

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra chemie**



**Akrylamid v potravinách  
Bakalářská práce**

**Autor práce: Lucie Bašniarová**

**Obor studia: Výživa a potraviny**

**Vedoucí práce: Ing. Zora Kotíková, Ph.D.**

© 2020 ČZU v Praze

### **Čestné prohlášení**

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

V Praze dne 13.7.2020

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Zoře Kotíkové, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce. Děkuji za trpělivost, rady, ochotu a věnovaný čas.

# Akrylamid v potravinách

## Souhrn

Akrylamid je významným procesním kontaminantem, který vzniká při tepelné úpravě potravin nad 120 °C. Vyskytuje se ve velké škále potravin. Nejvíce ho je obsaženo v potravinách, které obsahují vysoké množství sacharidů (např. bramborové a cereální výrobky). Vzniká reakcí karbonylové skupiny redukujícího sacharidu s aminovou skupinou nejčastěji aminokyseliny asparaginu. Klíčovou reakcí pro tvorbu akrylamidu je Maillardova reakce, což je jedna z nejvýznamnějších reakcí v potravinářství. Při přehřívání olejů (např. při výrobě hranolek) může akrylamid vznikat také tzv. lipidovou oxidací. Další možnou cestou je vznik přes 3-aminopropanamid (3-APA).

V 90. letech minulého století byl akrylamid označen za možný karcinogen. Výzkumy ukázaly také jeho genotoxické, teratogenní a neurogenní účinky. Většina výzkumů je ale prováděna na zvířatech a má se za to, že tyto účinky nemohou člověka postihnout, přijímá-li akrylamid pouze stravou. Dalšími možnostmi, jak může lidské tělo přijmout akrylamid, je kouřením, nebo vdechováním výparů při pohybu na stavbách, kde se pracuje s průmyslově velmi využívaným polyakrylamidem, který je netoxický, z něhož se ale může uvolňovat toxický akrylamid a působit negativně na kůži a nervovou soustavu.

Jelikož je akrylamid označen za možný karcinogen, jsou stanoveny maximální hodnoty akrylamidu pro jednotlivé kategorie potravin a je celosvětově hlídáno jejich dodržování. Probíhají proto rozsáhlé výzkumy, jak neúčinněji zredukovat obsah akrylamidu v konkrétních potravinách. Způsoby inhibice se liší v závislosti na technologii výroby potravin a limitujícím prekurzoru. U cereálních výrobků se nejčastěji uplatňuje použití pekařského droždí, u brambor zase blanšírování v roztocích kyselin. Velmi diskutovaným tématem je vliv antioxidantů, zejména polyfenolů, na inhibici akrylamidu. Data z posledních let ukazují, že potraviny z velké části obsahují výrazně nižší koncentrace akrylamidu, než jsou dané limity.

**Klíčová slova:** akrylamid, Maillardova reakce, redukující sacharidy, L-asparagin, zdravotní rizika, cereální výrobky

# Acrylamide in food

## Summary

Acrylamide is a very important processed food contaminant. It is created in food after heating above 120 °C. It appears in a big range of food. The highest amount is found in carb-rich food (for example potato and cereal food). Acrylamide is formed by reaction of reducing sugar with amine compound (especially asparagin). A key reaction is called Maillard reaction. It is one of the most important reactions in a food industry. Lipid oxidation and reaction through 3-aminopropanamide (3-APA) are other important ways how acrylamide can be present in food.

Acrylamide was found to be a possible carcinogen in 1990<sup>1</sup>. Various studies have shown its genotoxicity and neurogenotoxicity. Majority of studies on acrylamide health risks are made with animals. It is a problem because we cannot see the real effects on a human body. Nevertheless it is said that most of people are not in a health risk of acrylamide when they consume only in food. Acrylamide can be received into human body also by smoking or inhaling contaminated air while building tunnels. There is a widely used polyacrylamide in a construction industry. Polyacrylamide is not a toxic one, on the other hand it can leak a toxic acrylamide. Acrylamide is very aggressive on people skin and nervous system.

There were set limits for amount of acrylamide in food because of its toxicity. There is a various number of researches on mitigation of acrylamide in food. The way of inhibition of acrylamide depends on a production technology of product and limiting precursor. A use of yeast is applied in cereal products while blanching in acids is widely used in making potato products. A very debated technique of mitigation is adding an antioxidant (for example polyphenols). On a data from the past few years is shown that food high on acrylamide meet the limits.

**Keywords:** acrylamide, Maillard reaction, reducing sugars, L-asparagine, health concerns, cereal food

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Akrylamid v potravinách</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Základní chemické vlastnosti akrylamidu</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Historie/současné poznání o akrylamidu</b>	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Limity pro obsah akrylamidu</b>	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Vznik akrylamidu</b>	<b>12</b>
3.4.1	Podmínky vzniku	13
3.4.2	Maillardova reakce	13
3.4.2.1	Látky účastnící se Maillardovy reakce	14
3.4.2.2	Fáze Maillardovy reakce	14
3.4.2.3	Vznik akrylamidu v Maillardově reakci	16
3.4.2.4	Vliv Maillardovy reakce na senzoričké vlastnosti potravin	18
3.4.2.5	Inhibice Maillardovy reakce	18
3.4.3	Lipidová oxidace – vznik z akroleinu	19
3.4.4	Další cesty vzniku	19
<b>3.5</b>	<b>Redukce vzniku akrylamidu</b>	<b>20</b>
3.5.1	Přidání enzymu, droždí nebo jiných mikroorganismů	20
3.5.2	Přidání dalších kyselin a aminokyselin	21
3.5.3	Přidání kationtů anorganických solí	21
3.5.4	Přidání antioxidantů	22
<b>3.6</b>	<b>Výskyt akrylamidu v potravinách</b>	<b>23</b>
3.6.1	Brambory a bramborové výrobky	23
3.6.1.1	Hranolky	24
3.6.1.2	Redukce akrylamidu v bramborových výrobcích	25
3.6.2	Káva	26
3.6.3	Cereální výrobky	27
3.6.3.1	Formace akrylamidu ve chlebu	28
3.6.3.2	Redukce akrylamidu v cereálních výrobcích	29
3.6.4	Panela	31
3.6.5	Olivy	31
3.6.5.1	Černé olivy kalifornského stylu (California-style black ripe olive CBRO)	32
3.6.6	Sušené ovoce	33
<b>3.7</b>	<b>Zdravotní rizika vznikající konzumací akrylamidu</b>	<b>34</b>
3.7.1	Příjem a metabolismus akrylamidu	34

3.7.2	Karcinogenita.....	35
3.7.3	Mutagenita .....	36
3.7.4	Neurotoxicita .....	36
3.7.5	Vliv na plodnost.....	37
3.7.6	Prevence.....	37
<b>4</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>39</b>

# 1 Úvod

Během tepelného zpracování potravin dochází k potravinářsky významné Maillardově reakci, při níž vznikají nežádoucí látky. Jednou z nich je i toxický akrylamid. Akrylamid je jedním z nejběžnějších potravinářských kontaminantů (Semla et al. 2016). Vyskytuje se ve velkém množství potravin. Nejvyšší hodnoty obsahují tepelně upravené potraviny s vysokým obsahem sacharidů. Mezi nejvýznamnější patří bramborové a cereální výrobky. Vyskytuje se ale také např. v kávě, sušených ovocných plodech, olivách a čaji (Amrein et al. 2007; Keramat et al. 2011; Montaño et al. 2016; Mesías & Morales 2016).

Již v 90. letech minulého století byl akrylamid zařazen do třídy 2A – „probable human carcinogen“ (Matthäus & Haase 2016). Jeho vliv na lidské zdraví je tak vnímán negativně, a proto potravinářské instituce začaly po celém světě hlídat obsah akrylamidu v potravinách, přičemž Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) vydal maximální povolené limity pro jednotlivé kategorie potravin.

Z těchto důvodů probíhají velmi rozsáhlé výzkumy, které mají za cíl snížit obsah akrylamidu v potravinách na maximální možné minimum. Je zkoumán vliv technologických faktorů a aditiv, jako jsou např. kyseliny a enzymy. Velmi aktuálním tématem je redukce akrylamidu díky přidavku antioxidantů (Liu et al. 2015).



## **2 Cíl práce**

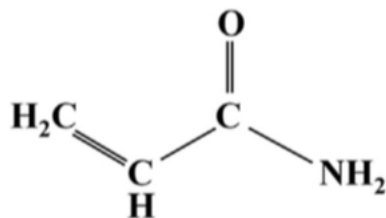
Cílem bakalářské práce je zpracovat literární rešerši zaměřenou na vznik akrylamidu v tepelně zpracovaných potravinách. Popsat mechanismus vzniku akrylamidu, výskyt v potravinách, zdravotní rizika spojená s jeho konzumací a možné metody jeho eliminace.

### 3 Akrylamid v potravinách

Akrylamid je jedním z nejběžnějších potravních toxinů (Semla et al. 2017). Je považován za jeden z procesních kontaminantů potravin. Procesní kontaminant můžeme definovat jako látku vznikající v potravině během jejího zpracování (např. při tepelné úpravě), která má negativní vliv na její kvalitu a může způsobovat škodlivé následky na zdraví konzumenta (Curtis et al. 2014). Akrylamid jako procesní kontaminant vzniká během tepelné úpravy zejména v potravinách s vysokým obsahem sacharidů (Keramat et al. 2011). Během zpracování potravin vznikají také další pro člověka toxické látky jako např. furan nebo polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs) (Sirot et al. 2019).

#### 3.1 Základní chemické vlastnosti akrylamidu

Akrylamid nebo také prop-2-en-1-amid ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{NH}_2$ ), jehož strukturní vzorec je znázorněn na obrázku 1, je bezbarvá až bílá, pevná, krystalická látka bez zápachu (Keramat et al. 2011; Riboldi et al. 2014; Jing et al. 2019). Má nízkou molekulární hmotnost (71,08 g/mol). Bod tání je  $84,5 \pm 3$  °C a bod varu 136 °C. Tlak vypařování je 0,007 mmHg ( $\approx 0,933254$  Pa) při teplotě 25 °C (Keramat et al. 2011). Je to biodegradabilní látka dobře rozpustná ve vodě, acetonu a etanolu. Díky tomu je velmi mobilní v půdě a podzemních vodách (Riboldi et al. 2014). Jeho vysoká reaktivita je vysvětlována dvojnou vazbou a amidovou skupinou. Akrylamid může tvořit vazby s vodíkem a reagovat tak s amidy a vinylovými skupinami. Vlivem vysokých teplot a UV záření může polymerovat a vytvářet tak polyakrylamid (Semla et al. 2017), což je významná látka pro chemický průmysl. Je používán při úpravě odpadních vod, gelové elektroforéze, výrobě papíru nebo také během zpracování textilu (Curtis et al. 2014; Semla et al. 2017).



Obrázek 1: Strukturní vzorec akrylamidu (Curtis et al. 2013)

#### 3.2 Historie/současné poznání o akrylamidu

Již v roce 1990 bylo zjištěno, že lidé jsou vystavováni akrylamidu (Bethke & Bussan 2013). Údaje z roku 2008 zaznamenaly denní příjem 0,3-0,6  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$  pro dospělé osoby a 0,5-0,6  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$  ve stravě dětí a adolescentů (Claus et al. 2008). V roce 2015 byly provedeny odhady na konzumaci akrylamidu v lidské stravě, hodnoty se dle dat pohybovaly v rozmezí 0,4-1,9  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{den}$  skrze všechny věkové kategorie (Halford 2019).

V roce 1991 byl akrylamid zařazen do skupiny „genotoxic carcinogens“ ze strany SCF (European Scientific Committee on Food). V roce 1994 se přidala IARC (International Agency for Research on Cancer) a akrylamid byl těmito institucemi zařazen do třídy 2A – „probable human carcinogen“. V roce 2000 publikoval Tareke výzkum, ze kterého vyplynulo, že hlavním zdrojem akrylamidu v lidské výživě je tepelné zpracování potravin. Bylo zjištěno, že potraviny

s vyšším obsahem bílkovin obsahují 5-50 µg akrylamidu/kg a potraviny bohaté na sacharidy 150-4000 µg akrylamidu/kg. V dubnu 2002 přinesla NFA (Swedish National Food Administration) ve spolupráci s University of Stockholm objev, že je akrylamid přítomný v pečených, smažených a fritovaných potravinách. Bylo zjištěno, že v syrových potravinách se objevují pouze prekurzory akrylamidu a samotná látka vzniká až při tepelných úpravách, kdy dochází zároveň ke snižování kvality potraviny. NFA a University of Stockholm začaly hledat metody, jak redukovat vznik akrylamidu v tepelně upravených potravinách a zároveň zachovat kvalitu potraviny. V červnu roku 2015 EFSA (European Food Safety Authority) potvrdila, že při konzumaci akrylamidu vzniká riziko rakoviny bez ohledu na věk konzumenta. V současné době je stále předmětem výzkumu, jaké hodnoty přijatého akrylamidu jsou pro člověka toxické (Tripathi et al. 2015; Matthäus & Haase 2016).

### 3.3 Limity pro obsah akrylamidu

Jelikož přítomnost akrylamidu v živém organismu vykazuje karcinogenní, neurotoxické a mutagenní účinky, byla stanovena NOAEL (no-observed-adverse-effect level), tzn. dávka, při které ještě nebyl pozorován škodlivý účinek, na 0,5 mg/kg/den. Této dávky nemůže být dosaženo příjmem akrylamidu pouze stravou (Claus et al. 2008; Matoso et al. 2019). Nicméně někteří vědci varují před kumulativní schopností akrylamidu, která by mohla způsobit neurotické účinky při chronickém vystavení. Tato kumulace akrylamidu v lidském těle může být způsobena navázáním akrylamidu na proteiny, čímž zůstane v těle dlouhou dobu (Erkekoglu & Baydar 2014).

Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) zařadil akrylamid mezi látky potenciálně nebezpečné pro lidské zdraví z již zmíněných negativních dopadů na lidský organismus. V některých sušenkách a oplatkách dosahovaly hodnoty akrylamidu až 3200 µg/kg (Jing et al. 2019). V posledních letech se EFSA zaměřila na redukcii obsahu akrylamidu v potravinách bohatých na tuto rizikovou látku. Jako následek byly v roce 2011, 2013 a 2017 publikovány normy Evropskou Komisí, které stanovují maximální povolené hodnoty akrylamidu v jednotlivých výrobcích (viz tabulka 1) (Mesías et al. 2019). V normách jsou zahrnuty nejen cereální výrobky, ale také brambory nebo káva a její náhražky.

