu hlášené v různých studiích se pohybují v rozmezí od 15 do 90 g.kg<sup>-1</sup>, ale mohou být i vyšší. Z tohoto



důvodu je důležité vzít v úvahu různé definice, formulace, a způsoby využívání chleba v různých zemích, neboť se může velmi podstatně lišit, a tudíž vést k rozličnému množství v produktech při spotřebě [26].

Jak už bylo zmíněno, existuje mnoho faktorů, které ovlivňují obsah akrylamidu. Nejde pouze o rozdíly ve složení surovin, co se týče obsahu prekursoru akrylamidu, ale také malé rozdíly v technologickém procesu mají vliv na vznik akrylamidu [33].

Z dosud známých mechanismů tvorby akrylamidu v tepelně upravovaných potravinách lze uvažovat o možnosti eliminace vzniku akrylamidu v pekárenských výrobcích, například cestou dlouhodobého kvašení, během kterého je asparagin asimilován kvasinkami. Některé studie prokázaly snížení obsahu akrylamidu až o 50 % po jedné hodině fermentace. Nejmenší obsah akrylamidu byl zjištěn v pekárenských výrobcích, které se kvasí spontánní fermentací žitné mouky, při které se vyskytuje přirozený mikroorganismus *Saccharomyces cerevisiae*. Předpokládá se, že kvůli tomu byla hodnota pH v těchto chlebech nižší, což způsobilo snížení tvorby akrylamidu [33]. Také přidávkem konkurenční aminokyseliny, jako je glycin, došlo k významnému snížení koncentrace akrylamidu v chlebu a to tak, že glycin konkuruje pozici asparaginu v Maillardových reakcích [26].

Tepelné zpracování a konečný obsah vlhkosti jsou rozhodujícími faktory vzniku akrylamidu. Studiemi bylo prokázáno, že v chlebová střída akrylamid neobsahuje. Běžně teplota ve vnitřku bochníku totiž nepřevyšuje 100 °C a vlhkost nepřekročí 40 %, takže Maillardovy reakce tvorby akrylamidu neproběhnou. Ukázalo se, že tato sloučenina se objevuje pouze v chlebové kůrce. Faktem je, že díky specifické pekárenské technologii nevzniká akrylamidu mnoho. Podle tradičního procesu by měl být povrch těsta bochníku navlhčen předtím, než je vložen do trouby a poté se napaří. To má za následek další zvýšení vlhkosti a ochlazení povrchu chleba kondenzovanou parou. Díky tomu teplota na konci pečení nepřevyšuje 160 °C [33].

#### 3.4.3.2 *Perníky, sušenky*

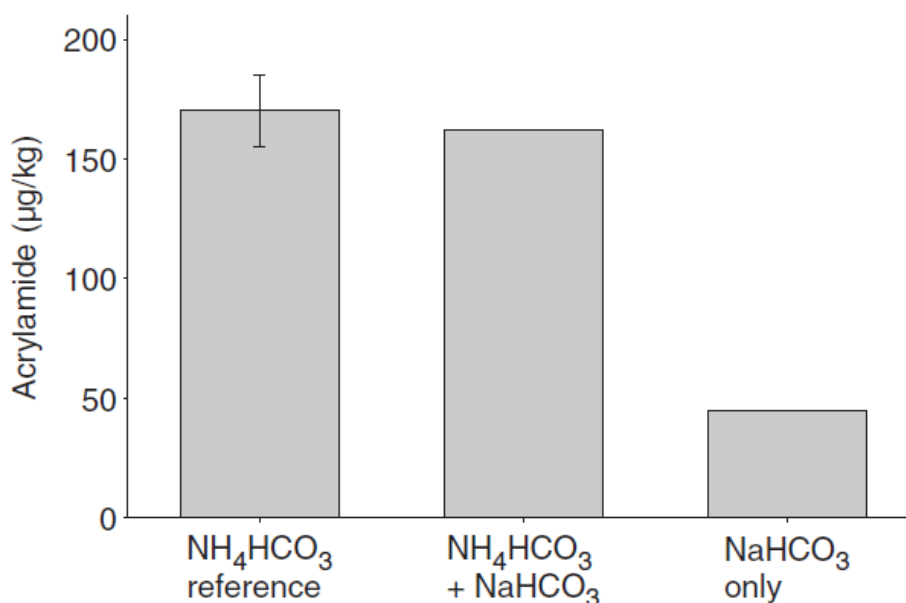
Při výrobě perníků se běžně používá chemické kypření. Z hlediska chemického kypření pečiva je důležité zvolit správné činidlo, které kynutí umožňuje [26].

Hydrogenuhlíčan amonný je běžně využíván jako kypřící látka v některých potravinách, zvláště pro přípravu perníků, protože zabezpečuje charakteristický vzhled a texturu výrobků. Při použití  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  při kynutí perníku byl obsah akrylamidu v hotovém výrobku vyš-



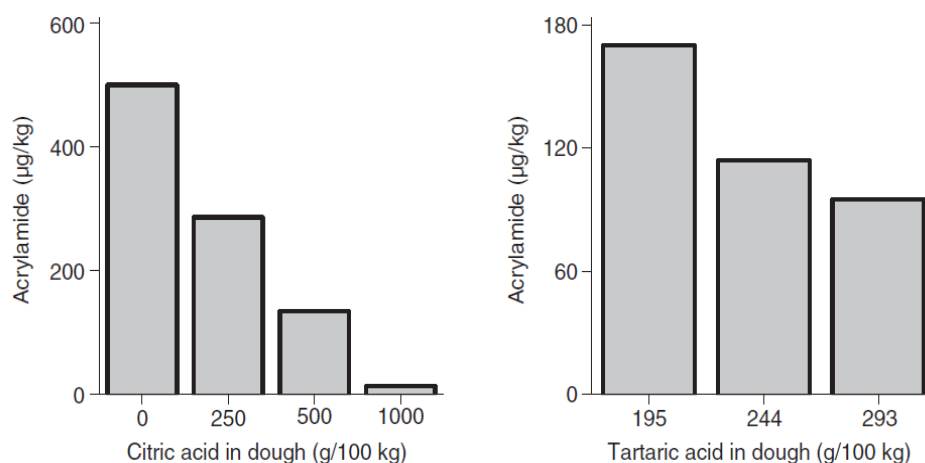
ší než  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Mechanismus účinku  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  na tvorbu akrylamidu je založený na zvýšené tvorbě sacharidových fragmentů, jako jsou glyoxal, glycerinaldehyd a další, které zvyšují tvorbu akrylamidu díky jejich reakci s asparaginem [34].

