Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická

Sorpce vlhkosti prášku z plodů trnky obecné (*Prunus spinosa*) s přídavky polysacharidů

Diplomová práce

Bc. Eliška Dvořáková

Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Eliška Dvořáková
Osobní číslo:	C22333
Studijní program:	N0531A130030 Hodnocení a analýza potravin
Téma práce:	Sorpce vlhkosti prášku z plodů trnky obecné (<i>Prunus spinosa</i>) s přídavky polysacharidů
Téma práce anglicky:	Moisture sorption of blackthorn powder supplemented with polysac- charides
Zadávající katedra:	Katedra analytické chemie

Zásady pro vypracování

Vypracujte teoretickou část diplomové práce. Charakterizujte botanicky trnku obecnou, rešerší v databázích odborných periodik zjistěte chemické složení plodů tmky obecné, využití v potravinářství, lékařství/léčitelství. Uveďte benefity využití rostlinného materiálu v práškové formě ve výživě, potravinářství. Vysvětlete principy sorpce-desorpce vlhkosti u potravin, tvorby sorpčních izoterem a metod měření.

2. Připravte vzorky prášku s přídavky polysacharidů a stanovte jejich sorpční vlastnosti s využitím dynamické sorpce vodních par.

3. Získaná data zpracujte vhodnými statistickými metodami a diskutujte vhodnost použití jednotlivých polysacharidů. Srovnejte s dostupnými daty v zahraničních odborných publikacích. Rozsah pracovní zprávy: Rozsah grafických prací: Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam doporučené literatury:

Podle pokynů vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libor Červenka, Ph.D. Katedra analytické chemie

Datum zadání diplomové práce: 7. února 2024 Termín odevzdání diplomové práce: 10. května 2024

L.S.

doc. Ing. Petr Česla, Ph.D. v.r. vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r. děkan

V Pardubicích dne 20. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem "Sorpce vlhkosti prášku z plodů trnky obecné (*Prunus spinosa*) s přídavky polysacharidů" jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 5. 2024

Bc. Eliška Dvořáková v. r.

Poděkování

Ráda bych poděkovala především vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Liboru Červenkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu, pomoc, a vstřícný přístup při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat celé své rodině, přátelům a mému přítelovi za trpělivost a podporu během celého studia.

ANOTACE

Práce se zabývá charakterizací vlastností a adsorpčního chování lyofilizovaných prášků z plodů trnky obecné s přídavky inulinu, maltodextrinu a chitosanu (5, 15, 30 a 50 % (m/m)). Charakterizace byla provedena pomocí měření barevnosti, infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a skenovací elektronové mikroskopie. Největší vliv na změnu barvy měly přídavky chitosanu, u kterých dosáhl parametr celkového rozdílu barevnosti ΔE^* hodnoty 26,90 \pm 0,09. v infračervených spektrech byly u přídavků 30 a 50 % (m/m) v oblasti 1200-900 cm⁻¹ pozorovatelné charakteristické pásy pro přidávané polysacharidy. Na snímcích ze skenovací elektronové mikroskopie byly pozorovatelné drobné rozdíly v morfologii částic (ve velikosti a tvaru okrajů). Pro matematický popis sorpčních izoterm vyhovovala nejlépe rovnice dle Knaniho. s množstvím přidaného polysacharidu klesal obsah rovnovážné vlhkosti, zejména u chitosanu a maltodextrinu, v intervalu 0,5-0,9 a_w. Žádný z polysacharidů neměl vliv na zvýšení obsahu vlhkosti v první monomolekulární vrstvě ve srovnání se vzorkem bez přídavku.

KLÍČOVÁ SLOVA

lyofilizace, barevnost, adsorpce vlhkosti, rychlost adsorpce, izoterma

TITLE

Moisture sorption of blackthorn powder supplemented with polysaccharides

ANNOTATION

The study focuses on the characterization of properties and adsorption behavior of freeze-dried powders from blackthorn fruits with additions of inulin, maltodextrin, and chitosan (at concentrations of 5%, 15%, 30%, and 50% *w/w*). Characterization was carried out using colour measurement, Fourier-transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy. Among the additives, chitosan had the most significant impact on colour change, with a total colour difference parameter (ΔE^*) reaching 26.90 ± 0.09. In the infrared spectra, characteristic bands related to the added polysaccharides were observed in the 1200-900 cm⁻¹ range for the 30% and 50% (*w/w*) additions. Scanning electron microscopy images revealed subtle differences in particle morphology (size and edge shape). For mathematical description of sorption isotherms, the equation proposed by Knani provided the best fit. As the amount of added polysaccharide increased, the equilibrium moisture content decreased, particularly for chitosan and maltodextrin, within the 0.5-0.9 a_w range. None of the polysaccharides influenced moisture content in the first monomolecular layer compared to the sample without additives.

KEYWORDS

freeze-drying, colour, moisture adsorption, adsorption rate, isotherm

OBSAH

SEZNAM	ZKRATEK	9
SEZNAM	OBRÁZKŮ	10
SEZNAM	TABULEK	11
SEZNAM	GRAFŮ	12
ÚVOD		
1. TEO	RETICKÁ ČÁST	14
1.1 Trn	ka obecná	14
1.1.1	Výskyt	15
1.1.2	Obsah biologicky aktivních látek a jejich využití	15
1.1.3	Funkční vlastnosti plodů z trnky obecné	16
1.2 Sac	haridy	18
1.2.1	Vláknina	20
1.2.2	Maltodextrin	22
1.2.3	Inulin	23
1.2.4	Chitosan	25
1.3 Sor	pční izotermy	27
1.3.1	Měření sorpčních izoterm	
1.3.2	Matematický popis sorpčních izoterem	
1.4 Lyc	ofilizace	
1.5 Infi	račervená spektroskopie	41
1.5.1	Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací	43
1.6 Mě	ření barevnosti	45
2. EXP	ERIMENTÁLNÍ ČÁST	51
1.7 Přís	stroje a pomůcky	51
1.8 Vze	orky	51
1.9 Pří _l	prava vzorků	52

	1.10 Měření barevnosti	4
	1.11 ATR-FTIR spektrometrie	5
	1.12 Skenovací elektronová mikroskopie52	5
	1.13 Měření adsorpce vlhkosti	6
	1.13.1 Adsorpční izotermy	6
	1.13.2 Rychlost adsorpce vlhkosti	7
3.	VÝSLEDKY A DISKUZE	8
	1.14 Měření barevnosti	8
	1.15 ATR-FTIR spektrometrie vzorků prášků z plodů trnky obecné	3
	1.16 Skenovací elektronová mikroskopie6	7
	1.17 Adsorpční izotermy prášků z plodů trnky obecné: vliv přídavků polysacharidů n	a
	vybrané parametry rovnic7	1
	1.17.1 Volba vhodného matematického popisu adsorpce vlhkosti	9
	1.17.2 Rychlost adsorpce vlhkosti	3
4.	ZÁVĚR 80	6
5.	POUŽITÁ LITERATURA8′	7
6.	PŘÍLOHY99	8