Tabulka 1: Nařízení Komise (EU) 2017/2158. Porovnávací hodnoty pro přítomnost akrylamidu v potravinách podle čl. 1 odst. 1

Potravina	Porovnávací hodnota (µg/kg)
Hranolky (k přímé spotřebě)	500
Bramborové lupínky z čerstvých brambor a z bramborového těsta	750
Bramborové krekry	750
Jiné bramborové výrobky z bramborového těsta	750
Měkký chléb	
- pšeničný chléb	50
- Měkký chléb, jiný než pšeničný chléb	100

Snídaňové cereálie (kromě obilné kaše)	
- Výrobky z otrub a celozrnné cereálie, zrna pufovaná v pufovacím dělu	300
- Pšeničné a žitné výrobky <sup>(1)</sup>	300
- Výrobky z kukuřice, ovsa, pšenice špaldy, ječmene a rýže <sup>(1)</sup>	150
Sušenky a oplatky	350
Krekry s výjimkou bramborových krekrů	400
Křupavý chléb	350
Perník	800
Výrobky podobné ostatním výrobkům této kategorie	300
Pražená káva	400
Instantní (rozpustná) káva	850
Náhražky kávy	
a) Náhražky kávy výhradně z obilovin	500
b) Náhražky kávy ze směsi obilovin a čekanky	<sup>(2)</sup>
c) Náhražky kávy výhradně z čekanky	4000
Potraviny pro malé děti, obilné příkrmy pro kojence a malé děti, kromě sušenek a sucharů <sup>(3)</sup>	40
Sušenky a suchary pro kojence a malé děti <sup>(3)</sup>	150
<sup>(1)</sup> Jiné než celozrnné cereálie a/nebo jiné než otrubové cereálie. Obilovina přítomná v největším množství určuje kategorii	
<sup>(2)</sup> Porovnávací hodnota, která se použije na náhražky kávy ze směsi obilovin a čekanky, zohledňuje relativní podíl těchto složek v konečném výrobku	
<sup>(3)</sup> Podle definice v nařízení (EU) č. 609/2013	

### 3.4 Vznik akrylamidu

Cest, které vedou ke vzniku akrylamidu, je hned několik. Nejvýznamnější vznik se připisuje reakci asparaginu s redukcujícím sacharidem, což vede k Maillardově reakci. Akrylamid může vznikat také reakcí kyseliny pyrohroznové s hydroxyacetonem, nebo z pentos a celulosy spolu s asparaginem (Gökmen 2015). Mezi další cesty, při kterých vzniká akrylamid, patří např. vznik přes 3-aminopropanamid (3-APA) nebo akrolein. Mimo redukcujících sacharidů může asparagin reagovat také s karbonylovou skupinou  $\alpha$ -dikarbonylových sloučenin, n-aldehydů, 2-oxokyselin (Gökmen 2015), 2-oxodeoxyglukosy, butan-2,3-dionu, oktalanu a dekanalu (Liu et al. 2015), 2-oxoaldehydů nebo aldehydů (Granvogl & Schieberle 2007). V tabulce 2 můžeme pozorovat množství vzniklého akrylamidu z různých reaktantů za přítomnosti asparaginu (Gökmen 2015).

Tabulka 2: Množství vzniklého akrylamidu z daných reaktantů za přítomnosti asparaginu při zahřívání na 180 °C po dobu 5 minut (Gökmen 2015)

Reaktant	Akrylamid (mmol/mol)
2-hydroxybutan-1-al	15,8
Hydroxyaceton	3,97
Glukosa	2,22
Methylglyoxal	0,52
Glyoxal	0,38
Diacetyl	0,26
3-hydroxy-propanamid	0,24
Kyselina glyoxalová	0,08
butan-1-al	0,01

### 3.4.1 Podmínky vzniku

V roce 2002 byl akrylamid nalezen v potravinách bohatých na sacharidy, které byly vystaveny vysokým teplotám, konkrétněji teplotám nad 120 °C. Šlo o tepelné úpravy smažením, pečením a grilováním (Riboldi et al. 2014). Ve vařených produktech byly nalezeny nulové hodnoty akrylamidu (Keramat et al. 2011).

Akrylamid vzniká jako výsledek Maillardovy reakce, kdy reaguje aminokyselina asparagin s karbonylovou skupinou redukujiícího sacharidu, nejčastěji glukosy (nebo fruktosy) (Riboldi et al. 2014; Gökmen 2015). V potravině v syrovém stavu se akrylamid nevyskytuje. Samotná potravina obsahuje pouze prekurzory a kontaminace vzniká až během tepelné úpravy. Vznik akrylamidu závisí na množství a přítomnosti prekurzorů v potravině, dále také na pH potraviny, teplotě úpravy, době trvání zahřívání a vodní aktivitě (Nachi et al. 2018). Příjem tepelně zpracovaných potravin s vysokým obsahem sacharidů je hlavním zdrojem příjmu akrylamidu do lidského těla (Matthäus & Haase 2016). Možný je také příjem z obalových materiálů (Keramat et al. 2011).

### 3.4.2 Maillardova reakce

Maillardova reakce je pro potravinářství jedna z nejzásadnějších, avšak velmi složitých reakcí. Může k ní docházet při zpracování nebo skladování potravin. Název nese po francouzském chemikovi jménem Louis Camille Maillard, který jako první popsal tvorbu hnědých pigmentů při zahřívání glukosy s glycinem (Velíšek & Hajšlová 2009). Má se za to, že Maillardova reakce je hlavní cesta, jak v potravinách vzniká akrylamid (Jing et al. 2019).

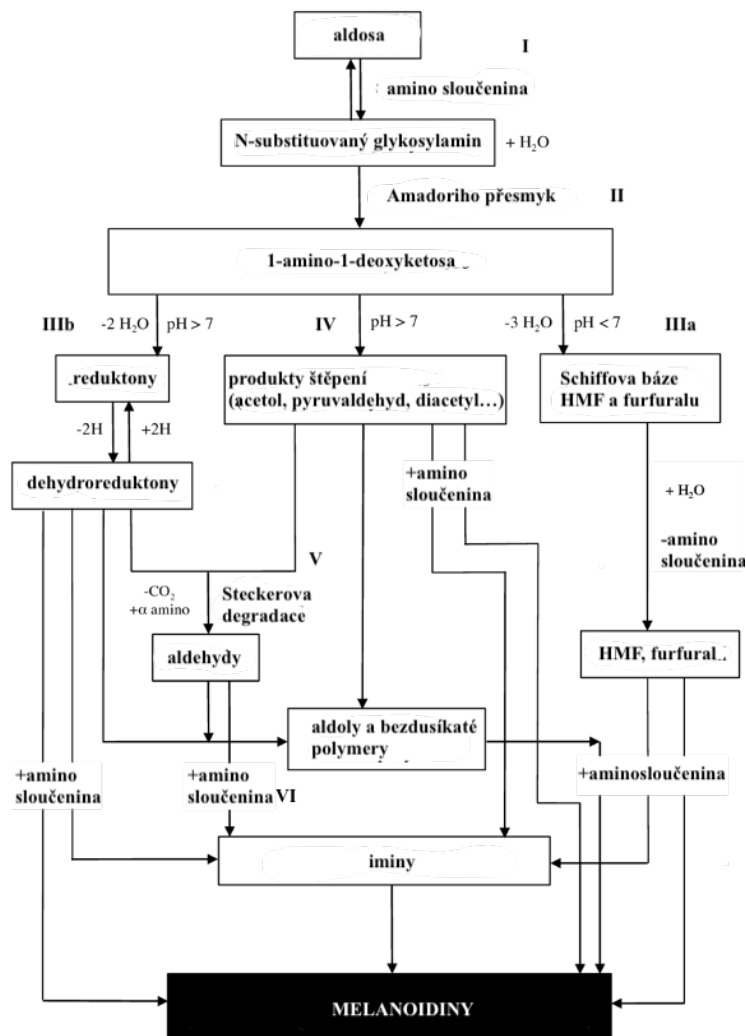
### 3.4.2.1 Látky účastnící se Maillardovy reakce

Maillardovy reakce se většinou účastní nízkomolekulární, poměrně stálé sloučeniny. Základem je reakce redukujícího cukru s aminovou sloučeninou. Redukující sacharidy mohou představovat monosacharidy glukosa a fruktosa (nebo také ribosa) nebo disacharidy laktosa či maltosa. S nimi působí aminokyseliny, peptidy a bílkoviny, konkrétně volné aminoskupiny bílkovin. Na reakci se mohou podílet i biogenní aminy (Nursten 2005).

Při této reakci dochází ke vzniku velmi reaktivních karbonylových sloučenin, které mohou reagovat mezi sebou nebo s přítomnými aminosloučeninami. Mohou vznikat také volné radikály, které hrají důležitou roli při tvorbě vonných a chuťových látek. Velmi významným produktem Maillardovy reakce jsou melanoidiny.

V důsledku Maillardovy reakce mohou vznikat také mutagenní látky, jako jsou glyoxal, methylglyoxal, 5-hydroxymethylfuran-2-karbaldehyd. Některé produkty např. sekundární aminy mohou reagovat s kyselinou dusitou za vzniku mutagenních N-nitrososloučenin (Velíšek & Hajšlová 2009).

### 3.4.2.2 Fáze Maillardovy reakce



Obrázek 2: Průběh Maillardovy reakce (upraveno dle Kumar et al. 2013)

#### 3.4.2.2.1 Reakce sacharidů s aminokyselinami

Hlavním principem Maillardovy reakce je reakce redukujícího sacharidu s aminosloučeninou (viz obrázek 2-I). Reakce se nejčastěji účastní zásadité aminokyseliny (jako např. lysin a asparagin), jelikož obsahují v molekule více volných dusíkatých skupin. Karbonylové skupiny redukujícího sacharidu (aldosy nebo ketosy) reagují s aminoskupinou za vzniku karbonylaminu. Následuje dehydratace a vznik iminů, tzv. Schiffovy báze, ze které následně vzniká N-substituovaný glykosylamin a voda. Všechny reakce této fáze jsou reversibilní, jelikož snadno hydrolyzují na původní složky. Fáze negativně neovlivňují nutriční hodnotu potravin (Velíšek & Hajšlová 2009; ALjahdali & Cabanero 2019).

#### 3.4.2.2.2 Amadoriho přesmyk

Amadoriho přesmyk se děje spontánně při teplotách okolo 25 °C. Jedná se o reakci, kdy z aldosa vznikají Amadoriho sloučeniny (1-amino-1-deoxyketosy; viz obrázek 2-II). N-substituovaný glykosylamin v této fázi izomeruje a podstupuje Amadoriho přesmyk za vzniku ketosoaminů (aminodeoxycukrů), což vede ke snížení nutriční hodnoty potravin, zejména dochází ke ztrátě využitelnosti lysinu (Velíšek & Hajšlová 2009; ALjahdali & Cabanero 2019).

#### 3.4.2.2.3 Dehydratace sacharidů

K dehydrataci sacharidů (viz obrázek 2-III) může během Maillardovy reakce docházet dvěma způsoby. V kyselém prostředí ( $\text{pH} < 7$ ) vstupuje produkt Amadoriho přesmyku do reakcí vedoucích ke vzniku furfuralu a hydroxymethylfurfuralu (HMF). Během těchto reakcí dochází k 1,2-enolizaci a ke ztrátě 3 molekul vody. Tento proces je možné urychlit přidáním některých dalších sloučenin (např. glycinu), které urychlují vznik furfuralu z xylosy a vznik HMF z glukosy (viz obrázek 2-IIIa).

Při druhém způsobu dochází k 2,3-enolizaci a ke ztrátě 2 molekul vody, tento způsob probíhá v neutrálním a alkalickém prostředí ( $\text{pH} > 7$ ) a vede ke vzniku reduktonů (viz obrázek 2-IIIb) (Nursten 2005; ALjahdali & Cabanero 2019).

#### 3.4.2.2.4 Štěpení sacharidů

Amadoriho produkty neutrálního nebo alkalického prostředí jsou působením vysokých teplot štěpeny za vzniku různých látek (ALjahdali & Carbonero 2019). Vznikají např. deriváty pyrazinu, glykolaldehyd, nežádoucí glyoxal (Nursten 2005), nebo také acetol, pyruvaldehyd a diacetyl (viz obrázek 2-IV). Tyto sloučeniny hromadně nazýváme jako produkty štěpení. Všechny tyto sloučeniny jsou vysoce reaktivní a účastní se dalších kroků Maillardovy reakce, konkrétně Steckerovy degradace (Kumar et al. 2013).

#### 3.4.2.2.5 Steckerova degradace

Během Steckerovy degradace aminokyselin dochází ke vzniku reaktivních a často sensoricky aktivních aldehydů a amoniaku (viz obrázek 2-V) (Nursten 2005).  $\alpha$ -Dikarbonylové sloučeniny a jejich deriváty reagují s aminokyselinami za vzniku aldehydů a  $\alpha$ -ketonů (Nursten 2005; Kumar et al. 2013). Dochází k reakci karbonylové skupiny s volnými amino skupinami. Do Maillardovy reakce se tak zabudovává další dusík (Kumar et al. 2013).  $\alpha$ -Aminokyseliny jsou oxidovány a dekarboxylovány na aldehydy, dochází tak k uvolnění  $\text{CO}_2$  (Nursten 2005).

#### 3.4.2.2.6 Kondenzace aminosloučenin s reaktivními karbonylovými sloučeninami

Aldehydy, vzniklé při Steckerově degradaci, za nižších teplot kondenzují s aminy za vzniku melanoidinů (2-VI). Ty obsahují přibližně 3–4 % dusíku (Nursten 2005; ALjahdali & Cabanero 2019).

#### 3.4.2.2.7 Vznik melanoidinů, neenzymatické hnědnutí

V prvních dvou fázích Maillardovy reakce mohou vznikat prekurzory premelanoidiny, což jsou bezbarvé sloučeniny. V závěrečné fázi reagují Steckerovy aldehydy s  $\alpha$ -aminokarbonylovými sloučeninami za vzniku heterocyklických sloučenin, které tvoří aroma, a hnědých pigmentů tzv. melanoidinů, které dávají tepelně upraveným potravinám jejich charakteristickou barvu (např. kávy, chlebu a kávovinám). Toto je v potravinářství velmi významný děj, který nazýváme jako neenzymatické hnědnutí (Velíšek & Hajšlová, 2009, Kumar et al. 2013).

Melanoidiny jsou vysokomolekulární barevné sloučeniny, které jsou rozpustné ve vodě a vykazují antioxidační aktivitu (Velíšek & Hajšlová 2009; Sakač et al. 2018). Klíčovým faktorem pro vznik melanoidinů jsou technologické parametry pečení (tzn. teplota zahřátí, čas zahřívání, pH a vlhkost) (Nursten 2005; Kumar et al. 2013). Roli hraje také přítomnost konkrétních sacharidů a aminokyselin. Pokud melanoidiny obsahují vysoké množství polysacharidů mohou vykazovat biologickou funkci vlákniny, což znamená, že podporují růst žádoucí mikrobioty tlustého střeva (mají probiotický účinek) (Velíšek & Hajšlová 2009).