Nahrazení hydrogenuličitanu amonného za hydrogenuhlíčan sodný je významný způsob, jak lze snížit množství akrylamidu v chemicky kypřených produktech. Při použití  $\text{NaHCO}_3$  namísto  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , jak je znázorněno na obrázku (Obr. 11), byl obsah akrylamidu v perníku snížen až o 60 % [34].



Obr. 11. Výsledky z pečení perníku, kde byl  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  nahrazen  $\text{NaHCO}_3$  [34]

Spolu s  $\text{NaHCO}_3$  je vhodné použít organické kyseliny jako je kyselina vinná, nebo kyselina citrónová, a to nejen proto, že zvyšují uvolňování  $\text{CO}_2$ , ale zároveň snižují pH výrobku. V perníku koncentrace akrylamidu klesla díky použití dostatečného množství kyseliny citrónové (Obr. 12). Nevýhodou této aplikace je však nežádoucí vliv na výslednou barvu a kyselou chuť výrobku. Proto byla stanovena přiměřená dávka (maximálně 250 g na 100 kg), která je v souladu se senzorickými požadavky na upečený perník. Zvýšením množství kyseliny vinné se dosáhlo snížení koncentrace akrylamidu o 30–40 % (Obr. 12) [34].



Obr. 12. Vliv kyseliny citrónové a vinné na koncentraci AA [34]

Typ cukru v receptuře může být dalším důležitým činidlem pro tvorbu či redukci akrylamidu. Hlavními zdroji glukózy a fruktózy ve sladkých pekárenských výrobcích jsou med, invertní sirup a karamelové barvivo. Nahrazením těchto ingrediencí roztokem sacharózy je možné snížit koncentraci akrylamidu ve finálních výrobcích. V perníku byl snížen obsah akrylamidu o 90 %, a to i když byl jako kypřící látka použit hydrogenuhličitan amonný. Účinek této kypřící látky totiž závisí na přítomnosti redukujících cukrů. Avšak kvalita těchto perníků nebyla přijatelná, protože měly netypickou světlou barvu. To znamená, že nahrazení redukujících cukrů roztokem sacharózy je možný jen v případě, že není zbarvení důležité [34].

Další možností jak snížit množství akrylamidu ve finálním výrobku je přidání glycinu. Přidáním 10 g glycinu na 1 kg perníkového těsta bylo pozorováno snížení akrylamidu o 60 %. Zajímavé bylo, že přidání této látky provázelo silnější zbarvení výrobku. Glycin zřejmě snižuje koncentraci akrylamidu a současně zvyšuje ztmavnutí, v čemž má rozdílný účinek od kyseliny citrónové, která naopak výrobek zesvětluje [34].

Příznivé účinky glycinu byly pozorovány i u cereálních a bramborových produktů. Z tohoto důvodu se považuje za významnou látku z hlediska využití v potravinářství a do budoucna se uvažuje o jeho dalším zkoumání [34].

Použití enzymu asparaginázy představuje jednoduchý a účinný způsob, jak snížit množství akrylamidu v pekárenských produktech. Tento enzym hydrolyzuje klíčový prekurzor asparagin na aspartovou kyselinu a čpavek. Může být přidáván do těsta během hnětení. Výhodou této látky je, že nijak neovlivňuje sensorické vlastnosti výrobku [34].

Účinnost enzymu asparagináza proti vzniku akrylamidu byla demonstrována již dříve na pokusech s bramborami. Další pokusy s výrobky jako je perník a sušenky prokázaly účinnost asparaginázy a její vhodnost při pečení. V perníku byl díky přidání asparaginázy do těsta snížen obsah akrylamidu o 50 %. V sušenkách bylo pozorováno snížení koncentrace akrylamidu až o 90 % [34].

Omezená dostupnost a vysoká cena enzymu asparagináza značně omezuje jeho využití na snížení vzniku akrylamidu. Nicméně se do budoucna jeví jako možnost využití GMO enzymů, které mohou být produkovány ve větším množství [34].

### 3.4.3.3 Snídaňové cereálie

Snídaňové cereálie obsahují velkou a různorodou kategorii potravin. Jsou vyrobené z obilných zrn upravených různými procesy, které vedou k mnoha formám vloček, křupek, aj. Získané údaje z výzkumné databáze EU ukazují, že množství akrylamidu ve snídaňových cereáliích, se pohybují v rozmezí od 5 do 846 g.kg<sup>-1</sup> [26].

Nejslibnějším prostředkem ke snížení obsahu akrylamidu ve snídaňových cereáliích je redukce volného asparaginu v plodinách, ze kterých jsou vyrobené [26].

Akrylamid ve snídaňových cereáliích vzniká zvláště během pečení, zejména když vlhkost klesne pod 5% a začíná se tvořit typická chuť a barva [26].

### 3.4.4 Káva

Zajímavé jsou údaje, které se týkají kávy. Množství akrylamidu v kávě závisí na druhu, šarži, podmínkách pražení a v případě rozpustné kávy i na podmínkách extrakce a sušení. Káva se obvykle praží při teplotách v rozmezí 220-250 °C, tak aby bylo dosaženo požadovaných vlastností pražené kávy. Průměrný obsah akrylamidu v pražené zrnkové kávě se pohybuje mezi 170 až 351 µg.kg<sup>-1</sup>. I když je koncentrace akrylamidu v zrnkách pražené kávy relativně nízká z hlediska vysoké spotřeby, káva značně přispívá k expozici akrylamidem [11].

Při porovnání dvou druhů káv (Arabica a Robusta) je všeobecně vyšší obsah akrylamidu v kávě Robusta, což souvisí s vyšší koncentrací volného asparaginu v této odrůdě kávy [26].