SEZNAM ZKRATEK

ATR	spektroskopie zeslabené totální reflektance
BET	Brunauer, Emmer, Teller
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
DE	dextrózový ekvivalent
DP	stupeň polymerace
ERH	rovnovážná relativní vlhkost
FD	sušením mrazem
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GAP	Guggenheim, Anderson a de Boer
HAD	konvekční sušením horkým vzduchem
IR	infračervený
IRE	vnitřní reflexní prvek

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Prunus spinosa	15
Obrázek 2: Enantiomery fruktózy	19
Obrázek 3: Struktura maltodextrinu	22
Obrázek 4: struktura inulinu	
Obrázek 5: Struktura chitosanu	
Obrázek 6: Typická sorpční izoterma	27
Obrázek 7 : Adsorpční a desorpční křivka s hysterezí	
Obrázek 8: Oblasti sorpční izotermy	29
Obrázek 9: Typy sorpčních izoterm	
Obrázek 10 : Fázový diagram vody	
Obrázek 11: Lyofilizátor (foto autorky)	40
Obrázek 12: Schéma FTIR spektrometru	
Obrázek 13: Schéma vnitřního reflexního prvku	
Obrázek 14: Tři elementy barevného vidění	
Obrázek 15 : Zobrazení prostoru L^* , a^* , b^*	
Obrázek 16: Uspořádání os odstínu, světlosti a sytosti	
Obrázek 17: Geometrie měření	
Obrázek 18: Mapa sběru	
Obrázek 19: Foto trnky obecné ze sběru	
Obrázek 20 : Snímek prášku z dužiny trnky obecné (PPS)	67
Obrázek 21 : Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a 50 % (<i>m/m</i>) int	ulinu (In)68
Obrázek 22: Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) maltodextrinu
DE15 (Mdx)	
Obrázek 23 : Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a	ı 50 % (<i>m/m</i>)
chitosanu (Ch)	

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Relativní vlhkosti roztoků solí při různých teplotách
Tabulka 2: Další Rovnice pro výpočet sorpčních izoterm
Tabulka 3: Program lyofilizace
Tabulka 4: Kódy vzorků lyofilizovaných prášků
Tabulka 5: Barevnost prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In),
maltodextrinu (Mdx) a chitosanu (Ch)58
Tabulka 6: Barevnost prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In),
maltodextrinu (Mdx) a chitosanu (Ch) vyjádřených pomocí polárních souřadnic61
Tabulka 7: Vizualizované barvy po přídavcích inulinu62
Tabulka 8: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30
a 50 % (<i>m/m</i>) obsahem inulinu (In) pro 25 °C72
Tabulka 9: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30
a 50 % (m/m) obsahem maltodextrinu (Mdx) pro 25 °C73
Tabulka 10 : Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30
a 50 % (m/m) obsahem chitosanu (Ch) pro 25 °C74
Tabulka 11 : Hodnoty A _s , ΔE_1 , ΔE_2 a a _{w,c} pro prášek z plodů trnky obecné při 25 °C
Tabulka 12 : Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %
(m/m) obsahem inulinu (In) při 25 °C
Tabulka 13 : Hodnoty As, ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %
(<i>m/m</i>) obsahem maltodextrinu (Mdx) při 25 °C
Tabulka 14 : Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %
(m/m) obsahem chitosanu (Ch) při 25 °C
Tabulka 15: Průměrné změny hmotnosti pro prášek z plodů trnky obecné při adsorpci vlhkosti
při 25 °C
Tabulka 16 : Průměrné změny hmotnosti pro prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50
% (<i>m/m</i>) inulinu (In) při adsorpci vlhkosti (25 °C)
Tabulka 17: Průměrné změny hmotnosti prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %
(<i>m/m</i>) maltodextrinu (Mdx) při adsorpci vlhkosti (25 °C)
Tabulka 18: Průměrné změny hmotnosti prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %
(<i>m/m</i>) chitosanu (Ch) při adsorpci vlhkosti (25 °C)

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: ATR-FTIR spektrum prášku z plodů trnky obecné
Graf 2: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m)
inulinu (In)64
Graf 3: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m)
maltodextrinu DE15 (Mdx)65
Graf 4: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m)
chitosanu (Ch)66
Graf 5: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s přídavkem 5, 15, 30
a 50 % (<i>m/m</i>) inulinu (In) při 25 °C80
Graf 6: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m)
maltodextrinu (Mdx) při 25 °C81
Graf 7: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m)
chitosanu (Ch) při 25 °C

ÚVOD

Prunus spinosa neboli trnka obecná je trnitý divoký hustě rozvětvený opadavý keř původem ze Skotska patřící do čeledi Rosaceae (růžovité). Květy a plody trnky obecné obsahují celou řadu látek, které mají blahodárné účinky na lidský organismus. Květy například obsahují kyanogenní glykosidy nebo flavonoidy. Glykosidy působí diureticky. Sušené květy lze tedy použít jako mírné projímadlo. Plody obsahují organické kyseliny, minerální látky, vitamín C, antokyany, fenoly a další látky. Plody mají svíravé účinky a ve formě odvaru se dají použít při průjmu. Jsou rovněž použitelné jako lék na mírný zánět hltanu nebo sliznice úst. Antokyany obsažené v plodech mají antioxidační účinky.

Proces lyofilizace lze využít k takzvané enkapsulaci. Enkapsulaci lze definovat jako proces, při kterém se aktivní látka (jádro) uzavře do struktury obalového materiálu (stěny), aby bylo "jádro" chráněno před negativními vlivy prostředí. Enkapsulace zahrnuje procesy (chemické a mechanické) k zachycení aromatických látek a bioaktivních sloučenin jako jsou antioxidanty, vitaminy, minerály nebo fenolické sloučeniny. Jako enkapsuláční materiály se dají použít například sacharidy, bílkoviny nebo povrchově aktivní látky.

Polysacharidy jsou polymery nejméně deseti monosacharidových jednotek spojených glykosidickými vazbami. Mezi neškrobové polysacharidy patří i vláknina. Ta se přirozeně vyskytuje především v potravinách rostlinného původu (ořechy, ovoce a zelenina). Vláknina má mnoho pozitivních účinků na lidské zdraví. Mezi hlavní přínosy vlákniny patří normalizace střevní činnosti, normalizace krevních lipidů a snížení hladiny glukózy v krvi. Vláknina se dělí na nerozpustnou a rozpustnou ve vodě. Mezi nerozpustnou vlákninu patří například celulóza a hemicelulóza. Urychluje dobu trávení potravy, a tím zlepšuje střevní peristaltiku. Mezi rozpustnou vlákninu patří například inuliny), pektiny a rezistentní dextrany. Přispívá ke snížení hladiny cukru v krvi, snížení koncentrace cholesterolu a pocitu sytosti.