#### 3.4.2.3 Vznik akrylamidu v Maillardově reakci

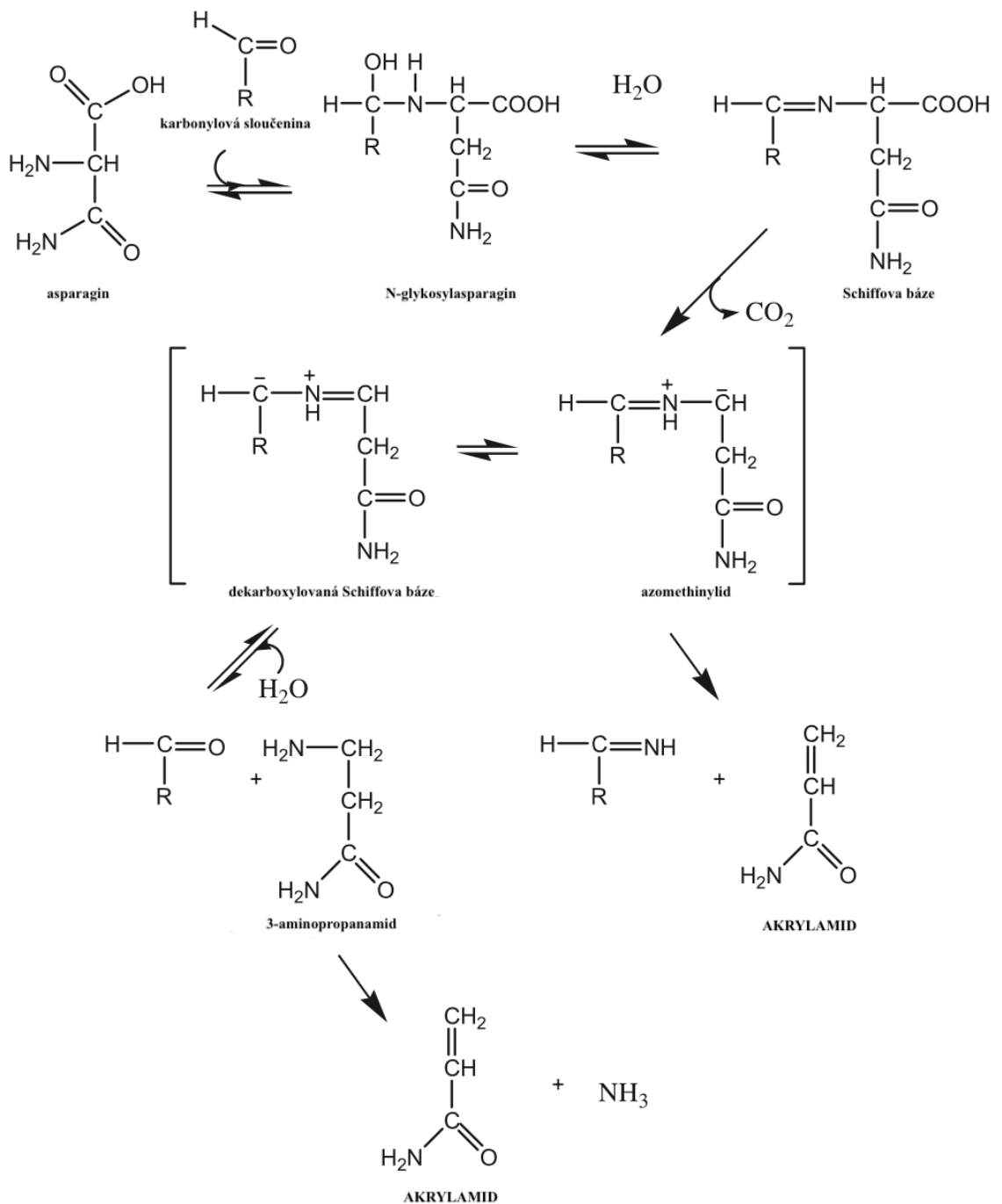
V první fázi Maillardovy reakce reaguje karbonylová skupina redukujícího sacharidu s aminovou skupinou asparaginu za vzniku N-glykosylasparaginu a následné Schiffovy báze. Dekarboxylací Schiffovy báze vzniká azometinylid. Ten je buď rozložen za vyloučení iminu a akrylamid vzniká přímo, nebo hydrolyzuje na 3-APA, nebo 3-oxopropanamid, které jsou následně přeměněny na akrylamid (viz obrázek 3) (Lineback et al. 2012; Jin et al. 2013; Liu et al. 2015; Wu et al. 2018).

Dle Jin et al. (2013) a Bagdonaite et al. (2006) je 3-APA klíčovým prekurzorem pro vznik akrylamidu. 3-APA neboli 3-aminopropanamid je látka přítomná v řadě potravin ve vysokém množství (viz tabulka 3), což vede k její degradaci na akrylamid během Maillardovy reakce. 3-APA je významným přechodným meziproduktem, který vzniká buď enzymaticky v syrových potravinách (dekarboxylací, za přítomnosti asparaginasy) nebo vlivem tepelné úpravy potravin z aminokyseliny asparaginu a redukujícího sacharidu (Bagdonaite et al. 2006; Granvogl & Schieberle 2007; Gökmen 2015; Wu et al. 2018).

Bylo pozorováno, že roztok 3-APA s chlorogenovou kyselinou produkuje větší množství akrylamidu než samotná 3-APA bez kyseliny při zahřevu na 160 °C a pH 6,8 (Liu et al. 2015). Oproti tomu dle Wu et al. (2018) je možné za určitých podmínek díky přidávku 3-APA redukovat výsledné množství akrylamidu v produktu díky Michaelově reakci. 3-APA obsahuje aminoskupinu, která je schopna reagovat s akrylamidem (Michaelovou reakcí) za vzniku látky 3,3',3''-nitrotriazolu. 3,3',3''-nitrotriazol (propionohydrazid) je cytotoxická látka. Toxicita je nižší než u akrylamidu. Klíčovými faktory při redukcí obsahu akrylamidu díky 3-APA je teplota zahřevu, jeho délka a molekulární poměr 3-APA/akrylamid. Dle výzkumu, ve



kterém byl použit poměr 5:3 (3-APA:akrylamid) a teplota 160 °C po dobu 20 minut, došlo k poklesu obsahu akrylamidu až o 47,29 % (Wu et al. 2018).



Obrázek 3: Mechanismus vzniku akrylamidu přes 3-aminopropanamid (Claus et al. 2008)

Tabulka 3: Naměřené množství 3-APA ve vybraných potravinách v modelu asparagin/glukosa (Gökmen 2015)

Potraviny	Obsah 3-APA (mg/kg)
Popcorn	1,88
Kakaové boby (fermentované, pražené)	1,8
Kakaové boby (nefermentované, pražené)	1,5
Sýr gouda (tepelně zpracovaný)	1,32
Náhrada kávy	0,45
Pšeničná svačina	0,28
Brambor (Likaria)	0,27
Brambor (Likaria, skladování 12 dní, 35 °C)	1,05
Brambor (Nicola)	0,14
Brambor (Saturna, skladování 20 týdnů)	14
Cornflaky	0,17
Pečené chlebové chipsy	0,15
Káva (mletá, pražená)	0,12
Topinka, suchar	0,034

#### 3.4.2.4 Vliv Maillardovy reakce na senzorické vlastnosti potravin

V důsledku Maillardovy reakce dochází k nežádoucím i žádoucím změnám organoleptických vlastností jako je vůně, chuť a barva. Dochází ke snížení nutriční hodnoty potravin, což je způsobeno ztrátami aminokyselin. Jejich reakce jsou nevratné (např. Steckerova degradace). Dochází také ke snížení stravitelnosti bílkovin z důvodu vzniku rezistentních příčných vazeb (Velíšek & Hajšlová 2009). Na barvě potravin se podílejí již zmíněné melanoidiny. Na chuti se podílejí meziprodukty Maillardovy reakce jako jsou pyroly, pyridiny, imidazol, pyrazin, oxazol, thiazol a další. Např. prolin způsobuje typicky chlebovou, rýžovou a popcornovou chuť, sirná aminokyselina methionin způsobuje typickou vůni brambor (Kumar et al 2013).

#### 3.4.2.5 Inhibice Maillardovy reakce

V praxi se dbá na potlačení nežádoucích reakcí, a naopak na podpoření těch žádoucích, proto je přítomnost a průběh Maillardovy reakce sledován. Zásadními faktory jsou teplota, pH prostředí, aktivita vody, druh reaktantů a jejich dostupnost. Je velmi složité Maillardovu reakci optimalizovat, jelikož jsou tyto faktory na sobě závislé.

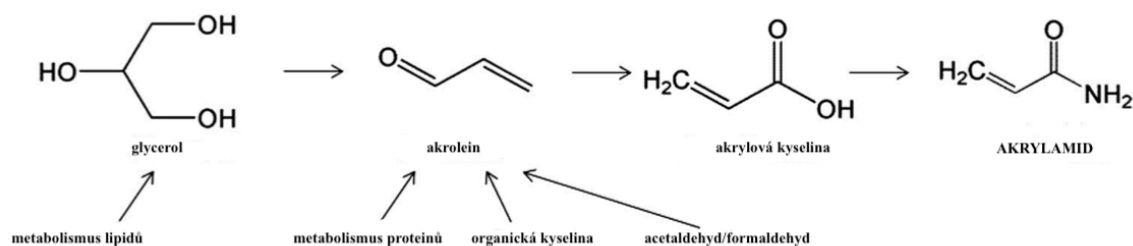
Maillardova reakce není vždy žádoucím dějem, proto se začaly hledat cesty, jak celé reakci zamezit, či ji zpomalit. Bylo nalezeno hned několik způsobů, jak reakci inhibovat, záleží však na dané potravíně. Obecně ale platí tyto zásady: odstranění jednoho z reakčních partnerů, úprava obsahu vody, snížení teploty, zkrácení doby záhřevu, úprava pH, přidavek látek zpomalujících nebo inhibujících reakci.

Jako příklad lze uvést proces sušení. Snažíme se o snížení teploty na minimum za současné minimalizace doby sušení. Toho můžeme dosáhnout například častějším otáčením potravin nebo redukcí obsahu, abychom sušili v co nejtenčí vrstvě. V tomto procesu můžeme reakci inhibovat také použitím oxidu siřičitého nebo hydrogensířičitanu. Nedochozí tedy k neenzymovému hnědnutí a potravina se navíc zároveň konzervuje. Při použití těchto chemických látek závisí na pH prostředí (Velíšek & Hajšlová 2009).

### 3.4.3 Lipidová oxidace – vznik z akroleinu

Akrolein neboli prop-2-enal je tříuhlíkatý aldehyd, který vzniká oxidační degradací lipidů, degradací sacharidů, aminokyselin a proteinů nebo také Maillardovou reakcí během Steckerovy degradace a podílí se tak na tvorbě akrylamidu (Gökmen 2015). Akrylamid vzniká konkrétně v důsledku lipidové oxidace nebo formace akrylového radikálu za přítomnosti dusíkaté látky (Keramat et al. 2011). Principem je zahřátí oleje nad kouřový bod, kdy dochází k termální degradaci glycerolu uvolněného z triacylglycerolů na akrolein (viz obrázek 4). Ten se dále oxiduje na kyselinu akrylovou, která reaguje s dusíkatou látkou (nejčastěji amoniakem, asparaginem nebo glutaminem) a vzniká akrylamid (Gökmen 2015; Liu et al. 2015; Matthäus & Haase 2016). Amoniak vzniká během Steckerovy degradace (Charoenprasert et al. 2017). Dle Kemarat et al. (2011) vzniká 114 µg akrylamidu na 1 g asparaginu a 0,18 µg akrylamidu na 1 g glutaminu.

Lipidy (triacylglyceroly) mají schopnost vytvářet velké množství akroleinu při podstoupení vyšších teplot. K lipidové oxidaci dochází např. při výrobě hranolek po zahřátí oleje (Keramat et al. 2011; Liu et al. 2015). Důležitým faktorem je množství a typ tuku, který ovlivňuje koncentraci akrylamidu po tepelné úpravě. Slunečnicový olej vykazuje vyšší tvorbu akrylamidu než palmový olej (Keramat et al. 2011). Dle závislosti na kvalitě a teplotě oleje může na 1 kg oleje vzniknout 5-250 mg akroleinu (Gökmen 2015).



Obrázek 4: Mechanismus vzniku akrylamidu přes akrolein (Xu et al. 2014)

### 3.4.4 Další cesty vzniku

Jak již bylo popsáno, hlavní cesta vzniku akrylamidu vede přes reakci asparaginu s redukcujícím sacharidem. Akrylamid může dále vznikat také reakcí kyseliny asparagové s redukcujícím sacharidem, termální degradací aminokyseliny a proteinu nebo dekarboxylací a deaminací asparaginu (Nachi et al. 2018). Dále může vznikat také z peptidů, proteinů nebo biogenních aminů. Za vznikem akrylamidu může stát konkrétně dipeptid karnosin, který je tvořený β-alaninem a histidinem. Karnosin hydrolyzuje na β-alanin, který může reagovat s amoniakem. Tento děj probíhá zejména při tepelné úpravě masa (Claus et al. 2008). Volné

radikály vznikající během Maillardovy reakce jsou zodpovědné za oxidaci lipidů. Oxidované tuky přeměňují asparagin na Steckerovy aldehydy nebo na deriváty vinylu. Závisí na množství přítomného kyslíku (Wu et al. 2018).

### 3.5 Redukce vzniku akrylamidu

Díky novým zpřísněným normám na obsah akrylamidu v konkrétních produktech, jsou mechanismy redukce velmi zkoumaným tématem. Nejjednodušší a nezákladnější technikou, jak snížit obsah rizikového akrylamidu během zpracování, je optimalizace podmínek, což v mnoha případech znamená prodloužení doby záhřevu a snížení teploty. Dále má značný vliv obsah prekurzorů v nezpracované potravíně. Snažíme se tedy vybírat potraviny s nižším obsahem zejména asparaginu. Obsah prekurzorů závisí na několika faktorech, např. na odrůdě, době sklizně, složení půdy nebo podmínkách skladování (Przygodzka et al. 2015). Redukce je možná také přidáním exogenních aditiv. Mezi nejvýznamnější patří přidání enzymu, zejména asparaginasy nebo pekařského droždí. V posledních letech je velmi diskutovaný také přídavek extraktů s vysokou antioxidační činností (Keramat et al. 2011; Liu et al. 2015; Jing et al. 2019).

#### 3.5.1 Přidání enzymu, droždí nebo jiných mikroorganismů

Použití potravinářského droždí je jedna z možností, jak omezit vznik akrylamidu. K redukcí dochází, aniž by došlo k výrazné změně barvy kůrky (Keramat et al. 2011). Při použití droždí je spotřebováno velké množství volného asparaginu. Kynutí alespoň jednu hodinu se ukázalo jako dostatečné při redukcí akrylamidu (Claus et al. 2008). Během dvou hodin kynutí těsta bylo po následném tepelném zpracování zredukováno téměř celé množství akrylamidu, oproti tomu při použití kvásku nedošlo k tak výrazným změnám (Keramat et al. 2011). Dle Keramat et al. (2011) je výhodnější krátká doba kynutí. Kynutí nad tři hodiny je považováno za nevhodné, jelikož dochází k degradaci lepku a upečený chleba není dostatečně nadýchaný, ale plochý (Claus et al. 2008). U chleba z celozrnné pšeničné mouky došlo při kratší době kynutí k redukcí 87 % akrylamidu a u chleba z žitných otrub k poklesu 77 %. Naproti tomu Przygodzka et al. (2015) uvádí, že jsou pro redukcí výhodnější delší časy kynutí (čas nebyl autorem uveden).

Využití laktofermentace při přípravě kváskového pečiva je pro redukcí akrylamidu také účinné. Dochází k redukcí 75 % akrylamidu u chleba v důsledku redukce pH. Při využití bakterií mléčného kvašení (LAB) měl chléb pH 3,7, oproti kontrole, na kterou nebyly použity LAB a jejíž pH vykazovalo hodnotu 6 (Claus et al. 2008). Dle Nachi et al. (2018) byly nejvýraznější změny v hodnotách akrylamidu pozorovány při použití bakterie *Pediococcus acidilactici*, kdy bylo ve vzorku naměřeno 5,64 µg/kg akrylamidu, oproti chlebu bez LAB, u něhož dosahovaly hodnoty akrylamidu 35,6 µg/kg. Při použití LAB nedošlo k negativnímu ovlivnění sensorických vlastností. Naopak vzorky byly ochutnávači pochvalovány. Kvásek s obsahem LAB vykazoval také vyšší hodnoty biogenních sloučenin a méně antinutričních látek (Nachi et al. 2018).

Při použití droždí, kvásku a LAB jsou uplatňovány dva možné mechanismy, které vedou k redukcí akrylamidu. Je předpokládáno, že snížení pH hodnoty během kynutí je klíčovým procesem (Nachi et al. 2018). Díky sníženému pH je také prodloužena trvanlivost produktu

(Przygodzka et al. 2015). Druhým dějem, ke kterému během kynutí dochází, je výrazná spotřeba asparaginu, který je klíčovým pro tvorbu akrylamidu (Przygodzka et al. 2015).