Protože jsou kávová zrna zpracovávána při relativně vysoké teplotě, vyšší než ostatní potraviny, je možné očekávat, že ke vzniku akrylamidu vede více než jedna chemická cesta.

Nejvyšší množství akrylamidu v kávě se tvoří ihned během počátečního kroku pražení a s koncem pražicího cyklu jeho obsah klesá v důsledku odpařování nebo polymerizace. To znamená, že silně pražené kávy mají nižší obsah akrylamidu než středně, nebo světle pražené kávy. Stupně pražení kávy jsou znázorněny na obrázku (Obr. 13) [11].



Obr. 13. Stupně pražení kávy [35]

Delší doba pražení by mohla snížit množství akrylamidu v opražených kávových zrnech. Také zvýšením teploty může dojít k mírnému poklesu koncentrace akrylamidu. Zvýšená teplota, nebo delší doba pražení však mohou mít za následek vznik jiných nežádoucích látek včetně negativního ovlivnění sensorických vlastností celého výrobku. V důsledku toho není praktické řešení, které by omezilo množství akrylamidu a současně by zachovalo vlastnosti kvalitní kávy [26].

### 3.4.5 Ostatní rizikové potraviny

#### 3.4.5.1 Pražené mandle

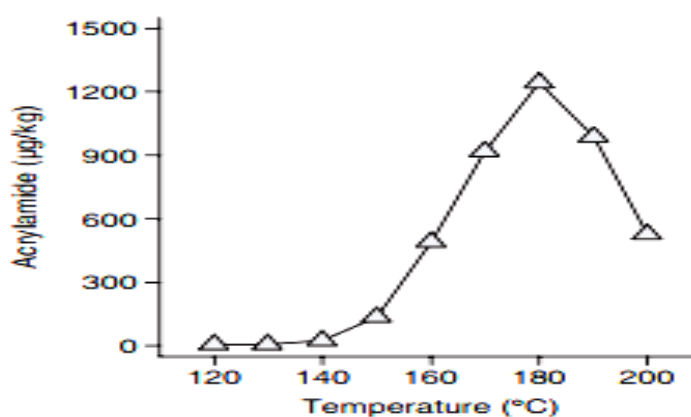
Za mandlové výrobky se považují pražené mandle (Obr. 14) a pekárenské výrobky s mandlemi. Ty mohou také obsahovat značné množství akrylamidu, protože obdobně jako smažené bramborové výrobky i čerstvé mandle obsahují vysoké koncentrace volného asparaginu. Redukující cukry jsou v mandlích během smažení spotřebovány, zatímco volný asparagin je stále přítomný [34].



Obr. 14. Pražené mandle [36]

Mandle se obvykle praží při teplotě 165 °C. Obsah volného asparaginu v mandlích se liší dle odrůdy a zemědělský postupů, které byly zvoleny při jejich pěstování. Tyto postupy je třeba blíže identifikovat, protože určení správné odrůdy a její pěstování by mohlo být přínosem z hlediska redukce volného asparaginu [34].

Kromě volného asparaginu v čerstvých mandlích je důležitým faktorem pro tvorbu akrylamidu také teplota. Koncentrace akrylamidu výrazně vzrůstá, když se teplota pražení zvýší ze 140 °C na 200 °C. Pod 140 °C se akrylamid tvoří v malém množství, okolo 180 °C je koncentrace nejvyšší a poté se začíná postupně snižovat (Obr. 15) [34].



Obr. 15. Vliv teploty na obsah akrylamidu [34]

Vzorky, které se pražily při teplotě nad 180 °C, byly přesmažené, a proto nelze zvyšování teploty použít jako vhodný způsob snižování akrylamidu v případě pražených mandlí [34].

Nižší teplota pražení, výběr mandlí s nízkou hladinou volného asparaginu a zamezení přílišného ztmavnutí mandlí jsou považovány za hlavní postupy, jak snížit obsah akrylamidu v pražených mandlích [34].

### 3.4.5.2 *Olivy*

O množství akrylamidu v olivách bylo dosud zveřejněno jen málo informací. V roce 2003 byl publikován údaj o vysokém obsahu akrylamidu v černých nakládaných olivách z Kalifornie. To vedlo k experimentu testování oliv na obsah akrylamidu. K testování vzorků byly použity rozdílné techniky kapalinové a plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií. Koncentrace akrylamidu se značně lišily, ale obecně černé olivy obsahovaly asi 10 krát více akrylamidu než zelené olivy. To znamená, že stupeň zrání a postupy aplikované na černé olivy mohou být důležité při posuzování množství akrylamidu. Analýzy slaných nálevů u některých nakládaných oliv ukázaly, že akrylamid může být vyluhován do nálevů. Množství akrylamidu v nálevech se pohybují od 540 do 910  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [34].

Vezme-li se v úvahu původ oliv, nejvyšší obsah akrylamidu byl nalezen ve španělských olivách. Při hodnocení množství akrylamidu v olivách je však zapotřebí přihlídnout k rozdílům v odrůdách, ke stupni zralosti, pěstování a technice zpracování [34].

Byly zkoumány dva vzorky z Itálie, čerstvé černé olivy, které byly sklizeny již velmi zralé, a extrahované černé olivy na obsah volného asparaginu a redukujících cukrů. Čerstvé olivy obsahovaly 30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  volného asparaginu a přibližně 10500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  glukózy na fruktózy. Extrahované olivy obsahovaly pouze kolem 1,4  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  volného asparaginu a přibližně 180  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  redukujících cukrů. Z experimentu bylo zjištěno, že extrakce odstranila poměrně vysoké množství prekurzorů akrylamidu. Dále byly oba vzorky zahřívány na teplotu 120 °C po dobu 40 minut v plynové troubě. V průběhu zahřívání se v čerstvých olivách vytvořilo 4680  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu, zatímco v extrahovaných olivách se vytvořilo 3107  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu. Různé množství akrylamidu v čerstvých a extrahovaných italských olivách uvádí, že způsob zpracování a stupeň tepelného ošetření může být relevantní [34].

Množství akrylamidu v olivách se zvyšuje s dobou tepelného ošetření. Je tedy evidentní, že se akrylamid v olivách tvoří v průběhu tepelného procesu, který se často aplikuje z důvodu

uchování produktu. Avšak akrylamid může v olivách vznikat různými cestami, proto by měl být dále zkoumán [34].