Cílem práce byla charakterizace vlastností a adsorpčního chování lyofilizovaných prášků z plodů z trnky obecné s přídavky inulinu, maltodextrinu a chitosanu (5, 15, 30 a 50 % (m/m)). Bude ověřena hypotéza, že přídavkem polysacharidu může být zvýšen obsah vlhkosti v monomolekulární vrstvě, a tím dosaženo lepší stability při skladování.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Trnka obecná

Trnka obecná, *Prunus spinisa* (Obrázek 1), rovněž známa pod názvem slivoň trnka nebo zkráceně pouze jako trnka patřící do čeledi Rosaceae (růžovité) je trnitý divoký hustě rozvětvený opadavý keř původem ze Skotska. Dorůstá výšky od 1 do 3 m. Drobné postranní větvičky se postupně mění v trny neboli kolce, které jsou obvykle dlouhé 4-8 cm. Její stonek je pokrytý rozpraskanou šedou až černou kůrou [1-4].

Listy jsou vejčitého, oválného tvaru a mají pilovitý či zubatý okraj. Někdy mohou být na vnitřní straně chlupaté a rostou ve svazečcích. Délka listů je průměrně kolem 4 cm [1, 5].

Květy rostou jednotlivě, mají jasně bílou korunu tvořenou 5 bílými okvětními lístky a červené nebo žluté tyčinky. Květy trnky obecné mají charakteristickou vůni, často pokrývají celé větve a vyrůstají před rozvitím listů. Kalich květů má asi 2 mm. Slivoň trnka zpravidla rozkvétá v dubnu [1, 3, 4, 6].

Plody P. spinosy jsou šťavnaté, 5-7 mm velké kulovité peckovice se zelenou dužinou, které jsou pokryté vrstvou vosku. Uvnitř plodu se nachází pecka. Před dozráním jsou plody zelené, poté se barva mění na tmavě modrou až modročernou. Lidově se plodům říká trnky. Plody dozrávají koncem léta a na podzim a někdy přetrvávají na rostlině i přes zimu. Plody se obvykle sbírají v říjnu a listopadu. Chuť plodů je svíravá a trpká. Plody trnky lze konzumovat čerstvé. a navzdory šťavnatému vzhledu jsou plody pro běžnou konzumaci příliš hořké a používají se spíše k přípravě sirupů, šťáv, džemů, kompotů, lihovin, vína nebo se nakládají obdobně jako olivy. Příkladem mohou být vína s názvem "Lacrima di Spino Nero", která se připravují v regionu Marche ve střední Itálii. v poslední době si plody získávají pozornost jako funkční potraviny a nedostatečně využívaný zdroj bioaktivních látek pro použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu [1, 3, 4, 6].



Obrázek 1: Prunus spinosa [1]

1.1.1 Výskyt

Prunus spinosa roste v celé Evropě, v Africe a v některých zemích Asie ležících v mírném pásu, zejména ve střední, severní, západní a jižní Anatolii. Je odolná vůči chladným, suchým a vápenatým půdám. Nalézt ji můžeme od plání až po úrovně hor, na skalnatých kopcích, na skálách i na slunných pobřeží a běžně se vyskytuje na okrajích listnatých lesů [3, 4].

V České republice trnku nalezneme především na mezích, pasekách, na křovinatých stráních jak na horách, tak v nížinách [1].

1.1.2 Obsah biologicky aktivních látek a jejich využití

Užitnou částí jsou květy (*Flos pruni spinosae*) a plody (Fructus *pruni spinosae*). Květy se sbírají výhradně za suchého počasí. Sušení je rychlé, provádí se ve stínu. Důležité je sušit květy v tenké vrstvě, aby nezhnědly. Celkem zralé plody se sbírají na podzim, ještě před udeřením mrazů. Květy a plody se dají sušit i umělým teplem při teplotách do 40 °C. Usušené plody mají slabě nahořklou chuť a charakteristický pach. Pro vlastní potřebu se někdy sbírají i listy nebo kůra [1].

Květy trnky obecné obsahují především kyanogenní glykosidy nebo flavonové glykosidy neboli flavonoidy kaempferol a kamferin či kvercetin organické kyseliny, soli draslíku a hořčíku. Glykosidy působí diureticky. Sušené květy lze tedy použít jako mírné projímadlo. Nově se rovněž využívají jako antihypertenziva. Květy též obsahují stopové množství kyseliny kyanovodíkové. Ta má význam pro látkovou výměnu [1, 4].

Plody obsahují organické kyseliny, třísloviny, pektiny, cukry, amygdalin, soli vápníku a hořčíku, vitamín C, antokyany, fenoly, polyfenoly a další látky. Využívají se při dyskienezi žlučníku a ledvinových onemocněních nebo se užívají zevně například jako kloktadlo. Také mají velmi dobré svíravé účinky a ve formě odvaru se dají použít při průjmu. Lze z nich připravit rovněž i sirup, který upravuje chuť farmaceutických výrobků obsahujících jodid draselný. Plody jsou rovněž použitelné jako lék na mírný zánět hltanu nebo sliznice úst [1, 2, 4].

Své využití má i kůra. Používá se příležitostně ke snížení horečky a v kombinaci s kůrou planné švestky se ve formě čajů podává při nadýmání, špatném trávení, křečích a může také sloužit jako obklad na rány. Listy, plody i květy příznivě působí při onemocnění močových orgánů a jsou nápomocné při látkové výměně [1, 2].

Sušené části trnky obecné se užívají vnitřně v nálevu jako mírné diuretikum či mírné laxativum při žaludečních nevolnostech, nadýmání, zácpě a k podpoření vylučování moči. Dávkování jsou 2 čajové lžičky, přibližně 2 g, na hrnek vody [1].

1.1.3 Funkční vlastnosti plodů z trnky obecné

Ve studii z roku 2023 byly použity různé technologické postupy pro zhodnocení plodů trnky (Prunus spinosa L.) v marmeládě, džemu, želé a nutraceutikách. Marmeláda vykazovala nejvyšší koncentrace polyfenolů (7,61 \pm 0,05 mg/g sušiny ekvivalentních kyseliny gallové) a flavonoidů ($4,93 \pm 0,22$ mg/g sušiny ekvivalentních katechinu), zatímco džem si zachoval nejvyšší obsah antokyanů ($66,87 \pm 1,18 \text{ mg/g}$ sušiny ekvivalentních kyanidinu-3-O-glukosidu). Alternativně byla čerstvá dužina obohacena inulinem, následně inokulována kulturou Lactobacillus acidophilus a lyofilizována, čímž byl získán prášek s obsahem životaschopných buněk $6,27 \cdot 10^7$ CFU/g sušiny. Toto množství splňuje kritérium minimální koncentrace živých buněk pro to, aby potraviny obsahující probiotika získaly příznivé účinky. Chromatografická analýza lyofilizovaných slupek trnky ukázala, že hlavním flavonoidem je myricetin, dále katechin, epikatechin a kyselina vanilová. Hlavní antokyany byly kyanidin-3-O-glukosid, kyanidin-3-O-rutinosid a peonidin-3-O-glukosid s průměrnou koncentrací 0,75 mg/g sušiny. Extrakt vykazoval účinnou inhibiční aktivitu ze slupek vůči enzymům α-amyláze a α-glukosidáze, které hrají klíčovou roli při hydrolýze sacharidů a produkci glukózy. u jader byla zkoumána možnost jejich použití jako výhřevných látek, přičemž naměřená výhřevností byla 4,9 kWh \cdot kg⁻¹[7].