V případě použití enzymu asparaginasa během výroby dochází k přeměně asparaginu na asparagovou kyselinu. Enzym má potenciál redukovat akrylamid o 60-90 %. Pro lepší využití enzymu je doporučeno přidání vody, díky které jsou prekursorů mobilnější a enzym má tak větší účinnost. Naopak přítomnost tuků značně omezuje aktivitu asparaginasy (Pedreschi et al. 2014).

### 3.5.2 Přidání dalších kyselin a aminokyselin

Při přidání kyselin dochází k okyselení prostředí, což vede k redukci vzniklého akrylamidu a ke zvýšené degradaci již vzniklého akrylamidu. V této metodě se používá zejména kyselina citronová (např. při výrobě nachos). Do těsta se mohou přidávat také jiné aminokyseliny, nejčastěji glycin (Keramat et al. 2011). Jeho použití při výrobě cereálních a bramborových potravin vede k redukci akrylamidu o 30-70 % (Pedreschi et al. 2014).

Účinnými inhibitory akrylamidu se zdají být také sirné aminokyseliny a peptidy jako je methionin, cystein a glutathion. Při jejich použití došlo k redukci 50 % akrylamidu. Má se za to, že tyto látky (zejména cystein) reagují s akrylamidem za vzniku S- $\beta$ -propionamidu a způsobují tak nežádoucí zápach ve výsledném produktu. Z tohoto důvodu nejsou pro redukci akrylamidu příliš využívány (Claus et al. 2008; Yuan et al. 2011).

### 3.5.3 Přidání kationtů anorganických solí

Okolo roku 2010 byl předmětem výzkumů vliv iontů na obsah akrylamidu zejména v bramborových a pšeničných výrobcích. Výzkumy vedly k závěrům, že při použití jednomocných, dvojmocných nebo trojmocných kationtů během přípravy produktů, je možno omezit množství akrylamidu v konečných výrobcích. Přidání těchto kationtů (např.  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) do modelu asparagin/glukosa vedlo k eliminaci >97 % akrylamidu při zahřátí na 150 °C po dobu 20 minut. Přidáním dvojmocných kationtů (např.  $Ca^{2+}$  a  $Mg^{2+}$ ) do modelu asparagin/fruktosa bylo zamezeno vzniku akrylamidu kompletně. Přidání těchto kationtů do reálného syrového těsta vedlo po tepelné úpravě k redukci pouhých 20 % akrylamidu (Claus et al. 2008; Keramat et al. 2011).

Při výrobě sladkých a slaných sušenek z těsta obsahujícího vodu, mouku, sůl a 1 %  $CaCl_2$  došlo k redukci 35-60 % akrylamidu, při navýšení  $CaCl_2$  na 2 % došlo k redukci okolo 60 %. Redukce akrylamidu se v tomto případě vysvětluje inhibicí tvorby Schiffovy báze mezi asparaginem a redukujícím sacharidem, což zamezuje vzniku akrylamidu (Claus et al. 2008). Možné je také použití  $CaCO_3$ , které je používáno jako zdroj vápníku v cereálních výrobcích bez výrazného ovlivnění sensorických vlastností. Má se za to, že inhibuje vznik meziproductů Maillardovy reakce. Tento efekt je však minoritní a nedochází k výraznému poklesu akrylamidu (Keramat et al. 2011).

$NaHSO_3$  se používá jako potravinářský konzervant, který brání oxidaci a zabíjí bakterie. Byl zkoumán vliv jeho přídavku na tvorbu akrylamidu v modelu asparagin/fruktosa.  $NaHSO_3$  byl přidán v různých koncentracích (0,2 %; 0,5 %; 0,8 %; 1,2 %; 1,5 %). Došlo k redukci 78,47-96,32 % akrylamidu (Yuan et al. 2011).

### 3.5.4 Přidání antioxidantů

Jednou z nejdiskutovanějších možností, jak inhibovat obsah akrylamidu v potravinách je přidávek antioxidantů. Přidávají se zejména polyfenoly, které jsou schopny vychytávat volné radikály. Přírodně se vyskytují např. v ovoci, zelenině, bylinách, koření a obilovinách. Mezi potraviny s nejvyšším obsahem polyfenolů patří např. zelený čaj, káva, červené víno nebo čokoláda. Bylo nalezeno více než 8000 fenolických struktur. Dle struktury jsou rozdělovány do následujících skupin: flavony, flavonoidy a fenolové kyseliny. Pro rostlinné polyfenoly je charakteristický aromatický uhlovodík, který nese nejméně jeden hydroxylový substituent. Tento substituent je schopný vázat volné radikály a působit tak jako antioxidant. Antioxidační činnost je dána v závislosti na počtu a umístění hydroxylových skupin a struktuře aromatického jádra. Čím více hydroxylových skupin molekula obsahuje, tím silnější antioxidační účinky polyfenol vykazuje (Liu et al. 2015).

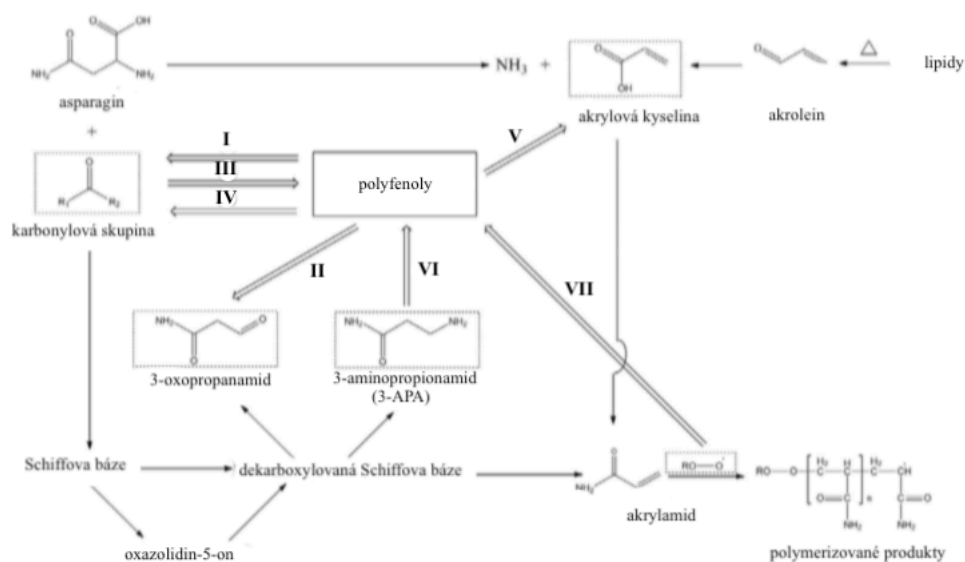
Přidávek antioxidantů během zpracování potravin vede k několika pozitivním i negativním dějům, které můžeme pozorovat na obrázku 5. Mezi prospěšné mechanismy vedoucí k inhibici akrylamidu je řazeno zneprístupnění karbonylových sloučenin (I), omezení vzniku akrylamidu přes 3-oxopropanamid (II), ochrana před oxidací lipidů (IV), také tedy redukce vzniku kyseliny akrylové (V). Naopak některé polyfenoly mohou napomáhat vzniku akrylamidu z karbonylových skupin a podílet se tak na průběhu Maillardovy reakce (III). Některé polyfenoly napomáhají vzniku akrylamidu zrychlením přeměny 3-APA na akrylamid (VI) a v neposlední řadě může být akrylamid po vzniku polymerován volnými radikály na polyakrylamid (VII). Pro redukci akrylamidu se používají přírodní i syntetické antioxidanty. Mezi používané syntetické fenoly patří butylhydroxyanisol (BHA, E320) nebo butylhydroxytoluen (BHT, E321). Konzumenti však upřednostňují použití přírodních polyfenolů, které jsou také bezpečnější než syntetické (Liu et al. 2015). Např. flavony a jejich deriváty redukují obsah akrylamidu v modelu asparagin/glukosa o 59,9-78,2 % (Jing et al. 2019). Mezi nejúčinnější antioxidanty pro redukci obsahu akrylamidu jsou řazeny extrakty ze zeleného čaje, bambusových lístků a rozmarýny (Kerammat et al. 2011; Liu et al. 2015; Jing et al. 2019).

Byl testován účinek šesti ovocných extraktů na redukci vzniku akrylamidu v modelovém systému asparagin/glukosa. Bylo zjištěno, že pouze jablečný extrakt dokázal inhibovat vznik akrylamidu (Jing et al. 2019), zatímco dračí ovoce s červenou i bílou dužinou vznik naopak podpořilo. Zbylé tři ovocné extrakty nevykazovaly významný vliv na formaci akrylamidu. Aktivní látky jablek proanthokyanidiny byly prokázány jako účinné pro redukci tvorby akrylamidu ve smažených brambůrcích. Bylo inhibováno 50 % akrylamidu (Liu et al. 2015).

Pohanka také obsahuje značné množství fenolických sloučenin (mezi nejvýznamnější patří rutin a quercetin), které mají prospěšný vliv na naše zdraví. Mezi nejvíce konzumované druhy pohanky patří pohanka obecná (*Fagopyrum esculentum*) a pohanka tatarská (*Fagopyrum tataricum*). Dle Jing et al. (2019) vykazuje extrakt pohanky tatarské vyšší antioxidační aktivitu než pohanka obecná. Chléb, při jehož výrobě byl použit extrakt z klíčků pohanky tatarské, vykazoval nižší hodnoty akrylamidu v porovnání s extrakty z pohanky obecné. Došlo k redukci 27,3 % akrylamidu. Nicméně všechny pohankové extrakty vykazovaly výrazný pozitivní vliv na inhibici vzniku akrylamidu v modelu asparagin/glukosa. Přidáním extraktu z klíčků pohanky

tatarské došlo k redukci akrylamidu bez výrazných změn sensorických vlastností a barvy kůrky chleba.

Kyselina askorbová, veřejnosti známější jako vitamin C, je také významným antioxidantem. Při použití v koncentraci 1,5 % a 0,5 % v modelu asparagin/fruktosa došlo k redukci 50 % a 42 % akrylamidu (Yuan et al. 2011).



Obrázek 5: Formace akrylamidu za přítomnosti polyfenolů (Liu et. al 2015)

### 3.6 Výskyt akrylamidu v potravinách

V syrových potravinách najdeme pouze prekurzory. Ke vzniku akrylamidu dochází během tepelné úpravy (smažení, pečení, fritování) a to zejména rostlinných surovin (Matthäus & Haase 2016). V roce 2002 byla přítomnost akrylamidu zaznamenána v pečených a smažených jídlech bohatých na škrob. V posledních letech výzkumy ukázaly, že se akrylamid nachází v široké škále tepelně upravených potravin – např. chléb, sušenky, oplatky, bramborové výrobky, káva aj. (Jing et al. 2019). Členské státy Evropské unie s evropským potravinářským průmyslem proto vytvořily databázi, ve které jsou sepsány potraviny obsahující akrylamid (Matthäus & Haase 2016).

#### 3.6.1 Brambory a bramborové výrobky

V roce 2002 byla zjištěna přítomnost akrylamidu v hranolkách, bramborových lupíncích a dalších bramborových produktech, které se zpracovávají při vysokých teplotách. Akrylamid nebyl nalezen v bramborách upravených ve vodě či v páře. Akrylamid, který se v bramborových produktech nachází, vzniká zejména z asparaginu a z monosacharidů glukosy nebo fruktosy (Bethe & Busan 2013). Limitujícím faktorem při tvorbě akrylamidu v bramborách jsou redukující sacharidy. Proto je velmi důležité vybírat druhy s nízkým obsahem sacharidů (Claus et al. 2008; Bethe & Busan 2013). Koncentrace glukosy a fruktosy se ve zralých bramborových hlízách pohybuje okolo 0,04-4,8 mg/g (Bethe & Busan 2013). Nejnižší obsah glukosy byl nalezen v odrůdách Lady Claire a Marlene, nejvyšší v Naturella a

Nicola. Naturella a Nicola obsahovaly také nejvyšší obsah fruktosy, který je v bramborách obecně nižší než obsah glukosy. Tyto dvě odrůdy by se tedy neměly používat při přípravách, které způsobují vznik velkého množství akrylamidu (Luning & Sanny 2016). Z brambor, obsahujících redukcující sacharidy v rozmezí mezi 0-26 mg/g, bylo ve finálním produktu vytvořeno až 2500 µg/kg akrylamidu. Asparagin je obvykle nejhojnější aminokyselinou v bramborových hlízách. Hodnoty volného asparaginu se pohybují mezi 4-25 mg/g. Největší množství akrylamidu při výrobě bramborových lupínků je tvořeno během prvních 2-3 minut. Vznikají 2/3 celkového obsahu akrylamidu (Bethe & Busan 2013).

Obsah akrylamidu v bramborových produktech je závislý nejen na obsahu prekurzorů, ale také na podmínkách zpracování výrobku, odrůdě brambor, klimatických podmínkách, formě zemědělství (zda se jedná o ekologické, konvenční aj.) a podmínkách skladování hlíz (Bethe & Busan 2013; Halford 2019). Množství redukcujících sacharidů v hlízách ovlivňují konkrétně následující faktory: hnojení (typ, čas, množství), klima, skladovací teplota a délka skladování. Hladina asparaginu je ovlivňována obdobnými faktory (Bethe & Busan 2013). U brambor je výhodné použít dusíkaté hnojivo, které zajistí zvýšený obsah volného asparaginu, zatímco obsah redukcujících sacharidů v hlíze se sníží (Claus et al. 2008). Termín sklizně je také velmi významným faktorem, jelikož zralost určuje, jaký je obsah redukcujících sacharidů ve sklizené hlíze. Bylo zjištěno, že hlízy sklizené po období chladnějšího počasí, jsou sladší a dosahují tedy vyšších hodnot monosacharidů. Hlízy sklizené po teplotním nebo mechanickém stresu mají tendence kumulovat sacharosu. Po sklizení hlíz je velmi důležité zajistit správné podmínky skladování, jelikož i během skladování může dojít k akumulaci a nárůstu redukcujících sacharidů v hlízách. Změnit se může také obsah asparaginu. Ideální teplota pro skladování se pohybuje v rozmezí 2-10 °C (Bethe & Busan 2013). Dle Luning & Sanny (2016) by skladovací teplota brambor neměla klesnout pod 8-10 °C. Pokud klesne pod tuto teplotu, začnou se ze škrobu uvolňovat redukcující sacharidy a dojde k zesládnutí hlíz. Nevhodnost nízké teploty skladování potvrzuje také Tripathi et al. (2015). Zvýšený obsah akrylamidu byl nalezen také v bramborových výrobcích, které byly vyrobeny z dlouhodobě skladovaných brambor bez ohledu na teplotu.

Bylo zjištěno, že obsah antioxidantů v hlízách hraje také roli při tvorbě akrylamidu. Při vysoké koncentraci fenolických sloučenin bylo pozorováno nízké množství akrylamidu v konečných produktech. V USA se proto zemědělci zaměřili na pěstování odrůd s vysokým obsahem antioxidantů (Bethe & Busan 2013).