### 3.4.5.3 Sušené ovoce

Detekce významného množství akrylamidu v olivách vedla k testování dalších kategorií potravin, jako je sušené ovoce. Jako hlavní podkategorie byly zkoumány sušené hrušky (Obr. 16) a sušené švestky, ale zkoumáno bylo i ostatní ovoce. Pro měření hodnot akrylamidu byly použity různé metody stanovení [34].



Obr. 16. Sušené hrušky [37]

Nejvyšší koncentrace akrylamidu byly nalezeny v sušených, tmavě zbarvených celých hruškách značky Weichspeckbirnen. Množství akrylamidu v těchto hruškách bylo naměřeno ve švýcarských laboratořích. Překvapivě bylo zjištěno až  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu, takové hodnoty nebyly doposud u sušeného ovoce uvedeny. Jeden vzorek celých sušených hrušek obsahovat  $2060 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu. Avšak hodnoty v různých vzorcích se značně liší. Z toho důvodu se hodnotilo množství akrylamidu v šesti celých hruškách značky Weichspeckbirnen. Jednotlivé vzorky hrušek obsahovaly 500, 990, 1070, 1430, 2760 a  $4710 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu. Takové kolísání obsahu akrylamidu bylo zaznamenáno i u stejného počtu jader pražených mandlí a mezi jednotlivými hlízkami stejného množství brambor [34].

Další zkoumané ovoce na množství akrylamidu byly sušené meruňky, datle, banány a rozinky. U sušených meruněk, organicky pěstovaných, bylo naměřeno  $180 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  akrylamidu. V sušených datlích bylo zaznamenáno  $70 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  a v sušených banánech  $50 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

<sup>1</sup>. V sušených hrozinkách bylo detekováno jen stopové množství akrylamidu, které činilo  $10 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [34].

Naměřené hodnoty ukazují, že sušené ovoce může obsahovat značné množství akrylamidu, i když se během sušení obvykle používají teploty kolem 70–80 °C. Na druhé straně, pokud zpracováváme sušené ovoce, jako jsou například celé hrušky, může dehydratace trvat i několik dní [34].

#### **3.4.5.4 Dětská výživa**

Zvýšené hladiny akrylamidu byly také nalezeny v dětské výživě na bázi obilovin. Bylo zjištěno, že obsah akrylamidu v dětské výživě se pohybuje v rozmezí  $2\text{--}516 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  v závislosti na produktu. Nejvyšší obsah akrylamidu byl zjištěn v dětských sušenkách, který činil  $219 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  a nejnižší obsah akrylamidu byl nalezen v kojenecké výživě ve skle, činil v průměru  $55 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [38].

Dětská výživa, která není na bázi obilovin, ale obsahuje med nebo fruktózu, může také obsahovat akrylamid. A to z toho důvodu, že tyto složky podporují vznik akrylamidu [14].

Vzhledem k tomu, že se u dětí předpokládá vyšší příjem potravy a to až dvakrát či třikrát na kg tělesné hmotnosti než u dospělého člověka, měl by se obsah akrylamidu v těchto potravinách výrazně snížit [4].



## 4 TOXICITA A ZDRAVOTNÍ ÚČINKY AKRYLAMIDU

Tepelné procesy jsou často používány při výrobě potravin pro získání výrobků s prodlouženou trvanlivostí a požadovanou kvalitou. Pečení, opékání, smažení, pražení, sterilizace mají za výsledek žádoucí, ale i nežádoucí účinky v důsledku různých chemických reakcí. Mezi ty nejvýznamnější patří Maillardovy reakce, karamelizace a oxidace lipidů. Jeden z účelů tepelných procesů je zlepšení organoleptických vlastností potravin, jejich chuti, vůně, barvy a textury. Tepelná úprava také ničí enzymy a nežádoucí mikroorganismy, snižuje aktivitu vody potravin, nebo mohou vznikat sloučeniny, které vykazují antioxidační nebo antimikrobiální účinky. Také je známo, že tepelnou úpravou může dojít, ke ztrátám termolabilních sloučenin, jako jsou vitaminy či esenciální aminokyseliny (lysin, tryptofan). Největším problémem vyplývajícím z tepelných procesů je tvorba sloučenin, které se mohou vyvinout v průběhu těchto procesů a mohou vykazovat mutagenní, karcinogenní a cytotoxické účinky. Dobře známými příklady těchto sloučenin jsou heterocyklické aminy, nitrosaminy a polycyklické aromatické uhlovodíky. V poslední době je velký zájem o akrylamid z důvodu výskytu v potravinách a vysokého toxického potenciálu [39].

Akrylamidu je chemická látka používaná v mnoha průmyslových odvětvích na celém světě. V roce 2002 bylo zjištěno, že se tvoří i v potravinách upravovaných za vysokých teplot. Akrylamid, jak bylo prokázáno, vykazuje neurotoxické, toxické a karcinogenní účinky u živočichů. Na základě pokusů Paulsson a spol. prokázali, že akrylamid je v organismu metabolizován na toxičtější epoxid glycidamid, který vyvolává poškození chromosomů a navozuje karcinogenní účinky u hlodavců. Další hypotéza karcinogenity akrylamidu souvisí s hormonální dysregulací. U samců a samic potkanů byly pozorovány nádory tkání, štítné žlázy a mléčné žlázy. U lidí byly zatím pozorovány pouze neurotoxické účinky a to u zaměstnanců v průmyslových oblastech, kteří pracovali s akrylamidem [14].

Lepší porozumění chemii a biologii akrylamidu a jeho dopad na potravinářské matrice může vést k vývoji potravinářských postupů pro snížení obsahu akrylamidu v potravě efektivněji [39].

## 4.1 Vstup akrylamidu do lidského organismu

Akrylamid do lidského těla může vstupovat polknutím, inhalací nebo kožní absorpcí [40].

Vstup akrylamidu do těla nastává inhalací během průmyslové výroby za použití krystalického nebo práškového monomeru při výrobě polyakrylamidu. Povoleno limit výskytu akrylamidu ve vzduchu pro pracoviště je  $0,3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  pro inhalaci monomeru akrylamidu ze vzduchu [40].