V roce 2019 byla provedena studie ochranných účinků plodů trnky (Prunus spinosa) proti rozvoji toxicity tartrazinu u potkanů albínů. Cílem studie bylo zhodnotit škodlivé účinky potravinářské přídatné látky tartrazinu a sledovat příznivé vlastnosti plodů trnky obecné na krevní obraz a orgány potkanů. Tartrazin (E102) je syntetické potravinářské barvivo, které je schopno měnit vnímání a chování a v kombinaci s benzoáty může u dětí vyvolat syndrom hyperaktivity. Kromě toho může vyvolat oxidační stres, který následně způsobuje metabolické poruchy. Plody trnky byly zbaveny pecek, usušeny při 30 °C v sušárně a vysušená dužina byla rozemleta na jemný prášek. Potkani byli rozděleni do čtyř skupin. Jedna skupina byla kontrolní a dostávala pouze potravu a vodu, dvě skupiny dostávaly tatrazin v rozdílném množství a čtvrtá skupina dostávala kombinaci tatrazinu s práškem z trnky. Na konci pokusu se hodnoty týkající se hmotnosti ledvin a jater významně zvýšily, zatímco hmotnost sleziny se ve srovnání s kontrolní skupinou mírně snížila. Biochemická a hematologická vyšetření vzorků krve ukázala, že přídavek tartrazinu v potravě potkanů způsobil významné změny všech biochemických a hematologických parametrů krve. Ve skupině, která dostávala prášek z trnky v kombinaci s tartrazinem, měly biochemické a hematologické parametry průměrné hodnoty podobné hodnotám kontrolní skupiny. Závěrem studie je, že prášek z trnky prokázal slibnou ochrannou roli pro krevní parametry, ale neprokázal žádný významný přínos pro ochranu orgánů [8].

V roce 2024 byla provedena studie kvalitativních vlastností prášku z plodů trnky obecné (*Prunus spinosa L.*) získaných sušením horkým vzduchem (HAD) a sušením mrazem (FD). Doba sušení byla u obou postupů stejná (24 h). Podle výsledků byl zjištěn obsah vlhkosti (%) a aktivita vody prášků a obě metody úpravy poskytly vhodné výsledky. Vlhkost získaná metodou HAD byla 7,51 % a metodou FD 9,13 %. Aktivita vody byla pak stanovena metodou HAD na 0,2471 a metodou FD 0,2718. s ohledem na parametry pH a celkového obsahu popela nebyl mezi vzorky prášku zjištěn statisticky významný rozdíl. Oba procesy sušení měly vliv na barvu a změnily barevné parametry prášků v porovnání s hodnotami čerstvých plodů. Obsah biologicky aktivních látek a antioxidační aktivita prášku získaného úpravou FD byly vyšší než při úpravě HAD. z tohoto hlediska bylo zjištěno, že proces FD měl minimální vliv na obsah chemických látek ve srovnání s čerstvým ovocem. Technika HAD aplikovaná při 40 °C v kombinaci s ventilátorovým systémem neměla na tyto hodnoty výrazně negativní vliv. Tato studie také poukazuje na to, že plody trnky obecné, jejich zpracované produkty, jako jsou

práškové formy, nebo různé extrakty mají vysoký potenciál z hlediska přírodních složek potravin, které zajišťují barvu a stabilitu výrobků. Bohatý obsah bioaktivních sloučenin studovaných ovocných prášků z trnky obecné činí zajímavý doplněk pro fortifikaci potravin [9].

Ve studii z roku 2022 byly studovány některé kompozitní materiály pro enkapsulaci extraktu z trnky obecné. Pro přípravu enkapsulátů z halloyzitových nanotrubiček byla použita technika cyklického vakua a maltodextrinové enkapsuláty byly připraveny procesem lyofilizace. Byl testován cytotoxický účinek enkapsulátů na nádorových (adenokarcinom prsu, adenokarcinom tlustého střeva a fetální plicní fibroblasty) a nenádorových buňkách. Enkapsuláty trnky s maltodextrinem o koncentraci 2,5 mg/ml vykazovaly 30% cytotoxické účinky vůči nádorovým buňkám adenokarcinomu prsu a adenokarcinomu tlustého střeva. Cytotoxické účinky, až 40 %, enkapsulátů halloyzitu a halloyzit-maltodextrinu byly pozorovány u buněk adenokarcinomu prsu po ošetření nižšími koncentracemi enkapsulátu (62,5-625 µg/ml). Dále bylo testováno uvolňování čtyř hlavních fenolických sloučenin (kyseliny 3-O-kafeoylchinové, kyanidinu 3-O-glukosidu, kyanidinu 3-O-rutinosidu a peonidinu 3-O-rutinosidu). Bylo prokázáno, že přídavek enkapsulátů do jogurtu prodloužil uvolňování bioaktivních látek z trnky. Tyto výsledky naznačují, že tyto enkapsuláty mají potenciál při výrobě funkčních potravin, doplňků stravy a léčiv [10].

1.2 Sacharidy

Sacharidy jsou organické sloučeniny složené z uhlíku, vodíku a kyslíku. Chemicky se jedná o polyhydroxyderiváty karbonylových sloučenin, tedy o polyhydroxyaldehydy (aldózy) nebo polyhydroxyketony (ketózy). Jeden z atomů kyslíku je součástí karbonylové funkční skupiny, zbylé kyslíky tvoří OH skupiny. Sacharidy obsahují takzvaný chirální uhlík, tedy asymetrický uhlík se čtyřmi různými, neidentickými substituenty. Mohou existovat ve dvou zrcadlových obrazech, enantiomerech, které jsou označovány jako D a L izomery. Jako příklad je na Obrázku 2 uvedena D-fruktóza a L-fruktóza. Díky této konfiguraci jsou sacharidy opticky aktivní a jsou schopny stáčet rovinu polarizovaného světla [11-14].



Obrázek 2: Enantiomery fruktózy [14]

Tyto organické sloučeniny jsou většinou alespoň částečně rozpustné ve vodě, a pokud ne, tak vodu sorbují. Jsou jednou z nejběžnějších přírodních složek potravin. Jako hlavní zdroj energie slouží živočichům ve formě stravitelného škrobu a jednoduchých cukrů. Každý gram sacharidů dodá 4 kilokalorie energie. Nestravitelné formy sacharidů zahrnují vysokomolekulární polysacharidy a nízkomolekulární oligosacharidy. Obsah sacharidů je v současné době velmi důležitým kritériem pro posuzování kvality potravin a nápojů (pravost, údaje na etiketách, obsah sladidel a náhražek tuků) [11, 12, 15, 16].