### 3.6.1.1 Hranolky

Brambory na přípravu hranolek jsou dodávány většinou ve formě zmražených před smažených kousků. Doporučená teplota takto upravených brambor je -18 °C. Během tohoto zmražení v hlízách nebyla pozorována žádná chemická, ani biochemická aktivita. Dle Luning & Sanny (2016) způsob rozmražení nemá vliv na obsah glukosy, fruktosy, ani tvorbu akrylamidu. Po rozmražení následuje hloubkové smažení, což je nejdůležitější krok při výrobě hranolek. Smažení začíná při teplotě okolo 120 °C a dosahuje hodnot 170-180 °C v závislosti na čase smažení. V následující tabulce 4 jsou znázorněny teploty, kterých dosahoval proces smažení, dobu, po kterou se hranolky smažily, a výsledný obsah akrylamidu. Zdá se, že



nejintenzivnější tvorba akrylamidu při smažení hranolek probíhá při teplotě okolo 175 °C. Dle Luning & Sanny (2016) při teplotách nad 180-200 °C dochází k výrazné degradaci akrylamidu.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty akrylamidu ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) v hranolkách při různých podmínkách smažení (Luning & Sanny 2016)

Doba smažení (min)	Teplota smažení (°C)	Obsah akrylamidu ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
7	150	500
3,5	190	4500
10	170	800
10	190	3700

### 3.6.1.2 Redukce akrylamidu v bramborových výrobcích

Pro redukcí akrylamidu v bramborových výrobcích se používají především následující procesy: blanšívání, máčení v roztocích, použití aditiv (iontů, enzymů, antioxidantů aj.). Tyto procesy jsou zařazeny před tepelnou úpravou daného produktu. Vliv má také délka a intenzita tepelného záhřevu, proto jsou např. při výrobě hranolek a chipsů používány vakuové fritézy. Na obsah akrylamidu v bramborových výrobcích má mimo jiné vliv také vlhkost během zpracování. Pokud vlhkost klesne pod 10 %, produkce akrylamidu vzroste. Nejvýrazněji se akrylamid akumuluje při <5 % vody (Claus et al. 2008; Bethe & Busan 2013). Stejný trend popisuje také Tripathi et al. (2015).

#### 3.6.1.2.1 Blanšívání

Pro snížení obsahu prekurzorů se používá metoda blanšívání a namáčení brambor v roztocích organických kyselin (citronové, mléčné a octové kyselině). Použití kyselin vede ke sníženým hodnotám pH. Tím dojde ke zvýšení protonace asparaginu, které způsobí výrazné snížení jeho reaktivity. Při tvorbě akrylamidu tak dojde k inhibici vzniku Schiffovy báze a obsah akrylamidu je redukován až o 70 %. Blanšívání po dobu 10 minut při 80-85 °C vedlo ke snížení obsahu redukujících sacharidů i asparaginu. Obsah akrylamidu ve finálním produktu byl redukován o 60 %. Bramborové plátky byly blanšívány v destilované vodě po dobu 40 a 90 minut a následně byly smaženy na 170 °C. Tyto plátky obsahovaly téměř třikrát nižší množství akrylamidu než plátky, které předem blanšívány nebyly, a při smažení byla aplikována teplota 190 °C. Namáčení a blanšívání v roztocích aminokyselin (zejména glycinu, cysteinu a lysinu) také potenciálně vede k redukcí vzniku akrylamidu (Bethe & Busan 2013). Blanšívání bramborových produktů v roztoku glycinu vedlo k inhibici 60 % akrylamidu (Claus et al. 2008).

Blanšívání (ať už s přidávkem dalších látek, nebo ne) způsobuje ztrátu škrobu v bramborách, což vede ke zvýšení absorpce oleje a srážení syrového produktu. Tyto reakce vedou ke změnám textury a chuti výsledného produktu. Máčení a blanšívání brambor v roztoku glukosy je používáno pro docílení správné barvy a chuti v hranolkách (Bethe & Busan 2013).

#### 3.6.1.2.2 Vakuové fritování

Vakuové smažení se jeví jako nejjednodušší způsob, jak lze zredukovat obsah akrylamidu v bramborových hranolcích. Jedná se o metodu smažení při velmi nízké teplotě a nižším atmosferickém tlaku. V těchto podmínkách dochází ke snadné ztrátě vody z brambor. Při této technologii nedochází k výraznému ovlivnění sensorických vlastností. Výrobky, které byly smaženy při 118 °C po dobu 4 minut při 10 torr, obsahovaly o 84-97 % méně akrylamidu než ty, které byly smaženy tradiční cestou na 165 °C po dobu 3 minut (Claus et al. 2008; Bethke & Bussan 2013; Tripathi et al. 2015).

#### 3.6.1.2.3 Přidání aditiv

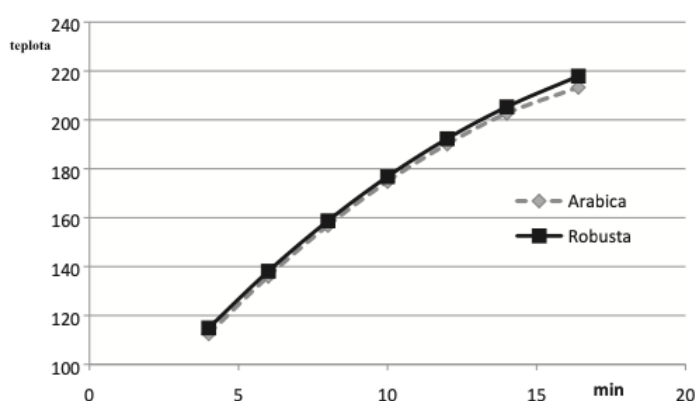
Pro redukcí akrylamidu v bramborových výrobcích může být použito také přidání různých aditiv. Použity mohou být např. jednomocné a dvojmocné kationty ( $\text{Na}^+$  a  $\text{Ca}^{2+}$ ), extrakty antioxidantů nebo enzymy (ty se používají při výrobě produktů z bramborového těsta). Bylo pozorováno snížení obsahu akrylamidu o 25 % při použití rozmarýnu (*Rosmarinus officinalis*) a olivového oleje v průběhu smažení. Použity mohou být také další bylinné směsi s vysokým obsahem flavonoidů (Claus et al. 2008; Jin et al. 2013). Bylo předpokládáno, že použití olejů s vyšší antioxidační aktivitou dá vzniknout nižšímu množství akrylamidu. Tato hypotéza nebyla potvrzena v sérii výzkumů, při kterých byly porovnávány obsahy akrylamidu při použití řepkového, olivového, kukuřičného, sójového, slunečnicového a hroznového oleje. Všechny tyto druhy oleje daly vznik srovnatelnému množství akrylamidu v hranolcích (Bethke & Busan 2013).

### 3.6.2 Káva

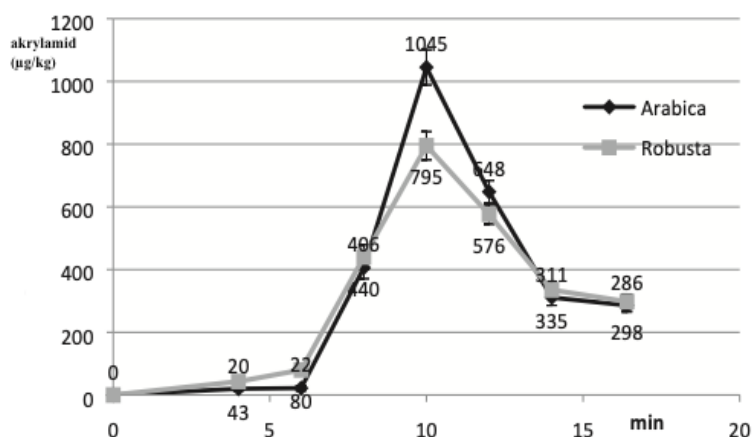
Kromě konzumenty vyhledávaného kofeinu obsahuje káva také toxický akrylamid, jelikož jsou zelená kávová zrna zpracovávána při vysokých teplotách (210-250 °C). Obsah akrylamidu v kávě je dán stejnými faktory jako u ostatních potravin (např. odrůdou kávy, skladovacími podmínkami, obsahem prekurzorů, zralostí a dalšími) (Mesías & Morales 2016; Bertuzzi et al. 2020). Roli hraje také, zda se jedná o praženou kávu nebo instantní. Povolené obsahy jsou uvedeny v tabulce 1 v kapitole 3.3. Dle Mesías & Morales (2016) je reálný obsah u pražené kávy 197-256  $\mu\text{g}$  akrylamidu/kg a 229-1123  $\mu\text{g}$  akrylamidu/kg u kávy instantní. Velmi významným faktorem je také způsob přípravy zrnkové pražené kávy, kdy nejsou konzumována mletá zrna, ale pouze jejich výluh. Roli hraje teplota vody, délka, po kterou je voda v kontaktu s mletými zrny, a také tlak vyvinutý při průchodu vody přes mletá zrna. Jelikož je akrylamid ve vodě rozpustná látka, tak takto konzumovaná káva obsahuje akrylamid v rozpětí 1,7-75  $\mu\text{g}/\text{l}$  v závislosti na metodě extrakce.

Nejkonzumovanějšími, komerčně dostupnými druhy kávy jsou Robusta (*Coffea canephora robusta*) a Arabica (*Coffea arabica*). Mají rozdílné chemické a sensorické vlastnosti. Arabica je obvykle sladší, má méně výraznou chuť a je cítit po cukru, ovoci a plodech. Také je považována za kvalitnější než Robusta. Robusta má silnější chuť, je krémová, obsahuje více kofeinu než Arabica. Rozdíly mezi těmito dvěma druhy se týkají také množství prekurzorů akrylamidu. Dle Bertruzzi et al. (2020) obsahuje Robusta více asparaginu, který je pro tvorbu akrylamidu v kávě limitujícím prekurzorem. Jiná studie uvádí, že Robusta obsahuje  $797 \pm 23$   $\mu\text{g}$  asparaginu/kg a Arabica  $486 \pm 97$   $\mu\text{g}$  asparaginu/kg (Anese 2016).

Na obrázku 6 můžeme pozorovat průběh teplot během pražení kávy. Dle Bertuzzi et al. (2020) celý proces začíná při 90 °C, během 4 minut dosáhne 115 °C. Zhruba po 6 minutách, kdy je teplota pražení 136-138 °C se začínají objevovat první známky vzniku akrylamidu, jehož tvorbu během pražení můžeme pozorovat na obrázku 7. Mezi 6-10 minutou dochází k výraznému nárůstu obsahu akrylamidu a okolo 10. minuty dosahuje maxima, tj. 1045±56 µg/kg u druhu Arabica a 795±45 µg/kg u druhu Robusta, přičemž teplota se pohybuje okolo 175-177 °C. Rozdílný obsah akrylamidu je pravděpodobně dán různými obsahy prekurzorů. Po 10. minutě pražení při teplotě nad 180 °C začíná obsah akrylamidu klesat. Zhruba po 16 minutách teplota dosahuje 210-220 °C a celý proces pražení končí. Ve finálním produktu se obsah akrylamidu pohybuje okolo 300 µg/kg. Rozdíl mezi obsahy akrylamidu u Arabicy a Robusty se dle Bertuzzi et al. (2020) značně neliší. Naopak Anese (2016) uvádí, že Robusta obsahuje o 45-55 % vyšší množství akrylamidu než Arabica.



Obrázek 6: Teplota během pražení kávy (Bertuzzi et al. 2020)



Obrázek 7: Průměrný obsah akrylamidu během pražení (Bertuzzi et al. 2020)

### 3.6.3 Cereální výrobky

Nejdiskutovanější skupinou potravin v souvislosti s akrylamidem jsou cereální výrobky, jelikož jsou velmi rozšířeny. Dle Przygodzka et al. (2015) je konzumace chleba zodpovědná za 45 % přijímaného akrylamidu v polské populaci. Velmi konzumovanou skupinou potravin jsou také snídaňové cereálie. Při jejich výrobě se hojně používá metoda

extruze (střední  $a_w$ , teplota 80-95 °C) a sušení opékáním (nízká  $a_w$ , teplota >150 °C). Oba tyto procesy vedou ke vzniku Maillardovy reakce. Trh se snídaňovými cereáliemi se neustále rozrůstá dle poptávky konzumentů, kteří stále ve větší míře vyžadují zdraví prospěšné potraviny. Výrobky z tradičních obilovin jsou stále častěji nahrazovány výrobky z pseudoobilovin (např. pohanka, quinoa, jáhly), což jsou přirozeně bezlepkové potraviny. Na trh se také vrací suroviny jako je kamut, pšenice špalda nebo tef (Mesías et al. 2019). Mimo chleba a snídaňové cereálie můžeme akrylamid najít také v různých sladkých tyčinkách (39,0-61,2 µg/kg) a v dortech (13,3-49,5 µg/kg) (Michalak et al. 2013).

Akrylamid byl nalezen také v kojenecké výživě, která je bohatá na sacharidy (19,2-59,9 µg/kg). V kojeneckém a batolecím věku přijímají děti velké množství cereálních produktů, jelikož je to pro ně významný zdroj energie. Kupované produkty jsou ale často průmyslově zpracovány, aby byla zlepšena jejich stravitelnost, senzoričké vlastnosti, bezpečnost a prodloužena trvanlivost. Napříč těmito pozitivním jevům průmyslové zpracování v tomto případě často znamená přítomnost Maillardovy reakce a vznik toxických látek, jako např. i akrylamidu. Děti jsou tak již od útlého věku vystavovány akrylamidu na denní bázi (Michalak et al. 2013).

### 3.6.3.1 Formace akrylamidu ve chlebu

Chléb se skládá ze dvou částí – kůrka a střída. Kůrka obsahuje značně větší množství akrylamidu (99 %) než střída, kde se nachází pouze stopové množství (Keramat et al. 2011; Przygodzka 2015). Tento jev je vysvětlován nižšími teplotami střídy (obvykle do 100 °C), což vede ke vzniku pouze stopového množství akrylamidu v této vnitřní vrstvě (Claus et al. 2008). Senzorické vlastnosti, jako je např. barva kůrky, jsou velmi úzce spojeny s přítomným akrylamidem. Zejména při pečení nad 200 °C dochází k výraznému tmavnutí kůrky a také k tvorbě akrylamidu (Keramat et al. 2011).

#### 3.6.3.1.1 Vliv různých druhů obilovin na tvorbu akrylamidu v chlebu

Díky vzrůstajícímu zájmu konzumentů o neobvyklé suroviny se rozšířily také výzkumy zkoumající vliv těchto surovin na vznik akrylamidu. Bylo zjištěno, že obsah akrylamidu je závislý na druhu použité mouky. Byl pozorován vliv žitné, špaldové a pšeničné mouky na obsah akrylamidu ve finálním výrobku. Nejvíce akrylamidu obsahoval žitný chléb, méně špaldový a nejnižší množství bylo naměřeno v pšeničném chlebu. Obecně platí, že čím větší množství vlákniny a popelovin mouka obsahuje, tím vyšší jsou koncentrace akrylamidu v konečných výrobcích (Przygodzka et al. 2015). Aktivita proteas je navýšena a dochází tak k většímu uvolňování aminokyselin z proteinů. Tyto mouky jsou považovány za nutričně bohaté, nicméně produkty z nich obsahují výrazně vyšší množství akrylamidu (Claus et al. 2008). Toto potvrzuje i Keramat et al. (2011), kteří ve svém výzkumu pozorovali vyšší obsahy akrylamidu ve výrobcích z celozrnné mouky než z bílé. V celozrnných moukách je obsaženo větší množství otrub, které obsahují velké množství asparaginu, který je dostupný během Maillardovy reakce.

#### 3.6.3.1.2 Vliv teploty a doby záhřevu na tvorbu akrylamidu v chlebu

Dalšími důležitými faktory pro tvorbu akrylamidu v chlebu jsou teplota, délka záhřevu a také vlhkost během pečení. Kůrka se začíná formovat v okamžiku, kdy povrch těsta dosáhne

teploty 100 °C. Během tvorby dochází k procesu dehydratace. Nejnižší teploty povrchu chleba, při kterých byla zaznamenána přítomnost akrylamidu v kůrce jsou 150 °C, kdy formace akrylamidu začala při 120-130 °C (Keramat et al. 2011). Při pečení chleba na 200 °C po dobu 70 minut bylo pozorováno 92,4 µg/kg akrylamidu, zatímco pečení na 240 °C po dobu 50 minut vedlo k výraznému zvýšení obsahu akrylamidu v konečném chlebu, konkrétně na 124,1 µg/kg (Przygodzka et al. 2015). Pro pečení chleba je tedy vhodná delší doba tepelného záhřevu při nižších teplotách. Při zpracování žitného chleba tímto způsobem došlo k redukci akrylamidu o 30 % (Claus et al. 2008).