Kožní expozice akrylamidu se může vyskytovat hlavně při přípravě polyakrylamidových roztoků a při využití polyakrylamidu ve spárovacích činidlech. Podle USEPA (United States Environmental Protection Agency) je přípustné množství při dermální expozici  $0,61\text{-}5 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$  [40].

Další možností příjmu akrylamidu do těla je orální cesta. Ačkoli expozice člověka akrylamidem je především pracovní, široká veřejnost může být vystavena prostřednictvím konzumace některých potravin a z menší části i z vody. [40].

## 4.2 Zdravotní rizika akrylamidu

Po požití se akrylamid rychle vstřebává a je distribuován u zvířat a lidí po celém těle. Lze ho nalézt v mnoha orgánech, jako je brzlík, játra, srdce, mozek, ledviny, a také v placentě a mateřském mléce, a tak se může dostat z těla matky do plodu [39].

Akrylamid může být oxidován působením cytochromu P450 2E1 na reaktivní epoxid glycidamid (2,3-epoxypropionamid), který je nejspíše zodpovědný za genotoxické účinky akrylamidu. Může také podstupovat konjugaci s glutationem. K metabolické přeměně akrylamidu na glycidamid dochází v menší míře u lidí ve srovnání s hlodavci [39].

Akrylamid a glycidamid se mohou vázat *in vivo* na hemoglobin, sérové albuminy, DNA a enzymy. Glycidamid je podstatně reaktivnější než akrylamid s DNA, čímž se vytváří množství DNA aduktů [39].

Reprodukční a vývojové účinky akrylamidu u zvířat a lidí byly nedávno přezkoumány. Neexistuje žádný důkaz o nepříznivých reprodukčních a vývojových účincích z expozice akrylamidu u lidí. Přestože profesní expozice akrylamidu může být spojena s neurotoxicitou, v současné době není známo, zda dochází také k reprodukční nebo vývojové toxicitě akrylamidem [2].

#### 4.2.1 Karcinogenní účinky akrylamidu

Karcinogenní účinky akrylamidu byly testovány na potkanech a myších. Zvířatům se podávaly dávky akrylamidu v pitné vodě nebo jinými způsoby. Experimenty ukázaly, že akrylamid je multiorgánový karcinogen způsobující nádory mnoha orgánů, jako jsou plíce, děloha, kůže a jiné. Každá tkáň může být z hlediska vzniku nádorů cílová, protože je akrylamid hydrofilní povahy a je schopen pronikat do celého organismu. V tabulce (Tab. 6) je znázorněn počet potkanů s diagnostikovaným nádorem po expozici akrylamidem v orálních dávkách pitné vody. Z tabulky vyplývá, že akrylamid způsobil u hlodavců zvláště nádor hypofýzy u samic, přičemž zvýšením dávky akrylamidu se příliš nezměnila úmrtnost zkoumaných živočichů [14].

Tab. 6. Množství potkanů s diagnostikovaným nádorem po expozici akrylamidem v orální dávce pitné vody [14]

Typ nádoru	Pohlaví	Dávka AA (tělesné hmotnosti.den <sup>-1</sup> )[mg.kg <sup>-1</sup> ]				
		0	0,01	0,1	0,5	2,0
		Množství potkanů s diagnostickým nádorem [%]				
Nádor varlat	M	0,05	0,00	0,12	0,18	0,17
Nádor nadledvin	M	0,05	0,12	0,12	0,08	0,17
Nádor prsu	F	0,17	0,18	0,15	0,33	0,38
Nádor CNS	F	0,02	0,03	0,02	0,02	0,15
Nádor dělohy	F	0,02	0,03	0,02	0,00	0,08
Nádor hypofýzy	F	0,42	0,50	0,53	0,45	0,53

F – samice, M – samci

Také se prokázalo, že akrylamid je v organismu metabolizován na toxičtější epoxid glycidamid vyvolávající poškození chromozomů a karcinogenní účinky u hlodavců. Glycidamid může také vznikat oxidací akrylamidu hydroperoxydy mastných kyselin. Nepatrné množství bylo nalezeno v některých smažených bramborových výrobcích [14].

Od roku 1994 je akrylamid zařazen mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC) jako pravděpodobný lidský karcinogen. U jedinců vystavených profesně akrylamidu, nedošlo k výskytu rakoviny [2].

Velké množství epidemiologických studií zkoumalo možné souvislosti mezi příjmem potravin obsahujících akrylamid a výskytem několika druhů rakoviny u lidí. Většinou z těchto studií se nepodařilo prokázat vztah mezi vznikem rakoviny a akrylamidem obsaženým v potravinách [2].

#### 4.2.2 Neurotoxické účinky akrylamidu

Mnohé experimenty prováděné na živočišných druzích ukázaly, že nervový systém je hlavním místem toxického působení akrylamidu. Opakované a dostatečné vystavení organismu účinkům akrylamidu způsobuje degenerativní změny periferních nervů. Několik výzkumů na zvířatech prokázalo degeneraci nervových zakončení v mozkových oblastech jako je mozková kůra, talamus a hypotalamus. Tyto oblasti jsou velice důležité pro učení, paměť a další kognitivní funkce [2].

Při studiích zaměřených na člověka bylo zjištěno, že zaměstnanci v průmyslových oblastech vystavení působení akrylamidu vykazovali neurologické potíže, jako je třes rukou, snížená citlivost a mravenčení končetin, nespavost, nechutenství, slabost svalů a zhoršenou koordinaci. U skupiny pracovníků manipulujících s tekutým akrylamidem byly pozorovány potíže s extrémním pocením rukou, zarudnutím a ztvrdnutím kůže [2].

#### 4.2.3 Reprodukční toxicita akrylamidu

Na prokázání účinků akrylamidu na reprodukci člověka neexistují žádná ověřená data. Výzkumy zabývající se reprodukční toxicitou uvádí, že akrylamid má vliv na počet a morfologii spermií u samců, kdežto u samic se vliv akrylamidu projevil na snížení porodnosti a snížení tělesné hmotnosti mláďat [41].