Základními jednotkami sacharidů jsou monosacharidy neboli jednoduché cukry. Ty obsahují 3 až 9 atomů uhlíku. Mezi monosacharidy patří například glukóza, fruktóza a galaktóza. Monosacharidy existují jak ve formě otevřeného řetězce, tak ve formě uzavřených kruhových struktur. Cyklická struktura vzniká vnitřní reakcí mezi nukleofilní hydroxylovou skupinou a elektrofilním karbonylem za vzniku hemiacetalové vazby. Tím vzniká nové chirální centrum nazývané anomerní uhlík. Dva nově vzniklé izomery neboli anomery jsou označovány jako α a β . Spojení mezi atomy na prvním a pátém uhlíku vzniká šestičlenný kruh, takzvaný pyranózový kruh (pyranosid) a spojením mezi prvním a čtvrtým uhlíkem vznikne pětičlenný kruh nazývaný furanózový kruh (furanosid) [11-14, 17].

Jen velmi málo sacharidů se v přírodě vyskytuje ve formě monosacharidů, častěji se vyskytují ve formě polysacharidů, případně ve formě oligosacharidů. Oligosacharidy jsou sacharidové polymery obsahující dvě až deset monosacharidových jednotek spojených glykosidickou vazbou [12, 13].

Polysacharidy jsou polymery nejméně deseti monosacharidových jednotek spojených glykosidickými vazbami. Polysacharidy složené z jednoho typu monosacharidu se označují jako homopolysacharidy. Naopak ty, které se skládají z různých monosacharidů, se označují

jako heteropolysacharidy. Všechny, s výjimkou škrobů (ale včetně části některých škrobů nazývaných rezistentní škrob), jsou nestravitelné. Mezi polysacharidy patří například škrob, glykogen, chitin, hemicelulóza, celulóza, pektiny a gumy. Polysacharidy plní hlavní biologické funkce. Škrob a glykogen představují zásoby energie pro rostliny i živočichy. Celulóza, pektin a chitin jsou příklady strukturních polysacharidů, které tvoří hlavní složku buněčných stěn rostlin a exoskeletu bezobratlých živočichů. Jiné, obecně klasifikované jako hydrokoloidy nebo potravinářské gumy, se přidávají za účelem zajištění specifických funkčních vlastností. Mohou být použity k tvorbě gelů se specifickými vlastnostmi, k zadržování vlhkosti, ke stabilizaci emulzí, suspenzí, pěn a proteinů, k zajištění stability při zmrazování a rozmrazování a při nízkých teplotách, k tvorbě filmů (povlaků), jako pojiva atd [11-13, 18].

1.2.1 Vláknina

Vláknina vyskytující se v potravinách je neškrobový polysacharid obsažený obvykle v rostlinných potravinách. Definice vlákniny se v průběhu let vyvíjela. Současná definice, která je dnes celosvětově akceptována definuje vlákninu jako sacharidové polymery s deseti nebo více monomerními jednotkami, které nejsou hydrolyzovány endogenními enzymy v tenkém střevě člověka a patří do těchto 3 kategorií: (1) jedlé sacharidové polymery přirozeně se vyskytující v potravinách při konzumaci, (2) polysacharidy, které byly získány fyzikálními, enzymatickými nebo chemickými prostředky z potravinářských surovin a u nichž bylo prokázáno, že mají fyziologický účinek prospěšný pro zdraví, (3) Syntetické uhlovodíkové polymery, u nichž bylo prokázáno, že mají fyziologický účinek prospěšný pro zdraví, [19, 20].

Vyskytuje se buď přirozeně v potravinách, a to ve formě dietní vlákniny nebo jako tzv. "funkční" vláknina, která je součástí funkčních potravin a byla přidána během přípravy jídla nebo při výrobě potravin anebo je konzumována samostatně jako doplněk stravy. v dnešní době se přidává prakticky do všech druhů potravin včetně nápojů. Mezi hlavní kategorie produktů obohacovaných o vlákninu patří pečivo, sušenky a cereálie [19, 20].

Blahodárné účinky vlákniny jsou známy již od starověku. Například již Hippokrates kvitoval pozitivní účinky celozrnného chleba ve střevech. Mezi hlavní přínosy vlákniny patří normalizace střevní činnosti, normalizace krevních lipidů a snížení hladiny glukózy v krvi. Mnoho poruch je spojeno s nedostatečnou konzumací vlákniny. Patří mezi ně zácpa, divertikulitida, hemoroidy, cukrovka, kardiovaskulární onemocnění, rakovina střev, další druhy rakoviny a obezita. Některé složky vlákniny jsou díky svým účinkům v tlustém střevě

označovány také jako probiotická vláknina. Kromě příznivých účinků na zdraví má vláknina vliv také na pocit sytosti. Jedná se o přednost rozpustné vlákniny, která zvětšuje svůj objem a je schopná vytvářet stabilní gel, který zaplní žaludek, zpomalí jeho vyprázdnění, a to následně vede k vyvolání pocitu sytosti [18-21].

Vláknina se dělí na nerozpustnou a rozpustnou ve vodě. Rozdíl mezi rozpustnou a nerozpustnou vlákninou spočívá ve schopnosti absorbovat vodu [20]. Mezi nerozpustnou vlákninu patří například ligniny, celulóza a hemicelulóza a vyskytuje se například v pšenici, rýži, celozrnném pečivu, celozrnných těstovinách, ořeších, semenech, cereáliích a mysli. Nerozpustná vláknina urychluje dobu trávení potravy, a tím zlepšuje střevní peristaltiku, má pozitivní vliv na zdraví střev a zvyšuje objem stolice. Nedostatečný příjem nerozpustné vlákniny je jedním z faktorů vzniku zácpy. Tento druh vlákniny není zdrojem energie [11, 20-22].

Mezi rozpustnou vlákninu pak patří různé oligosacharidy, pektiny, β -glukany, gumy, rezistentní škroby a rezistentní dextrany. Rozpouští se ve vodě za vzniku hustého gelu. Jejím zdrojem je především ovoce a zelenina nebo oves a luštěniny. Přičemž v obilovinách se vyskytují obě složky vlákniny. Je částečně stravitelná a poskytuje omezené množství kalorií, tedy energie. Jedná se o tzv. viskózní vlákninu. Zvýšením viskozity dochází například ke zpomalení vyprazdňování žaludku. Rozpustná vláknina přispívá ke snížení hladiny cukru v krvi, snížení koncentrace cholesterolu a pocitu sytosti [11, 20-22].