#### 3.6.3.1.3 Vliv vlhkosti na tvorbu akrylamidu během pečení chleba

Důležitou roli hraje také vlhkost během pečení. Při použití konvekční trouby dochází k nucené cirkulaci vzduchu, což vede k rychlejšímu a intenzivnějšímu vysušování chlebové kůrky. Během tohoto procesu dochází ke snížení vlhkosti a výraznému vzniku akrylamidu. Pro pečení je doporučeno použití etážových pecí, kde nedochází k výraznému vysušování. V domácích podmínkách je možné vstříkovat vodu během pečení a zajistit tak vyšší vlhkost, která vede k nižšímu obsahu akrylamidu v konečném produktu (Claus et al. 2008).

#### 3.6.3.1.4 Vliv agrotechnických faktorů na tvorbu akrylamidu v chlebu

V některých výzkumech bylo dokázáno, že cereálie z ekologického zemědělství obsahují vyšší hodnoty asparaginu než z konvenčního zemědělství. Jiné výzkumy vyvrátily vliv způsobu zemědělství na obsah asparaginu. Bylo ale dokázáno, že na obsah asparaginu má vliv použití hnojiv, zejména dusíkatých. Při použití obilnin, na které byla použita dávka 0 kg N/ha, bylo ve výsledném chlebu nalezeno 10,6 µg akrylamidu/kg. Oproti tomu při hnojení 220 kg N/ha chléb obsahoval 55,6 µg akrylamidu/kg. Bylo potvrzeno, že na obsah asparaginu mají vliv také klimatické faktory. Ve vzorcích pšenice a žita z roku 2004 byly nalezeny nižší obsahy asparaginu a následně také o 62 % méně akrylamidu než ve vzorcích z roku 2003. V roce 2003 bylo extrémní sucho a teploty byly v průměru o 2 °C vyšší než v roce 2004. Vlivem různých teplot může dojít k rozdílné aktivitě proteas (Claus et al. 2008).

#### 3.6.3.2 Redukce akrylamidu v cereálních výrobcích

Způsob redukce akrylamidu v bramborových a cereálních výrobcích se lehce liší z důvodu rozdílných zpracovatelských technologií a limitujících prekurzorů. Zatímco pro brambory jsou to redukující sacharidy, pro cereální výrobky je limitujícím prekurzorem označován asparagin (Claus et al. 2008, Halford 2019). I přes tento fakt hrají sacharidy v cereálních výrobcích významnou roli.

##### 3.6.3.2.1 Vliv cukru a kypřících látek na tvorbu akrylamidu

Studie ukázaly, že výměnou sirupu, který obsahuje invertní cukr, za sacharosu, vzniká v krekrech o 60 % méně akrylamidu. Podobná aktivita byla sledována i u perníku. Tento děj je vysvětlován nedostatkem reaktivních karbonylů (konkrétně fruktosy a glukosy), což vede k poklesu Maillardovy reakce. Oproti tomu jiné studie uvádí, že sacharosa tvoří přibližně stejné množství akrylamidu jako fruktosa a glukosa, jelikož vlivem vysokých teplot může docházet k rozpadu sacharosy na fruktosu a glukosu (Claus et al. 2008). Vass et al. (2018) zkoumali vliv

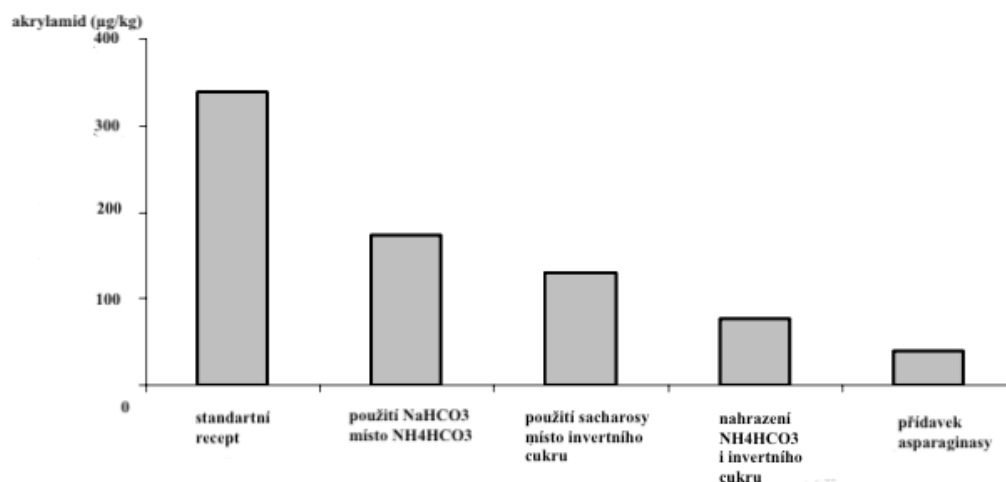
invertního cukru, sacharosy a také kypřidel  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  a  $\text{NaHCO}_3$  na tvorbu akrylamidu v pšeničných krekrech. Na obrázku 8 můžeme pozorovat změny obsahu akrylamidu při použití  $\text{NaHCO}_3$  místo  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  a sacharosy místo invertního cukru. Bylo zjištěno, že pokud byla v krekrech použita sacharosa místo sirupu, byl obsah akrylamidu snížen o 60 %. Při použití  $\text{NaHCO}_3$  místo  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  došlo k redukci akrylamidu o 50 %. Při kombinaci těchto dvou metod došlo k inhibici 77 % akrylamidu bez výrazné změny sensorických vlastností krekřů (Vass et al. 2018). Proto je doporučováno vyhýbat se používání sirupů a  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  ve sladkých cereálních produktech (Claus et al. 2008).

#### 3.6.3.2.2 Vliv přidání kyselin do cereálních výrobků

Použití  $\text{NaHCO}_3$  (známého jako jedlá soda) se zdá být ještě efektivnější při použití v kombinaci s citronovou kyselinou. Přídavek kyseliny podpoří uvolňování  $\text{CO}_2$  a sníží pH o ~30 % ( $\Delta \text{pH} \sim 1,5$ ), což způsobuje pokles tvorby akrylamidu bez ovlivnění sensorických vlastností konečného výrobku. Perníky s přídavkem těchto látek obsahovaly minimální množství akrylamidu. Přidání citronové kyseliny způsobilo pokles tvorby akrylamidu také během zpracování kukuřičných sucharů. Stejný efekt vykazovala také mléčná, vinná a chlorovodíková kyselina po přidání během výroby sušenek a krekřů. Redukce může nastat také po přidání aminokyselin. Pro tyto účely se používá zejména glycin, který se do těsta přidává před kynutím. Došlo tak k redukci 80-90 % akrylamidu (pokles z 202  $\mu\text{g}/\text{kg}$  na <25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) v chlebu. Při použití 10 g glycinu na 1 kg těsta došlo k redukci akrylamidu o 60 %. V jiném výzkumu byl povrch chleba posprejován 10% roztokem glycinu před pečením. Po jednorázové aplikaci postřiku nebyly pozorovány rozdíly v obsahu akrylamidu. Po opakovaném sprejování (8 $\times$ ) došlo k redukci pouze o 16 %. I přes to je použití roztoku glycinu efektivnější než optimalizace podmínek pečení (Amrein et al. 2007; Claus et al. 2008).

#### 3.6.3.2.3 Vliv přidání enzymu asparaginasy

Využití enzymu asparaginasy k redukci akrylamidu v pekařských produktech je také možné. Při použití tohoto enzymu během výroby pšeničných sušenek, dochází k poklesu obsahu akrylamidu o 70 % beze změn v barvě a chuti výsledného produktu (Claus et al. 2008; Vass et al. 2018). Po přidání asparaginasy do kukuřičných produktů byl pozorován pokles akrylamidu o 90 %. Při použití asparaginasy je asparagin hydrolyzován na asparagovou kyselinu, což vede ke snížení pH a inhibici tvorby akrylamidu (viz obrázek 7) (Claus et al. 2008; Vass et al. 2018). Při použití asparaginasy během přípravy chleba došlo k poklesu okolo 85 % (Vass et al. 2018). Používání enzymů pro redukci akrylamidu je oproti ostatním metodám redukce finančně náročné (Claus et al. 2008).



Obrázek 8: Vliv testovaných látek na redukci akrylamidu v pšeničných krekrech (Claus et al. 2008; Vass et al. 2018)

### 3.6.4 Panela

Panela je přírodní cukr, který je vyráběn intenzivní dehydratací třtinové šťávy bez použití centrifugace. Je známa jako nerafinovaný, necentrifugovaný třtinový cukr. Jedná se o ručně zpracovanou potravinu. Vyrábí se např. v latinské Americe, Karibiku, Asii a v některých afrických státech. Proces výroby umožňuje zachování většiny minerálů, vitaminů, fenolických sloučenin, aminokyselin i proteinů. Mimo tyto látky bylo v paneli nalezeno více než 26 bioaktivních zdraví prospěšných fytochemikálií. Tyto látky působí proti rakovině, jsou antitoxické a chrání buňky před nepříznivými jevy. Na druhou stranu panela obsahuje vysoké množství cukru (okolo 14 g/100 g) a dusíkatých látek (okolo 0,14 g/100 g). Maillardova reakce a karamelizace jsou tak hlavními procesy při zpracování panely, v jejichž důsledku vzniká akrylamid ve finálním produktu. Na trh je dodávána panela v bloku (s obsahem akrylamidu 540 µg/kg) nebo granulovaná (s obsahem akrylamidu 812 µg/kg). V různých vzorcích panely byly pozorovány hodnoty mezi 60-3058 µg akrylamidu/kg. V současné době nejsou stanoveny limity pro obsah akrylamidu v paneli.

Na tvorbu akrylamidu v paneli mají vliv agronomické faktory a fáze zralosti, ve které se třtina sklízí. Zralá třtina obsahuje vysoké hodnoty sacharosu a nízké glukosy. Při sklizni nezralé nebo použití dlouho skladované panely je narušen proces krystalizace, a dochází tak k prodloužení doby zahřívání při zpracování. To vede k vyššímu obsahu akrylamidu v konečném výrobku. Vypařování vody, ke kterému dochází během zpracování granulované panely, vede také ke zvýšenému obsahu akrylamidu (Gómez-Narváez et al. 2019).

### 3.6.5 Olivy

Světová produkce oliv v roce 2018 činila zhruba 2 660 500 tun/rok, přičemž hlavním producentem je Španělsko. Mezi nejvýznamnější španělské odrůdy oliv patří „Hojiblanca“, následuje „Manzanilla Sevillana“ a „Manzanilla Cacereña“ (Montaño et al. 2016; Fernández et al. 2020). Plod olivovníku je hořký, což je způsobeno přítomností fenolických sloučenin (zejména ortho-difenolu, oleuropeinu a jeho derivátů). Úprava oliv kalifornským stylem je účinná metoda, jak tuto hořkou chuť redukovat, proto je velmi užívaná, a to zejména při získání

černých stolních oliv (Charoenprasert et al. 2017). Touto metodou však v olivách vzniká velké množství akrylamidu (243-1349  $\mu\text{g}$  akrylamidu/kg v závislosti na odrůdě). Na trhu se objevují také jinak zpracované stolní olivy, např. olivy řeckého typu a olivy španělského typu. U takto zpracovaných oliv byly nalezeny nulové hodnoty akrylamidu (Montaño et al. 2016).

#### 3.6.5.1 Černé olivy kalifornského stylu (California-style black ripe olive CBRO)

Celý proces výroby začíná sklizní, která je zahájena před plným dozráním plodů. Hned po sklizni jsou olivy máčeny v solném roztoku (5-10% NaCl) po dobu 2-6 měsíců v závislosti na požadovaném konečném výrobku (Montaño et al. 2016; Charoenprasert et al. 2017). Následuje louhování a vymývání za přítomnosti NaOH, díky kterému olivy ztrácejí svou hořkou chuť (Martín-Vertedor et al. 2020). Během procesu louhování a vymývání díky přítomnosti vzduchu olivy černají. Zčernání je způsobeno oxidací a izomerací fenolických sloučenin. Celý tento louhovací proces je opakován 3-5 $\times$  a může trvat až 7 dní (Montaño et al. 2016; Charoenprasert et al. 2017). Jako stabilizátor černé barvy je použit glukonát železnatý (E579) (Martín-Vertedor et al. 2020). Během procesu louhování, vymývání a oxidace dochází k degradaci lipidů na glycerol a volné mastné kyseliny (Charoenprasert et al. 2017). Černé olivy jsou baleny nejčastěji v solných nálevech (4-6%), které obsahují i konzervanty (např. benzoát sodný a sorban draselný). I přes přidání konzervantů není výrobek mikrobiologicky stabilní a po zabalení je zapotřebí provést sterilizaci (při 121-125  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 15-30 minut). Právě během této fáze probíhá Maillardova reakce a přes kyselinu akrylovou za přítomnosti amoniaku vzniká akrylamid (Charoenprasert et al. 2017; Martín-Vertedor et al. 2020). Tento proces je popsán v kapitole 3.4.5.

Casado & Montaño (2008) byli první, kdo detekovali obsah akrylamidu v černých olivách. Během jejich výzkumu bylo v oxidovaných kalifornských olivách po sterilizaci naměřeno 243-1349  $\mu\text{g}$  akrylamidu/kg v závislosti na odrůdě. Dle Montaño et al. (2016) všechny studie uvádí, že odrůda Manzanilla de Sevilla obsahuje značně větší množství akrylamidu než Hojiblanca a Manzanilla Cacareña. Tento trend lze pozorovat také v následující tabulce 5. Pokročilými výzkumy bylo zjištěno, že přidavkem vybraných látek je možné obsah akrylamidu v olivách redukovat. Mezi tyto látky patří již zmiňované přírodní extrakty s vysokou antioxidační aktivitou (např. bambusové listy, extrakt ze zeleného čaje, rozmarýn a česnek). Využívána je také fenolická sloučenina hydroxytyrosol a nejčastěji používané aditivum při výrobě černých oliv je extrakt z listů olivovníku (OLE). Tato antioxidační aditiva se přidávají před tepelnou úpravou, tedy před sterilizací. V tabulce 5 můžeme pozorovat klesající koncentrace akrylamidu po přidavku vybraných fenolických sloučenin. Naopak přítomnost iontů vápníku v solném roztoku koreluje s vyšší hladinou akrylamidu ve finálním produktu s černými olivami, protože přítomný vápník zadržuje prekurzory akrylamidu (Martín-Vertedor et al. 2020).