Dalším možným důvodem ovlivnění reprodukce je působení akrylamidu na funkci bílkoviny kinesin. Jedná se o bílkovinu nacházející se jak v nervové tkáni, tak v dalších tkáních, včetně bičíku spermií. Degradace kinesinu snižuje pohyb spermií [2].

Molekulární mechanismy reprodukční toxicity by mohly být spojeny s chromozomálním poškozením, alkylací SH-skupiny, snížením GSH nebo poškozením DNA [41].

## 5 METODY STANOVENÍ AKRYLAMIDU

Poté, co Švédský národní výbor pro potraviny a vědci ze Stockholmské univerzity v roce 2002 objevili přítomnost akrylamidu v tepelně zpracovaných potravinách, byly navrženy rozličné metody, které by umožnily stanovení hladin akrylamidu v potravinách. Komplikace při stanovování jsou způsobeny především, kvůli jeho nízké molekulové hmotnosti, vysoké polaritě, dobré rozpustnosti ve vodě, vysoké reaktivitě a také malé těkavosti. Obsah akrylamidu často bývá v analyzovaných vzorcích velmi nízký a navíc složité matrice mohou obsahovat látky rušící jeho stanovení [5].

Používané metody využívají různých způsobů přečištění a zakoncentrování analytu v závislosti na typu matrice analyzovaného vzorku. Mezi nejčastější používané metody patří plynová a kapalinová chromatografie. Tyto dvě metody jsou vhodné pro stanovení obsahu akrylamidu v biologických tekutinách, vodách a tepelně neopracovaných potravinách, jako jsou například brambory, kukuřice, cukrová řepa atd. [5].

V případě plynové chromatografie je velice často analýza akrylamidu doplněna o derivatizaci. Možná je také analýza bez derivatizace analytu, avšak není tak účinná, z důvodu nedostatku iontových píků v hmotnostním spektru akrylamidu [5].

Pro stanovení akrylamidu je možné použít i jiné metody, například kapilární elektroforézu avšak kapalinová a plynová chromatografie se zdají být při stanovování akrylamidu směrodatnými a nejužitečnějšími [1].

### 5.1 Kapalinová chromatografie

Kapalinová chromatografie je jednou z chromatografických metod, kde je mobilní fází kapalina. Na rozdíl od chromatografie plynové rozhodují o separaci složek zkoumaného vzorku nejen jejich interakce se stacionární fází, ale velmi výrazně i použitá mobilní fáze. Během separace dochází k tomu, že se analyt rozděluje mezi mobilní a stacionární fází na základě různé rozpustnosti, iontové výměny a biospecifické interakce (molekulové rozpoznávání) [42].

Nejčastěji se stanovuje koncentrace akrylamidu kapalinovou chromatografií (LC) ve spojení s tandemovou hmotnostní spektrometrií. Hmotnostní spektrometry se často používají při identifikaci sloučenin. Je zvláště užitečná, jsou-li stopová množství látek, která mají být

testována, obsažena ve složitých maticích. Kapalinová chromatografie ve spojení s tandemovou hmotnostní spektrometrií (HPLC/MS), je zvláště vhodná pro analýzu polárních sloučenin, jako je akrylamid, které nejsou dostatečně těkavé. HPLC/MS umožňuje vynechání časově náročné derivatizace, které je nutné pro plynovou chromatografii ve spojení s hmotnostní spektrometrií (GC/MS). Proto je příprava vzorku jednodušší a také kratší. Tandemové spojení hmotnostních spektrometrů umožňuje separovat vybrané ionty od ostatních. Z takto vybraných iontů vznikají následně ionty dceřiné, které jsou analyzovány. Nejnižší hladiny akrylamidu, které je možné touto metodou detekovat jsou v rozmezí 20–50  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  [1].

## 5.2 Plynová chromatografie

Plynová chromatografie patří mezi metody, kde je mobilní fází nosný plyn. Aby mohl být vzorek transportován, musí se ihned přeměnit na plyn. V koloně se pak složky separují na základě různé schopnosti poutat se na stacionární fázi. Složky, které opouštějí kolonu, indikuje detektor. Signál z detektoru se následně vyhodnocuje a z časového průběhu intenzity signálu se určí druh a kvantitativní zastoupení složek [43].

Kvantitativní stanovení akrylamidu obsaženého v potravinách bylo také prováděno pomocí plynové chromatografie ve spojení s hmotnostní spektrometrií (GC/MS), ať již za použití derivatizace nebo bez ní. Aplikace chromatografických technik v kombinaci s hmotnostní spektrometrií (MS) umožňuje provést současně jak separaci analytu z matrice, tak také jeho kvantitativní stanovení. Aby se dosáhlo vyšší selektivity a nižších detekčních limitů, využívá se derivatizace analyzované látky. V případě akrylamidu, se velice často používá pro derivatizaci bromoční směs skládající se z bromičnanu draselného a bromidu draselného. Přestože je proces derivatizace pracnější a časově náročnější, je vše ve výsledku vykompenzováno snížením limitu detekce a také se zlepšuje přesnost stanovení [1].

S plynovou chromatografií (GC) se pro kvantifikaci akrylamidu používá také velice často plamenově-ionizační detektor (FID), popřípadě detektor elektronového záchytu (ECD). Oba tyto detektory jsou v kombinaci s předcházející bromací analytu vysoce citlivé a selektivní. Za další, poměrně novou a do budoucna perspektivní metodou při kvantifikaci akrylamidu je spojení plynové chromatografie s detektorem citlivým na atomy dusíku a fosforu (NPD). Výhody této techniky zahrnují jednoduchou přípravu vzorku, relativně krátkou dobu celé analýzy, ale dostatečně vysokou přesnost [1].

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce je poskytnout přehled o akrylamidu, jeho vzniku a výskytu v potravinách, toxicitě této sloučeniny a eliminaci v potravinách a také možných metodách jeho stanovení.