Co se týče doporučeného adekvátního denního příjmu vlákniny, ten není jednotný a v jednotlivých státech se liší. Tyto rozdíly mohou být způsobeny rozdíly v definici vlákniny ve stravě. Ve Spojeném království doporučuje Britská nadace pro výživu příjem vlákniny 18 g/den nebo 24 g/den, a to v závislosti na zvolené analytické metodě. Americká dietetická asociace doporučuje příjem 20-30 g vlákniny denně. Světová zdravotnická organizace pak doporučuje, aby se denně konzumovalo 25 g vlákniny. Za dobrý zdroj vlákniny jsou považovány ty potraviny, které obsahují 2,5 g vlákniny na 1 porci a za výborný zdroj potraviny s 5 g vlákniny na porci [18-20].

1.2.2 Maltodextrin

Maltodextriny jsou definovány jako nesladké, výživné sacharidové polymery, které se skládají z D-glukózových jednotek spojených převážně α -(1-4) glykosidickými vazbami a jejich základní struktura je uvedena na Obrázku 3. Počet glukózových jednotek je veličina, která rozhoduje o jeho dextrózovém ekvivalentu (DE, míra stupně hydrolýzy polymeru, respektive množství celkových redukujících cukrů vyjádřené jako dextróza a vypočítané jako procento celkové sušiny), molekulové hmotnosti a o teplotě skelného přechodu (teplota, při níž dochází u polymeru ke změně fyzikálního stavu ze sklovité na viskózní kaučukovitou kapalinu). DE maltodextrinu je 3-20. z hlediska velikosti molekul tedy maltodextriny překlenují mezeru mezi škrobem a mono-/di-sacharidy. Jejich rozpustnost se liší podle DE a podle typu hydrolýzy. Se zvyšujícím se DE se snižuje stupeň polymerace a zvyšuje se hygroskopičnost, rozpustnost, sladivost a bod tuhnutí. Nižší DE vede ke zvýšení viskozity, vazebné schopnosti a inhibici tvorby krystalů. Obecně patří maltodextriny mezi sacharidy dobře rozpustné ve vodě (některé jsou dokonce rozpustné ve studené vodě) s nízkou hustotou. Tento polymer sacharidu je snadno stravitelný, a to díky své dvourozměrné struktuře složené z jednodušších glukózových jednotek [11, 23-25].



Obrázek 3: Struktura maltodextrinu [25]

Maltodextriny lze připravit z jakéhokoliv škrobu a vyvinuté postupy výroby jsou rozmanité. Výroba maltodextrinů se provádí hydrolýzou škrobu až na polymery glukózy s průměrnou délkou řetězce 5 až 10 jednotek glukózy v molekule. Teoreticky je lze vyrábět enzymatickou nebo kyselou hydrolýzou. v praxi však kyselá hydrolýza produkuje příliš mnoho volné glukózy (a velkých fragmentů) a takto vyrobené maltodextriny mají silnou tendenci ke zpětné syntéze. Komerčně se proto obvykle připravují ze škrobu řízenou enzymatickou hydrolýzou. Dnes se komerčně používají dva typy maltodextrinů, a to maltodextriny s hodnotami přibližně DE 10-14 a maltodextriny s hodnotami přibližně DE 15-19 a mají široké využití [11, 22, 23].

Jsou velmi málo nebo vůbec sladké, mají nevýraznou, neškrobovou chuť, která nezakrývá jiné chutě. Díky těmto vlastnostem mají maltodextriny značné uplatnění v potravinářském průmyslu, zejména jako nosné a objemové látky v polotovarech a zpracovaných potravinách. Přidávají se například do suchých směsí polévek, nápojů, bělících látek do kávy, mléčných nápojů a jogurtů. Rovněž se používají jako činidlo upravující texturu ve vařených nebo tvarovaných masných výrobcích. v pečivu a pekařských náplních mohou nahradit sacharózu nebo tuk. Dalšími významnými aplikacemi jsou pomocné látky pro sušení rozprašováním, včetně enkapsulace chutí a průhledných potravinářských obalů. v mražených výrobcích a cukrovinkách se maltodextriny s nízkým obsahem DE používají ke snížení tvorby krystalů [11, 22, 23].

1.2.3 Inulin

Inulin, jehož struktura je vyobrazena na Obrázku 4, patří do třídy probiotických oligosacharidů a je tvořeny krátkými řetězci molekul cukru, konkrétně jsou to převážně lineární molekuly skládající se z 3–170 fruktózových jednotek propojených glykosidickými vazbami β -(2-1). Avšak stupeň polymerace (DP) zřídka přesahuje 60. Polymerní řetězce jsou často, ale ne vždy (z důvodu degradace) zakončeny na redukujícím konci sacharózovou jednotkou. Chemicky je inulin znám jako α -D-glukopyranosyl-[β -D-fruktofuranosyl] (n-1)-D-fruktofuranosid. z biologického hlediska je inulin zásobní sacharid a řadí se mezi vlákninu s nízkou viskozitou, tedy mezi rozpustnou vlákninu. Rozpustnost inulinu ve vodě je střední (maximálně 12 % při pokojové teplotě). Tento oligosacharid je tepelně a procesně stabilní. Je však náchylný ke kyselé hydrolýze a může se rozkládat při pH nižším než 3,7. Stupeň hydrolýzy závisí na teplotě a délce působení kyselého prostředí [18, 26-30].



Obrázek 4: struktura inulinu [29]

Přírodní inulin má nevýraznou, neutrální chuť, bez jakéhokoli nepříjemného aroma nebo příchuti. Protože obsahuje také fruktózu, glukózu a sacharózu, je přírodní inulin mírně sladký (ve srovnání se sacharózou má 10% sladivost). Inuliny jsou přítomny v mnoha druzích ovoce, zeleniny jako je cibule, česnek, borůvka, rajče, pórek, či banán. Dále se vyskytují v čekance, žitě nebo topinamburu. Inulin byl vždy součástí běžné lidské stravy, průměrný Evropan zkonzumuje 2-10 g za den. Ve Spojených státech je denní spotřeba nižší a činí 1-4 g/den [26, 29].

Až do konce 90. let 20. století nebyl inulin dostupný jako čistá sloučenina ve velkém průmyslovém měřítku kvůli vysokým nákladům na zpracování. Se zdokonalením separačních a purifikačních technologií je možné připravit relativně čistý inulin. Hlavním komerčním zdrojem tohoto sacharidu je kořen čekanky, který ve své sušině obsahuje přibližně 15-20 % inulinu. Dále lze k získání inulinu použít i artyčok jeruzalémský neboli topinambur, ten obsahuje 17-20,5 % inulinu. Obě tyto plodiny sdílí podobné agronomické postupy a technologie výroby inulinu. Proces výroby inulinu z těchto rostlin zahrnuje tři obecné kroky: (1) extrakce horkou vodou z nakrájených kořenů; (2) čištění extraktu od koloidních, barevných a dalších rozpuštěných látek (soli, aminokyseliny, cukry atd.) pomocí ultrafiltrace a iontoměničové pryskyřice; (3) odpařování a sprejové sušení rozprašováním přefiltrované šťávy za vzniku inulinového prášku [29, 30].