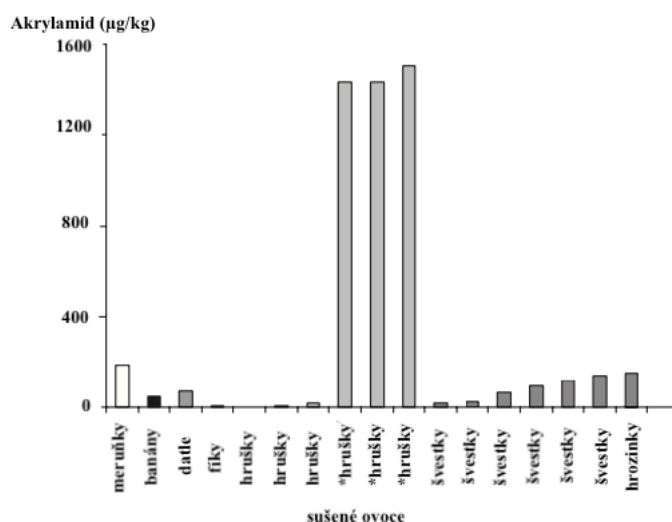


Tabulka 5: Obsah akrylamidu ve třech odrůdách oliv po sterilizaci s přidavkem vybraných fenolických sloučenin (Martín-Vertedor et al. 2020)

Použitá fenolická sloučenina	Akrylamid (ng/g) „Hojiblanca“	Akrylamid (ng/g) „Manzanilla Cacereña“	Akrylamid (ng/g) „Manzanilla de Sevilla“
Oxidované černé olivy (TC)	254,8 ±15,2	194,9±11,7	561,6±10,8
(TC) + hydroxytyrosol	221,7±8,58	161,6±10,7	542,8±11,1
(TC) + tyrosol	249,3±5,3	192,4±9,5	565,8±8,6
(TC) + oleuropein	241,7±4,5	195,6±12,1	568,9±5,3
(TC) + mix	218,1±8,7	167,2±5,9	547,2±10,1
(TC) + OLE (ředění 1:10)	165,6±4,8	120,7±8,2	402,7±6,7
(TC) + OLE (ředění 1:100)	224,2±8,1	170,5±9,8	540,4±7,1
(TC) + OLE (1:10) + hydroxytyrosol	101,9±8,7	72,0±5,1	317,9±7,6
(TC) + OLE (1:100) + hydroxytyrosol	208,9±7,4	155,8±6,7	505,4±12,5
(TC) + OLE (1:10) + tyrosol	119,8±2,6	90,6±6,7	346,7±5,4
(TC) + OLE (1:100) + tyrosol	201,3±9,2	158,0±7,4	496,8±11,4
(TC) + OLE (1:10) + oleuropein	114,7±6,4	80,7±6,5	341,8±8,2
(TC) + OLE (1:100) + oleuropein	193,6±5,1	144,1±4,9	506,7±6,5
(TC) + OLE (1:10) + mix	142,7±6,4	100,1±7,9	375,8±9,3
(TC) + OLE (1:100) + mix	183,5±7,6	131,3±9,2	489,7±7,1

### 3.6.6 Sušené ovoce

Mimo oliv se akrylamid objevuje také v dalších druzích sušeného ovoce. Dle Amrein et al. (2007) byl výrazně nejvyšší obsah akrylamidu naměřen v německé specialitě „Weichspeckbirnen“. Jedná se o sušené černé celé hrušky. Bylo zkoumáno 6 vzorků těchto hrušek a byly naměřeny hodnoty akrylamidu 500, 990, 1070, 1430, 2760 a 4710 µg/kg. Na obrázku 9 můžeme pozorovat naměřené hodnoty také v dalším vybraném ovoci. Jeden sloupec znázorňuje vždy průměr z dvou naměřených hodnot daného sušeného ovoce. Za zmínku stojí také obsah akrylamidu v sušených meruňkách, který byl průměrně 180 µg/kg (Amrein et al. 2007).



Obrázek 9: Obsah akrylamidu ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) ve vybraných druzích sušeného ovoce (\*německé sušené hrušky „Weichspeckbirnen“) (Amrein et al. 2007)

### 3.7 Zdravotní rizika vznikající konzumací akrylamidu

Obecně je velmi těžké zjistit, jaké přesné účinky má akrylamid na lidský organismus. Výzkumy jsou prováděny především na zvířatech, která mají rozdílný metabolismus než lidé. Výsledky, týkající se lidí, vycházejí především z epidemiologických studií, které se zaměřují na různé populace (Riboldi et al. 2014; Matoso et al. 2018).

Mimo potravinářství se s akrylamidem můžeme setkat také ve vodním prostředí, kam uniká z jiných odvětví průmyslu. V průmyslu je hojně používán polyakrylamid, který toxický není, ale zřejmě je znečištěn malým množstvím rozpustného monomeru akrylamidu, který známky toxicity vykazuje (Pennisi et al. 2013; Halford 2019). Proto polyakrylamid, který se používá při úpravách pitné vody, může znečišťovat vodu akrylamidem, který poté působí jako vodní polutant a hrozí jeho příjem lidským organismem. WHO (World Health Organization) stanovila maximální povolený obsah akrylamidu ve vodě na  $0,5 \mu\text{g}/\text{l}$  s tím, že by měl být obsah akrylamidu snížen na maximální nejnižší hodnotu, jak je to technicky možné. Ve volné přírodě je akrylamid rozložen za přítomnosti mikroorganismů, a nedochází tak ke kumulaci v jezerech ani půdě. Průmyslově se akrylamid používá také v komponentech na stavbách. Pracovníci jsou tak vystaveni jeho působení (Halford 2019).

Dle výzkumů může akrylamid v přítomnosti jeho metabolitu glycidamidu působit genotoxicky a karcinogenně (Erkekoglu & Baydar 2014). V lidském organismu byly pozorovány známky neurotoxicity, u zvířat se objevil účinek mutagenní a karcinogenní (Riboldi et al. 2014). Zvýšený obsah akrylamidu v krvi byl pozorován také u kuřáků (Halford 2019).

#### 3.7.1 Příjem a metabolismus akrylamidu

Nejčastěji se akrylamid do organismu dostane po orálním požití (tzn. stravou, kontaminovanou vodou), dále kožním stykem a vdechnutím (prachu nebo výparů) (Pennisi et al. 2013; Matoso et al. 2019). K vdechnutí akrylamidu může dojít na stavbách nebo kouřením

tabáku, kde akrylamid vzniká pyrolýzou. Dle švédské studie je u kuřáků hlavním zdrojem přijímaného akrylamidu kouření tabáku. Příjem z potravin je v tomto případě uváděn až na druhém místě. V cigaretovém kouři z jedné cigarety je obsaženo ~ 1,1-2,34 µg akrylamidu. Vdechnutý akrylamid se naváže na hemoglobin a poškozuje především plíce (Erkekoglu & Baydar 2014; Matoso et al. 2019). Při vniku akrylamidu do organismu orálně potravou, působí toxicky na játra a cévní systém. Jelikož akrylamid může do organismu vnikat také skrze kůži, byly stanoveny maximální hodnoty akrylamidu pro kosmetiku. Výrobky pro péči o tělo mohou obsahovat <0,1 ppm a ostatní kosmetické produkty <0,5 ppm (Erkekoglu & Baydar 2014).

Akrylamid je lehce distribuován krevním řečištěm v lidském i zvířecím organismu díky jeho polaritě a nízké molekulové hmotnosti (Claus et al. 2008; Stadler 2012). Kritickou a obávanou látkou je zejména metabolit akrylamidu zvaný glycidamid, který byl nalezen při *in vivo* i *in vitro* pokusech (Matoso et al. 2018). Při nízkých dávkách je 50 % akrylamidu metabolizováno na toxický glycidamid za přítomnosti cytochromu 2E1 (CYP2E1). Při vyšších dávkách je na glycidamid biotransformováno 13 % akrylamidu (Erkekoglu & Baydar 2014; Matoso et al. 2018).

Přítomnost akrylamidu byla nalezena v brzlíku, játrech, srdci, mozku a ledvinách. U krys byla nalezena nejvyšší koncentrace akrylamidu ve svalech (48 %), dále pak v kůži (15 %), krvi (12 %), játrech (7 %) a méně než 1 % v mozku a míše. Pokud se jednalo o kojící a těhotnou ženu/samici, akrylamid byl schopen projít pupeční šňůrou a byl nalezen také v mateřském mléce (Claus et al. 2008; Matoso et al. 2018).

Akrylamid i glycidamid reagují s glutathionem za působení enzymu glutathion-S-transferasy. Glutathion tvoří adukty, které jsou v játrech přeměněny na merkapturovou kyselinu, která je vylučována močí. Tato kyselina byla nalezena v moči pracovníků, jejichž práce zahrnuje kontakt s akrylamidem. Malé množství může být přítomno také ve výkalech nebo vydechovaném vzduchu (Claus et al. 2008; Stadler 2012; Pennisi et al. 2013; Riboldi et al. 2014; Matoso et al. 2018; Halford 2019).

Akrylamid a glycidamid jsou schopny se vázat na nukleofilní konce proteinů, zejména valinu, který je součástí hemoglobinu. Pro určení, k jak velké expozici akrylamidu došlo, se používá kvantifikace akrylamid-hemoglobinového aduktu z odběrů krevních vzorků postižených osob. Pracovníci, u kterých byla pozorována přítomnost akrylamidu v krvi, vykazovali také známky postižení periferní nervové soustavy (Matoso et al. 2018; Halford 2019).

### 3.7.2 Karcinogenita

Již v 70. a 80. letech 20. století vedly výsledky výzkumů k tomu, že akrylamid způsobuje karcinogenní účinky. Ty se projevíly vznikem nádorů u krys (Bethke & Bussan 2013). Na základě *in vitro* výzkumů a pokusech na zvířatech byl akrylamid zařazen mezi potenciální karcinogen pro lidskou populaci (Stadler 2012). Toxikologické studie s akrylamidem jsou prováděny na široké škále živočichů zahrnující např. krysy, myši, morčata, primáty, kočky a psy (Halford 2019). Denní dávky akrylamidu na těchto pokusných organismech se pohybovaly v rozmezí 0,5-50 mg/kg (nejčastěji 5, 10, 15, 30 a 50 mg/kg/den). Dle výzkumů jsou pro člověka tyto koncentrace také neurotoxické (Pennisi et al. 2013; Matoso et al. 2018). Letální dávky, které způsobily smrt 50 % testovaných jedinců (LD50) byly zjištěny v rozmezí hodnot

107-251 mg/kg pro krysy, 107-170 mg/kg pro myši, 150-180 mg/kg pro morčata a 150 mg/kg pro králíky (Erkekoglu & Baydar 2014).

Krysy byly krmeny po dobu 1-2 měsíců smaženým (na 200 °C) zvířecím žrádlem. U těchto jedinců byla pozorována výrazně vyšší hladina akrylamid-hemoglobinového aduktu v krvi než u kontrolní skupiny (Matoso et al. 2018; Halford 2019). Již při dávkování 2 mg/kg byl u krys pozorován výrazný nárůst tumorů štítné žlázy, varlat, CNS a dělohy (Riboldi et al. 2014). Při pokusech na dalších hlodavcích, které byly vystaveny akrylamidu, byl pozorován výskyt rakoviny plic, kůže a pankreatu (ALjahdali & Carbonero 2019).

Co se týče lidských studií, tak dle švédských studií místní populace nebyly nalezeny žádné souvislosti mezi akrylamidem přijatým stravou a nádory močového měchýře, střev, ledvin, hrtanu, hltanu, prsou a vaječnicků. I přes tyto studie zůstává akrylamid považován za potenciální lidský karcinogen a jeho obsah v potravinách je sledován. Měl by být co nejnižší (Claus et al. 2008; Stadler 2012).

### 3.7.3 Mutagenita

Při výzkumech ze 70. a 80. let minulého století bylo zjištěno, že vystavení akrylamidu může působit také mutageně. Glycidamid je schopen reagovat s molekulami DNA za vzniku aduktů s purinovými bázemi (Matoso et al. 2019). Způsobuje chromozomální vady, konkrétně chromozomální aberace v morku a v zárodečných buňkách myši (Claus et al. 2008; Bethke & Bussan 2013). Při této mutaci dochází k narušení dvoušroubovice DNA (Iliakis et al. 2004). Jedná se zejména o výměnu adeninu s guaninem a guaninu s cytosinem (Claus et al. 2008).

### 3.7.4 Neurotoxicita

Výzkumů, které by dokazovaly, že je akrylamid pro člověka neurotoxický, je velmi omezené množství. Při industriálním využití akrylamidu dochází ke znečištění prostředí nejčastěji monomerním akrylamidem, a proto jsou nejvíce ohroženou skupinou osoby pracující ve stavebnictví, uhelných dolech, továrnách na výrobu syntetického akrylamidu a stavitelé tunelů. Při subchronické expozici akrylamidem je ovlivněn především periferní nervový systém, ale může být postižen také centrální nervový systém. Některé studie uvádí, že při nadměrném působení akrylamidu na organismus dochází nejprve k poškození sensorických axonů a jejich receptorů, jiné potvrzují primární poškození autonomických a motorických axonů. Tyto studie se nicméně shodnou na tom, že akrylamid vykazuje neurotoxický účinek. Neurotoxické účinky akrylamidu jsou kumulativní a míra poškození axonů je závislá na jeho dávce (Pennisi et al. 2013).

Po opakované expozici akrylamidu byla pozorována degenerace periferních i mozkových nervů (konkr. v mozkové kůře, hypotalamu a hipokampu). Není zcela znám mechanismus, jak dochází k neurotoxickým účinkům, ale jsou předpokládány tyto tři cesty: inhibice axonálního transportu (který je založen na činnosti kinezinu), změna hladiny neurotransmiterů a přímá inhibice neurotransmiterů. Inhibice axonálního transportu se projevuje působením akrylamidu na koncích nervů (axonech), kde způsobuje dysfunkci synapsí, a tím tak degeneraci celého nervu. Poškození, které způsobuje v PNS i CNS, se projevuje poruchami motorických, sensorických a autonomních schopností (Erkekoglu & Baydar 2014; Matoso et al. 2019).

Symptomy se objeví několik týdnů po kontaktu s akrylamidem. Mezi první příznaky patří vyrážka, loupání pleti a pocení. Při subchronické expozici dochází ke slabosti svalů, sensitivitě očí na světlo, ztrátě rovnováhy a ataxii (poruše koordinace pohybů, ztrátě kontroly nad vlastními pohyby). Výpary způsobují také ochrnutí cerebrospinálního systému, v jehož důsledku může docházet k necitlivosti končetin, což patří mezi významné projevy otravy akrylamidem. Expozice může dále způsobit parestézii (brnění) a křeče dolních končetin, závrať, nystagmus (kmitavý pohyb očí). Těmito problémy trpělo jen malé množství pacientů (Pennisi et al. 2013; Matoso et al. 2019).

Bylo zjištěno, že vysoké dávky akrylamidu u zvířat způsobují celou řadu účinků na nervový systém (Riboldi et al. 2014). Výzkumy ukázaly strukturální změny mozkové kůry novorozenečích krys. Těmto změnám se dá zabránit použitím antioxidantu vitamínu C. Zvýšené dávky akrylamidu způsobily vzrůst obsahu dopaminu a změnu v jeho transportu tělem. Byla snížena také exprese genů, které ovlivňují dopaminergní neurony. Zvýšení obsahu dopaminu vedlo ke snížení serotoninu v mozcích krys při dávce 50 mg akrylamidu/kg/den (Matoso et al. 2019).

### **3.7.5 Vliv na plodnost**

Akrylamid snadno prochází placentou matky do potomka. Je možné, že má negativní vliv na vývoj plodu. Toto ale nebylo přímo dokázáno. Některé výzkumy ukázaly možný negativní vliv přijatého akrylamidu na hladiny ženských hormonů a ženskou reprodukci (Stadler 2012; Halford 2019). Byl pozorován karcinom vaječníků a endometria u žen s menopauzou (Hirvonen et al. 2010; Stadler 2012; Riboldi et al. 2014). U samic, které byly krmeny stravou bohatou na akrylamid po dobu šesti týdnů, došlo k redukci váhy vaječníků a snížil se počet oocytů. Redukce intenzity metylace DNA a histonů mělo vliv na snížení kvality oocytů a související plodnost (Matoso et al. 2019).