Akrylamid v potravinách vzniká v průběhu jejich tepelné úpravy různými mechanismy, které zahrnují reakce aminokyselin, sacharidů, lipidů a pravděpodobně i dalších složek potravin. Především však vzniká reakcí asparaginu s redukujícími cukry a to jako součást Maillardových reakcí. Akrylamid vzniká převážně v potravinách bohatých na sacharidy. Jako rizikové potraviny se především ukázaly smažené hranolky a brambory, dále chléb, pečivo (perníky, sušenky) a káva. V menší míře se pak může vyskytovat také v sušeném ovoci, olivách (hlavně černých), pražených mandlích a dětské výživě.

Výsledný obsah akrylamidu v potravinách je možné ovlivnit na jednotlivých úrovních technologického zpracování, například snížením prekurzorů v tepelně upravovaných potravinách, úpravou receptury, úpravou podmínek při zpracování výrobků. Při těchto krocích je však nutné dbát na zachování sensorických a kvalitativních vlastností výrobku, což není zrovna nejjednodušší.

Akrylamid je na základě provedených studií zařazen do skupiny jako potenciálních lidských karcinogenů. Jak bylo prokázáno, vykazuje neurotoxické, toxické, reprodukčně toxické a karcinogenní účinky u živočichů, u kterých může být v organismu metabolizován na toxicitější glycidamid, který vyvolá poškození chromozomů a tím může navodit karcinogenní účinky. U lidí byly zatím dokázány jen neurotoxické účinky a to u zaměstnanců, kteří pracovali s průmyslovým akrylamidem.

I přes to, že se zatím neprokázaly karcinogenní účinky akrylamidu, existuje doporučení omezit potraviny s předpokládaným výskytem akrylamidu a volit co nejšetrnější úpravu pokrmů. Akrylamid byl totiž zařazen mezi potravní kontaminanty teprve nedávno a ještě nebylo provedeno dostatečné množství studií, které by zodpověděly všechny otázky týkající se jeho působení na zdraví.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ORACZ, J., E. NEBESNY and D. ŻYŻELEWICZ. New trends in quantification of acrylamide in food products. *Talanta*. 2011, 86, 23-34.
- [2] LINEBACK, D. R., J. R. COUGHLIN and R. H. STADLER. Acrylamide in Foods: A Review of the Science and Future Considerations. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2012, 3, 15-35.
- [3] KUKUROVÁ, K., L. MARKOVÁ, A. BEDNÁRIKOVÁ a Z. CIESAROVÁ. Nástroje znižovania akrylamidu v cereálných výrobkoch. *Potravinárstvo*. 2010, 4, 317-321.
- [4] VELÍŠEK, J. a J. HAJŠLOVÁ. *Chemie potravin II*. Tábor: OSSIS, 2009. ISBN 978-80-86659-16-9.
- [5] PAPOUŠEK, R., P. NOVÁKOVÁ, E. MARKOVÁ a P. BARTÁK. Analýza akrylamidu metódou GC-MC. *Chem. Listy*. 2013, 107, 255-260.
- [6] KARIMI, G. and M. RASHEDINIA. Acrylamide. *Reference Module in Biomedical Sciences. Encyclopedia of Toxicology*. Elsevier. 3rd ed. 2014. 69–73. ISBN: 978-0-12-801238-3
- [7] U.S. Department of Health and Human Services. *Sixth Annual Report on Carcinogens*. Diane Publishing. 1991. ISBN 9780788104237.
- [8] LINGNERT, H., S. GRIVAS et al. Acrylamide in food: mechanisms of formation and influencing factors during heating of foods. *Taylor & Francis*. 2002, 46, 159-172.
- [9] *Acrylamide Crystal* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné: <http://www.ecvv.com/product/2507517.html>
- [10] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *IARC monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. France: IARC Lyon, 1994, 60. ISBN 92-832-1260-6.
- [11] CIESAROVÁ, Z. Minimalizácia obsahu akrylamidu v potravinách. *Chem. Listy*. 2005, 99, 483-491.
- [12] ESKIN, N.A.M., H. CHI-TAO and F. SHAHIDY. *Biochemistry of Foods*. 3rd ed. Waltham: Academic Press, 2013. ISBN 978-0-12-242352-9.



- [13] ZHANG, Y., Y. ZHANG. Formation and reduction of acrylamide in Maillard reaction: a review based on the current state of knowledge. *Critical Review Food Science Nutrition*. 2007,47,5,521-542.
- [14] CWIKOVÁ, O. Toxické účinky akrylamidu a jeho výskyt v potravinách. *Chem. Listy*. 2014, 108, 205-210.
- [15] LAWLEY, R., L. CURTIS and J. DAVIS. *The Food Safety Hazard Guidebook*. 2nd ed. London: Royal Society of Chemistry, 2012. ISBN 978-1-84973-381-6.
- [16] YASUHARA, A., Y. TAKANA, M. HENGEL and T. SHIBAMOTO. Gas Chromatographic Investigation of Acrylamide Formation in Browning Model Systems. *J. Agric. Food Chem.* 2003, 51, 3999-4003.
- [17] FRIEDMAN, M. Chemistry, Biochemistry, and Safety of Acrylamide. A Review. *J. Agric. Food Chem.* 2003, 51, 4504-4526.
- [18] MATTHÄUS, B. and N.U. HAASE. Acrylamide – Still a matter of concern for fried potato food?. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2014, 116, 675-687.
- [19] Doporučení Komise 2013/647/EU o monitorování množství akrylamidu v potravinách. *Úřední věstník*. 2013, L 301, 15.
- [20] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 38/2001 Sb. o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmy. *Sbírka zákonů č. 38*. 2001, částka 13, 672.
- [21] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 376/2000 Sb. kterou se stanoví požadavky na pitnou vodu a rozsah a četnost její kontroly. *Sbírka zákonů č. 376*. 2000, částka 103, 4879.
- [22] Nařízení Komise (EU) č. 366/2001 kterým se mění nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení povolování a omezování chemických látek (REACH), pokud jde o přílohu XVII (akrylamid). *Úřední věstník*. 2001, L 101, 12.
- [23] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 26/2001 Sb. o hygienických požadavcích na kosmetické prostředky, o náležitostech žádosti o neuvedení ingredience na obalu kosmetického prostředku a požadavcích na vzdělání a praxi fyzické osoby odpovědné za výrobu kosmetického prostředku. *Sbírka zákonů č. 369*, 2001, částka 118, 5770.