Inuliny lze použít buď pro jejich nutriční hodnoty, nebo pro vlastnosti napodobující tuky. Jejich aplikace však často nabízí dvojí výhodu: lepší organoleptické vlastnosti (především chuť a vůně) a vyváženější nutriční složení potraviny. Inulin byl uznán jako účinná náhražka tuku (až 50 %), náhražka cukru a probiotická složka pro vývoj funkčních potravin při zachování požadovaných nutričních, texturních a skladovacích vlastností. Dále se inulin v potravinářství uplatňuje jako přídatná látka snižující glykemický index (prodlužuje trvanlivost a čerstvost chleba a pečiva). Začlenění inulinu by mohlo představovat cennou strategii pro a snížení glykemické odezvy in vitro. Konkrétně své uplatnění nachází v pomazánkách se sníženým obsahem tuku, v nízkotučných mléčných výrobcích, v mražených dezertech, v masných výrobcích, omáčkách, polévkách, jogurtech či sušenkách. Nabízí tedy nové možnosti pro vývoj nutričně vyvážených, ale chuťově kvalitnějších výrobků, zlepšení fyzikálně-chemických vlastností a senzorické přijatelnosti bezlepkových pekařských výrobků [29, 31, 32].

Inuliny jsou známé jako "potraviny tlustého střeva" neboli složky, které jsou potravou pro mikroflóru v tlustém střevě. Inuliny jsou odolné vůči trávení v horní části gastrointestinálního

traktu, a to kvůli obsahu téměř výhradně β -(2-1) vazeb, které nemohou být hydrolyzovány enzymy v dutině ústní a tenkém střevě. Vzhledem k rychlé fermentaci v tlustém střevě mohou inuliny významně ovlivňovat jeho funkci. Inuliny mohou například zvýšit hmotnost stolice, stimulovat pohyb střev a normalizovat frekvenci stolice, zejména u osob s mírnou zácpou. Mezi další fyziologické aktivity které inuliny vykazují, patří ochrana a obnova sliznice tlustého střeva, úprava střevní mikroflóry, vstřebávání minerálů, mineralizace kostí a metabolismus lipidů. Tyto funkce mohou přispívat ke snížení rizika střevních onemocnění a mohly by také hrát roli při snižování rizika rakoviny tlustého střeva [29, 31, 33].

1.2.4 Chitosan

Chitosan je přírodní lineární polysacharid, aminosacharid, složený z D-glukosaminu a N-acetyl glukosaminu spojených β -(1-4) glykosidickými vazbami, jak je vidět na Obrázku 5. Po celulóze je druhým nejrozšířenějším přírodním polysacharidem a je přítomen v exoskeletu korýšů a hmyzu a také v měkkýších, houbách, řasách a prvocích. Jedná se o derivát chitinu, který se získává částečnou nebo úplnou deacetylací chitinu s molekulovou hmotností obvykle v rozmezí 16 až 1 000 kDa nebo i více. Obvykle se uvádí jako kritérium pro definici molekuly jako chitosan stupeň deacetylace nejméně 50 %. Jeho struktura má vysoce reaktivní amino a hydroxylové skupiny a propůjčuje tomuto polymeru antioxidační, antimikrobiální a chelatační vlastnosti. Chitosan vykazuje chování citlivé na pH v důsledku přítomnosti aminoskupin na D-glukosaminových jednotkách. Chitosan je obecně nerozpustný v organických rozpouštědlech a ve vodě, ale rozpustný ve zředěných roztocích kyselin s pH nižším než 6. Aminoskupiny jsou totiž v kyselém prostředí protonizovány, čímž chitosan získává kationtový charakter a stává se rozpustným ve vodě. Naopak v neutrálním a zásaditém prostředí umožňuje deprotonace aminoskupin tvorbu mezimolekulárních a intramolekulárních vodíkových vazeb, což vede ke vzniku chitosanových hydrogelů a špatné rozpustnosti ve vodě [34-36].



Obrázek 5: Struktura chitosanu [36]

Antimikrobiální aktivita chitosanu je jednou z jeho hlavních vlastností a závisí na jeho fyzikálně-chemických vlastnostech, typu mikroorganismu a na koncentraci, ve které je aplikován. Antimikrobiální a antimykotická aktivita chitosanu je připisována mimo jiné kladně nabitým aminoskupinám, které reagují se záporně nabitými skupinami lipopolysacharidů a proteinů na povrchu mikrobiálních buněk, což vede k rozpadu buněčné membrány a poškození bakteriální buněčné stěny. Chitosan je schválen evropskými úřady a Mezinárodní organizací pro révu a víno pro použití jako zjemňující a antimikrobiální činidlo ve vínech [36-38].

Výrobu chitosanu lze uskutečnit dvěma přístupy, které vycházejí z různých typů biomasy. Nejběžnějším přístupem je přeměna extrahovaného a přečištěného chitinu na chitosan prostřednictvím deacetylačního kroku. Druhou možností je vycházet z biomasy hub obsahující chitosan. Komerčně dostupný chitosan se získává z odpadu po zpracování chitinu korýšů z potravinářského průmyslu v zemích, jako jsou USA, Japonsko, Indie a Brazílie. Průmyslová výroba chitosanu proto přispívá k minimalizaci vzniku odpadu a k výrobě materiálu s vysokou přidanou hodnotou pro samotný potravinářský průmysl [36].

Chitosan je netoxický, biologicky rozložitelný, biokompatibilní a má antioxidační a vlastnosti. z hlediska použití je nejdůležitějším derivátem chitinu, protože aminoskupina na chitosanu umožňuje snadnou chemickou modifikaci a dává molekule některé specifické funkční vlastnosti. Chitosan může nalézt využití v zemědělství, medicíně, farmacii, veterinárním lékařství, ochraně životního prostředí, potravinářství, obalovém průmyslu nebo při čištění vod a odpadních vod. Kromě toho bylo zjištěno, že oligomery chitosanu jsou bioaktivní, a tudíž mají potenciál pro použití například v obvazových materiálech či v kosmetice. v potravinářském průmyslu ho lze využít jako přísady a funkční složky potravin, obalový materiál, pro imobilizaci enzymů, enkapsulaci probiotik a bioaktivních látek a pro odstraňování toxických látek z potravin. Dále lze chitosan použítí jako zahušťovadlo a při konzervaci potravin. v poslední době byla vyvinuta řada hydrogelů na bázi chitosanu. Hydrogely jsou zesíťované polymery, které dokáží udržet vlhkost prostředí a napodobit lidské měkké tkáně. Hydrogely na bázi chitosanu byly široce studovány a aplikovány v biomedicínských oborech, jako je řízené uvolňování léčiv, hojení ran a tkáňové inženýrství [34-36].