Maximální doporučený denní příjem akrylamidu pro těhotné ženy je 33,7 µg. Reálná průměrná hodnota příjmu u těhotných žen v moči činila 11,2 µg/den (hodnoty v rozpětí 3,3-75,6 µg/den). Jelikož je předpokládáno, že močí se z těla dostane přibližně 55 % z celkově přijatého akrylamidu, denní příjem by tak činil 20,3 µg akrylamidu, což splňuje doporučenou hodnotu. Bylo zjištěno, že hlavními zdroji akrylamidu u těhotných žen jsou bramborové lupínky, křupavý chleba, cereálie a bramborové produkty (Semla et al. 2016).

### **3.7.6 Prevence**

Působení akrylamidu se může předcházet ochranou kůže – nošením dlouhých rukavic, zakrytím hlavy, použitím obličejových štítů a nošením omyvatelných oděvů. Vdechnutí akrylamidu lze zabránit nošením masky. Při práci v prostředí, kde se objevuje akrylamid, je doporučeno pravidelné sledování zdravotního stavu pracovníků. Před jeho negativními účinky se můžeme chránit také použitím různých látek, jako jsou např. polyfenoly, vitamin B6, lipová kyselina, L-karnitin a jeho deriváty, resveratrol a melatonin. Tyto látky chrání před neurotoxickými účinky akrylamidu zejména díky mechanismu antioxidantní aktivity. Již zmiňovaný NaHSO<sub>3</sub> je také významným antioxidantem, který napomáhá inhibovat tvorbu meziproduktů, které vedou ke vzniku akrylamidu (Pennisi et al. 2013).

## Závěr

- Akrylamid vzniká tepelnou úpravou nad 120 °C jako je pečení, smažení a grilování. Po úpravě vařením nebyl akrylamid detekován. V syrové potravine není obsažen akrylamid, ale pouze jeho prekurzory, což jsou redukující sacharidy (nejčastěji glukosa) a aminosloučeniny (nejčastěji aminokyselina asparagin). Vzniká potravinářsky nejvýznamnější Maillardovou reakcí, kdy mimo akrylamidu vznikají další toxické kontaminanty potravin (např. HMF a furfural). Mimo Maillardovu reakci může akrylamid vznikat také při přehřátí oleje nad kouřový bod, kdy glycerol vlivem vysokých teplot degraduje na akrolein, který oxiduje na kyselinu akrylovou a za přítomnosti dusíkaté látky (nejčastěji amoniaku) vzniká akrylamid.
- Akrylamid se nachází ve velkém množství tepelně zpracovaných potravin a jeho konzumace při vyvážené pestré stravě je nevyhnutelná. Největší koncentrace obsahují potraviny s vysokým obsahem sacharidů. Jedná se tedy o bramborové a cereální výrobky, do kterých spadají i dětské příkrmy a lidský organismus je tak akrylamidu vystavován již od útlého věku. Akrylamid se objevuje také v kávě, čaji, černých stolních olivách nebo sušených plodech. Bylo zjištěno, že nejvyšší množství akrylamidu přijímáme právě v podobě cereálních výrobků.
- V 90. letech minulého století byl akrylamid ze strany IARC zařazen do skupiny 2A (možný karcinogen). Rozsáhlé studie a výzkumy ukázaly, že akrylamid na zvířatech (nejčastěji krysách) vykazuje karcinogenní a mutagenní účinky. Akrylamid mimo potravinářství najdeme také např. ve stavebním průmyslu ve formě netoxického polyakrylamidu. Dochází však k uvolňování toxického akrylamidu a na zdejší pracovníky tak působí neurogenně. Švédské studie ukázaly jeho přítomnost také v cigaretách. Tvrdí, že pro kuřáky není hlavním zdrojem akrylamidu strava, ale právě kouření. Přes obavy, že akrylamid může v lidském organismu působit karcinogenně se zdá, že pouze stravou se tohoto negativního účinku nedá dosáhnout. I přes to byly stanoveny limity s maximálními obsahy akrylamidu pro jednotlivé kategorie potravin.
- K dodržování předepsaných limitů bylo zapotřebí vést výzkumy zabývající se inhibicí akrylamidu v potravinách. Jednou z možností je úprava technologických postupů, jako je teplota a délka pečení. Využívá se také přísad různých aditiv. V cereálních výrobcích je nejvíce užíván přísad droždí. Možné je také použití enzymu asparaginasy. Široce zkoumaným aditivem jsou antioxidanty, konkrétně chemické sloučeniny polyfenoly. Využívají se přednostně přírodní extrakty nejčastěji z bambusových listů, bylin a ovoce. Jejich výhodou je, že nenarušují sensorické vlastnosti produktu a jsou spotřebiteli kladně přijímány.

## 4 Literatura

- ALjahdali N, Carbonero F. 2019. Impact of Maillard reaction products on nutrition and health: Current knowledge and need to understand their fate in the human digestive system. **59**:474-487. DOI: 10.1080/10408398.2018.1378865.
- Amrein TM, Andres L, Escher F, Amadó R. 2007. Occurrence of acrylamide in selected foods and mitigation options. *Food Additives and Contaminants* **24**:13–25. DOI: 10.1080/02652030701242558.
- Anese M. 2016. Acrylamide in Coffee and Coffee Substitutes. Page Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects. DOI: 10.1016/B978-0-12-802832-2.00009-7.
- Bagdonaite K, Viklund G, Skog K, Murkovic M. 2006. Analysis of 3-aminopropionamide: A potential precursor of acrylamide. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods* **69**:215–221. DOI: 10.1016/j.jbbm.2006.05.008.
- Bertuzzi T, Martinelli E, Mulazzi A, Rastelli S. 2020. Acrylamide determination during an industrial roasting process of coffee and the influence of asparagine and low molecular weight sugars. *Food Chemistry* **303**:125372. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125372.
- Bethke PC, Bussan AJ. 2013. Acrylamide in Processed Potato Products. *American Journal of Potato Research* **90**:403–424. DOI: 10.1007/s12230-013-9321-4.
- Charoenprasert S, Zweigenbaum JA, Zhang G, Mitchell AE. 2017. The Influence of pH and Sodium Hydroxide Exposure Time on Glucosamine and Acrylamide Levels in California-Style Black Ripe Olives. *Journal of Food Science* **82**:1574–1581. DOI: 10.1111/1750-3841.13748.
- Claus A, Carle R, Schieber A. 2008. Acrylamide in cereal products: A review. *Journal of Cereal Science* **47**:118–133. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.06.016.
- Curtis TY, Postles J, Halford NG. 2014. Reducing the potential for processing contaminant formation in cereal products. *Journal of Cereal Science* **59**:382–392. DOI: 10.1016/j.jcs.2013.11.002.
- Erkekoglu P, Baydar T. 2014. Acrylamide neurotoxicity. *Nutritional Neuroscience* **17**: 49-57. DOI: 10.1179/1476830513y.0000000065.
- Fernández A, Talaverano MI, Pérez-Nevado F, Boselli E, Cordeiro AM, Martillanes S, Foligni R, Martín-Vertedor D. 2020. Evaluation of phenolics and acrylamide and their bioavailability in high hydrostatic pressure treated and fried table olives. *Journal of Food Processing and Preservation* **44**:1–9. DOI: 10.1111/jfpp.14384.
- Gökmen V. 2015. Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects. Academic Press. Department of Food Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey.
- Gómez-Narváez F, Mesías M, Delgado-Andrade C, Contreras-Calderón J, Ubillús F, Cruz G, Morales FJ. 2019. Occurrence of acrylamide and other heat-induced compounds in panela: Relationship with physicochemical and antioxidant parameters. *Food Chemistry*

301:125256. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125256.

- Granvogl M, Schieberle P. 2007. Quantification of 3-aminopropionamide in cocoa, coffee and cereal products: CCCorrelation with acrylamide concentrations determined by an improved clean-up method for complex matrices. *European Food Research and Technology* **225**:857–863. DOI:10.1007/s00217-006-0492-9.
- Halford NG. 2019. Chapter 4: New European risk management measures and prospects for reducing the acrylamide-forming potential of wheat. Pages 27-43. Granvogl M, MacMahon, editors. *Food-born toxicants: Formation, analysis, and toxicology*. ACS Symposium Series; American Chemical Society, Washington, DC.
- Hirvonen T et al. 2010. Dietary acrylamide intake and the risk of cancer among Finnish male smokers. *Cancer Causes and Control* **21**:2223–2229. DOI: 10.1007/s10552-010-9642-2.
- Iliakis G, Wang H, Perrault AR, Boecker W, Rosidi B, Windhofer F, Wu W, Guan J, Terzoudi G, Panteliasc G. 2004. Mechanisms of DNA double strand break repair and chromosome aberration formation. *Cytogenetic and Genome Research* **104**:14–20. DOI: 10.1159/000077461.
- Jin C, Wu X, Zhang Y. 2013. Relationship between antioxidants and acrylamide formation: A review. *Food Research International* **51**:611–620. DOI: 10.1016/j.foodres.2012.12.047.
- Jing Y, Li X, Hu X, Ma Z, Liu L, Ma X. 2019. Effect of buckwheat extracts on acrylamide formation and the quality of bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **99**:6482–6489. DOI: 10.1002/jsfa.9927.
- Keramat J, LeBail A, Prost C, Jafari M. 2011. Acrylamide in Baking Products: A Review Article. *Food and Bioprocess Technology* **4**:530–543. DOI: 10.1007/s11947-010-0495-1.
- Kumar H, Choudhary N, Garg V, Swami NK, Seth R. 2013. Maillard Browning : Pros and Cons in Dairy and Food Industries **2**:9–18. DOI: 10.37591/jjrodst.v2i2.853.
- Lineback DR, Coughlin JR, Stadler RH. 2012. Acrylamide in Foods: A Review of the Science and Future Considerations. *Annual Review of Food Science and Technology* **3**:15–35. DOI: 10.1146/annurec-food-022811-101114.
- Liu Y, Wang P, Chen F, Yuan Y, Zhu Y, Yan H, Hu X. 2015. Role of plant polyphenols in acrylamide formation and elimination. *Food Chemistry* **186**:46–53. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.03.122.
- Luning P, Sanny M. 2016. Acrylamide in Fried Potato Products. Page Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects. DOI: 10.1016/B978-0-12-802832-2.00008-5.
- Martín-Vertedor D, Fernández A, Hernández A, Arias-Calderón R, Delgado-Adámez J, Pérez-Nevado F. 2020. Acrylamide reduction after phenols addition to Californian-style black olives. *Food Control* **108**:106888. DOI: 10.1016/j.foodcont.2019.106888.
- Matoso V, Bargi-Souza P, Ivanski F, Romano MA, Romano RM. 2019. Acrylamide: A review about its toxic effects in the light of Developmental Origin of Health and Disease (DOHaD) concept. *Food Chemistry* **283**:422–430. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.054.



- Matthäus B, Haase NU. 2016. Chapter 20: Acrylamide in ready-to-eat foods. Pages 353–382 in Kotzekidou P, editors. *Food Hygiene and Toxicology in Ready-to-Eat Foods*. Academic Press, Greece.
- Mesías M, Morales FJ. 2016. Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines. *Journal of Food Composition and Analysis* **48**:8–12. DOI: 10.1016/j.jfca.2016.02.005
- Mesías M, Sáez-Escudero L, Morales FJ, Delgado-Andrade C. 2019. Reassessment of acrylamide content in breakfast cereals. Evolution of the Spanish market from 2006 to 2018. *Food Control* **105**:94–101. DOI: 10.1016/j.foodcont.2019.05.026.
- Michalak J, Gujska E, Kunczewicz A. 2013. RP-HPLC-DAD studies on acrylamide in cereal-based baby foods. *Journal of Food Composition and Analysis* **32**:68–73. DOI: 10.1015/j.jfca.2013.08.006
- Montaño A, Casado FJ, Carle R. 2016. Acrylamide in Table Olives. Page Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects. DOI: 10.1016/B978-0-12-802832-2.00012-7.
- Nachi I, Fhoula I, Smida I, Ben Taher I, Chouaibi M, Jaunbergs J, Bartkevics V, Hassouna M. 2018. Assessment of lactic acid bacteria application for the reduction of acrylamide formation in bread. *Lwt* **92**:435–441. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.02.061.
- Nařízení Komise (EU) 2017/2158 ze dne 20. listopadu 2017, kterým se stanoví zmírňující opatření a porovnávací hodnoty pro snížení přítomnosti akrylamidu v potravinách. Brusel.
- Nursten, H E. 2005. *The Maillard reaction: chemistry, biochemistry and implications*. Cambridge: Royal Soc. of Chemistry.
- Pedreschi F, Mariotti MS, Granby K. 2014. Current issues in dietary acrylamide: Formation, mitigation and risk assessment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **94**:9–20. DOI: 10.1002/jsfa.6349.
- Pennisi M, Malaguarnera G, Puglisi V, Vinciguerra L, Vacante M, Malaguarnera M. 2013. Neurotoxicity of acrylamide in exposed workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **10**:3843–3854. DOI: 10.3390/ijerph10093843.
- Przygodzka M, Piskula MK, Kukurová K, Ciesarová Z, Bednarikova A, Zieliński H. 2015. Factors influencing acrylamide formation in rye, wheat and spelt breads. *Journal of Cereal Science* **65**:96–102. DOI: 10.1016/j.jcs.2015.06.011.
- Riboldi BP, Vinhas AM, Moreira JD. 2014. Risks of dietary acrylamide exposure: A systematic review. *Food Chemistry* **157**:310–322. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.02.046.
- Sakač M, Đilas S, Jovanov P. 2018. The influence of polyphenols on the formation of free radicals detected in maillard reaction model systems. *Food and Feed Research* **45**:187–192. DOI: 10.5937/ffr1802187s.
- Semla M, Goc Z, Martiniaková M, Omelka R, Formicki G. 2017. Acrylamide: A common food toxin related to physiological functions and health. *Physiological Research* **66**:205–217.

DOI: 10.33549/physiolres.933381.

- Sirot V et al. 2019. French infant total diet study: Dietary exposure to heat-induced compounds (acrylamide, furan and polycyclic aromatic hydrocarbons) and associated health risks. *Food and Chemical Toxicology* **130**:308–316. DOI: 10.1016/j.fct.2019.05.009.
- Stadler RH. 2012. Heat-generated toxicants in foods: Acrylamide, MCPD esters and furan. Page *Chemical Contaminants and Residues in Food*. DOI: 10.1533/9780857095794.2.201.
- Tripathi J, Variyar PS, Singhal RS, Sharma A. 2015. Radiation Processing for Sprout Inhibition of Stored Potatoes and Mitigation of Acrylamide in Fries and Chips. Page *Processing and Impact on Active Components in Food*. DOI: 10.1016/B978-0-12-404699-3.00011-1.
- Vass M, M Amrein T, Schönbacher B, Escher F, Amadò R. 2018. Ways to reduce the acrylamide formation in cracker products. *Czech Journal of Food Sciences* **22**:S19–S21. DOI: 10.17221/10603-cjfs.
- Velíšek J, Hajšlová J. 2009. *Chemie potravin. Rozš. a přeprac. 3. vyd. Osis. Tábor.*
- Wu H, Zheng J, Zhang G, Huang C, Ou S. 2018. The Formation of Acrylamide from and Its Reduction by 3-Aminopropanamide Occur Simultaneously During Thermal Treatment. *Journal of Food Science* **83**:2662–2668. DOI: 10.1111/1750-3841.14355.
- Xu Y, Cui B, Ran R, Liu Y, Chen H, Kai G, Shi J. 2014. Risk assessment, formation, and mitigation of dietary acrylamide: Current status and future prospects. *Food and Chemical Toxicology* **69**:1–12. DOI: 10.1016/j.fct.2014.03.037.
- Yuan Y, Shu C, Zhou B, Qi X, Xiang J. 2011. Impact of selected additives on acrylamide formation in asparagine/sugar Maillard model systems. *Food Research International* **44**:449–455. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.09.025.