- [24] MARKOVÁ, L., K. KUKUROVÁ, Z. CIESAROVÁ a P. ŠIMKO. Expozice akrylamidem z potravin v SR a ČR. *Potravinářstvo*. 2010, 4, 322-329.
- [25] The CIAA. Acrylamide „Toolbox“. *Confederation of the food and drink industries of the EU*. 2011, 1-47.
- [26] SKOG, K. and J. ALEXANDER. *Acrylamide and Other Hazardous Compounds in Heat-Treated Foods*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. ISBN 978-1-84569-201-8.
- [27] OŠŤÁDALOVÁ, M. a J. POKORNÁ. *Hygiena a technologie brambor, škrobu, luštěnin, olejnatých semen a tuku*. Brno: Veterinární a farmaceutická univerzita Brno, 2014. ISBN 978-80-7305-710-7.
- [28] BETHKE, P.C. and A.J. BUSSAN. Acrylamide in Processed Potato Products. *Am. J. Potato Res.* 2013, 90, 403-424.
- [29] *French Fries* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné: <http://www.thehungrymouse.com/2009/07/01/super-simple-french-fries-crisp-crunchy-in-only-one-step/>
- [30] [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné: <https://www.fac-fcc.ca/en/ag-knowledge/technology-and-innovation/premium-markets-require-a-major-commitment.html>
- [31] *Potato chips* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné: <http://communitytable.com/58832/linzlowe/would-you-try-these-wacky-potato-chip-flavors/>
- [32] STANDLER, R.H., G. SCHOLZ. Acrylamide: Update on Current Knowledge in Analysis, Levels in Food, Mechanism of Formation, and Potential Strategie of Kontrol. *Nutrition reviews*. 2004, 62,12, 449–467.
- [33] FORSOVÁ, V., B. BELKOVÁ et al. Acrylamide formation in traditional Czech leaved wheat-rye breads and wheat rolls. *Food Control*. 2014, 38, 221-226.
- [34] AMREIN, T.M., L. ANDRES, F. ESCHER and R. AMADO. Occurrence of acrylamide in selected foods and mitigation options. *Food Additives and Contaminants*. 2007, 24, 13-25.
- [35] *Coffee Production* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné: <https://www.agranet.net/agra/international-coffee-report/features/first-estimate-of-world-coffee-production-201415-454788.htm>

- [36] *Mandle pražené*. [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné:  
<http://www.suche-plody.cz/orechy>
- [37] *Just Bio Weichspeckbirnen*. [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné:  
<http://www.teefischer.ch/details/de/t0/104856>
- [38] MOJSKA, H. et al. Determination of acrylamide level in commercial baby fous and an assesment of infant dietary exposure. *Food and Chemical Toxicology*. 2012, 50, 2722-2728.
- [39] CAPUANO, E. and V. FOGLIANO. Acrylamide and 5-hydroxymelhylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies. *Food Science and Technology*. 2011, 44, 793-810.
- [40] DEARFIELD, K.L., G.R. DOUGLAS et al. Acrylamide: a review of its genotoxicity and an assesment of heritable genetic risk. *Elsevier*. 1995, 330, 71-99.
- [41] XU, I., B. CUI et al. Risk assessment, formation, and mitigation of dietary acrylamide: Current status and future prospects. *Food and Chemical Toxicology*. 2014, 69, 1–12.
- [42] ŠTULÍK, K. *Analytické separační metody*. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0852-2.
- [43] KLOUDA, P. *Moderní analytické metody*. Ostrava: Pavel Klouda, 2003. ISBN 80-86369-07-2.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AA	Akrylamid
CIAA	Confederation of the EU Food and Drink Industries
C-N	Vazba mezi atomem uhlíku a atomem dusíku
CNS	Centrální nervová soustava
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
ECD	Detektor elektronového záchytu
EFSA	European Food Safety Authority
EU	Evropská unie
FID	Plamenově-ionizační detektor
GC	Plynová chromatografie
GC/MS	Plynová chromatografie spojená s hmotnostním spektrometrem
GMO	Geneticky modifikované organismy
GSH	Glutathion
HPLC/MS	Vysokoúčinná kapalinová chromatografie s tandemovou hmotnostní spektrometrií
IARC	International Agency for Research on Cancer
LC	Kapalinová chromatografie
Max	Maximální hodnota
Min	Minimální hodnota
MS	Hmotnostní spektrometrie
NPD	Detektor citlivý na atomy dusíku a fosforu
P450E1	Cytochrom
SH-skupina	Thiolová skupina
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organization

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Akrylamid .....	11
Obr. 2. Krystalická forma akrylamidu .....	11
Obr. 3. Možné reakce vzniku akrylamidu .....	14
Obr. 4. Vznik akrylamidu v Maillardových reakcích .....	16
Obr. 5. Vznik akrylamidu z lipidů .....	17
Obr. 6. Procentní zastoupení jednotlivých potravin u mužů a žen .....	24
Obr. 7. Rozdíly v zastoupení potravin v denním příjmu akrylamidu.....	25
Obr. 8. Procentuální zastoupení potravin podílejících se na denním příjmu AA .....	25
Obr. 9. Výrobky z brambor – hranolky .....	29
Obr. 10. Bramborové lupínky .....	30
Obr. 11. Výsledky z pečení perníku, kde byl $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ .....	33
Obr. 12. Vliv kyseliny citrónové a vinné na koncentraci AA .....	34
Obr. 13. Stupně pražení kávy .....	36
Obr. 14. Pražené mandle .....	37
Obr. 15. Vliv teploty na obsah akrylamidu .....	37
Obr. 16. Sušené hrušky .....	39

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Přehled fyzikálně-chemických .....	12
Tab. 2. Rozpustnost akrylamidu .....	12
Tab. 3. Potraviny s nejčastějším výskytem akrylamidu a jeho obsah .....	20
Tab. 4. Směrné hodnoty akrylamidu na základě údajů EFSA z let 2007–2012 .....	22
Tab. 5. Denní příjem dotazovaných potravin .....	23
Tab. 6. Množství potkanů s diagnostikovaným nádorem po expozici akrylamidem v orální dávce pitné vody .....	43