1.3 Sorpční izotermy

Sorpční izoterma potravin popisuje termodynamický vztah mezi aktivitou vody a rovnovážným stavem obsahu vlhkosti při konstantní teplotě a tlaku. Je to tedy křivka získaná grafickým vykreslením obsahu vody při konstantní teplotě proti hodnotám aktivity vody. Typická sorpční izoterma je znázorněna na Obrázku 6. Vzhledem ke složitosti sorpčních jevů nelze sorpční izotermy předem vypočítat a musí se experimentálně stanovit pro každý jednotlivý produkt [19, 39, 40].



Obrázek 6: Typická sorpční izoterma [40]

Aktivity vody a_w je důležitým a praktickým aspektem vztahujícím se k obsahu vody v systému, respektive v potravin. Aktivita vody vyjadřuje míru dostupnosti vody v daném systému a je měřením energetického stavu vody v potravině. Je definována jako podíl tlaku vodní páry nad vzorkem a tlaku čisté vody při stejné teplotě. Jedná se o bezrozměrnou veličinu. Matematicky je parametr a_w vyjádřen v Rovnici 1 [39-41].

$$a_w = \frac{p}{p_0} \tag{1}$$

Kde p [Pa] je parciální tlak vodní páry nad potravinou a p₀ [Pa] je parciální tlak vodní páry čisté vody při stejné teplotě [41].

V potravinách vyjadřuje vodu nevázanou, tedy volnou. Obsah volné vody má výrazný vliv na chemickou, mikrobiologickou a enzymovou stabilitu potravin. Na hodnotách aw v potravině konkrétně závisí mikrobiální růst, oxidace lipidů, neenzymatická aktivita, enzymová aktivita a textura potravin. Pokud aktivita vody nebo obsah vlhkosti překročí kritickou hodnotu, stávají

se některé potraviny nepřijatelnými z hlediska kvality, bezpečnosti a spotřebitelských preferencí. Kontrola aktivity vody je v potravinářském průmyslu velmi důležitá, protože nízká aktivita vody zabraňuje růstu mikroorganismů. Například patogenní mikroorganismy v suchých potravinách se začínají množit, pokud aktivita vody překročí hodnotu přibližně 0,75 [19, 39, 40, 42, 43].

Pojem aktivity vody souvisí s rovnovážnou relativní vlhkostí (ERH). Zatímco a_w je vnitřní vlastností potraviny, ERH je vlastností atmosféry, která je v rovnováze s potravinou. Vztah mezi aktivitou vody a rovnovážnou relativní vlhkostí je popsán v Rovnici 2 [39].

$$a_w = \frac{ERH}{100} \tag{2}$$

ERH je založena na měření vlhkosti, je obvykle vyjadřována v procentech. Stupnice pro ERH je od 0 do 100 %, přičemž 100 % představuje čistou vodu. To pro a_w je stupnice od 0 do 1, přičemž čistá vodu má hodnotu 1 [42].

Sorpční izotermy mohou vznikat z procesu adsorpce nebo desorpce vody. Tyto dvě křivky nemusí být nutně totožné, neboť proces adsorpce a desorpce není vždy plně reverzibilní. Lze je od sebe rozlišit tak, že se určí, zda se vlhkost ve výrobku zvyšuje, což svědčí o zvlhčování a jedná se tedy o adsorpci, nebo zda se vlhkost postupně snižuje a dosahuje rovnováhy s okolím, což znamená, že se výrobek vysušuje a dochází k desorpci. Rozdíl mezi adsorpční a desorpční křivkou je definován jako hystereze. Adsorpční a desorpční křivka včetně hystereze je znázorněna na Obrázku 7 [39, 42].

1. Adsorpční izoterma se získá umístěním zcela suchého materiálu do prostředí se zvyšující se relativní vlhkostí a měřením přírůstku hmotnosti v důsledku adsorpce vody.

2. Desorpční izoterma se získá umístěním původně vlhkého materiálu do prostředí se stejnou relativní vlhkostí a měřením úbytku hmotnosti [42].



Obrázek 7: Adsorpční a desorpční křivka s hysterezí [39]

Znalost sorpčních izoterem je v potravinářské vědě a technologii velmi důležitá pro návrh a optimalizaci sušicích procesů, konstrukci obalů, předpovědi kvality, stability a trvanlivosti potravinářských výrobků. Typický tvar izotermy odráží způsob, jakým voda váže systém [39,40]. Izotermu lze obvykle rozdělit do tří oblastí, které jsou znázorněny na Obrázku 8.



Obrázek 8: Oblasti sorpční izotermy [42]

Oblast a představuje silně vázanou vodu. Obsah vlhkosti teoreticky představuje adsorpci první vrstvy molekul vody neboli monomolekulární vrstvu, která je adsorbována hydrofilními a polárními skupinami složek potravin (polysacharidy, bílkoviny atd.). Voda se považuje za silně fixovanou, je nemrznoucí a není k dispozici pro chemické reakce. Adsorpce vody probíhá

postupně, dokud se nevytvoří souvislá monovrstva molekul vody jak na vnějším povrchu výrobku, tak na povrchu jeho zlomů. Druhá zóna začíná, když je celý povrch nasycen.

V oblasti B jsou molekuly vody méně pevně vázané než v první zóně, zpočátku ve více vrstvách. v této oblasti se voda udržuje v pevné matrici kapilární kondenzací. Na tuto třídu složek vody lze pohlížet jako na spojitý přechod od vázané k volné vodě. Tato voda je dostupná jako rozpouštědlo pro nízkomolekulární rozpuštěné látky a pro některé biochemické reakce. s touto zónou je často spojeno množství vody, které při běžných teplotách tuhnutí nezmrzne. Vlastnosti vody v oblasti C jsou podobné vlastnostem volné vody. Přebytečná voda je přítomna v kapilárách nebo jako součást kapalné fáze v materiálech s vysokou vlhkostí. Voda v této oblasti se volně váže na potravinové materiály a je schopna působit jako rozpouštědlo [39, 40].

Brunauer a kol. klasifikovali sorpční izotermy podle jejich tvaru a procesů a stanovili pět různých typů, jak ukazuje Obrázek 9 [39].



Obrázek 9: Typy sorpčních izoterm [19]

 Typ I: Takzvaná Langmuirovy izoterma – křivky jsou konvexní směrem nahoru. Vykazují charakteristický nárůst množství vody v souvislosti s rostoucím obsahem vlhkosti. První derivace plochy tohoto grafu se zvyšuje s obsahem vlhkosti. Tento typ sorpční izotermy se obvykle uplatňuje v procesu zaplňování monomolekulární vrstvy vody na vnitřním povrchu materiálu.

- Typ II: Sigmoidální sorpční izotermy křivky jsou konkávní směrem nahoru. Tento typ zohledňují existenci více vrstev na vnitřním povrchu materiálu.
- Typ III: Floryho-Hugginsova izoterma odpovídá rozpouštědlům nebo změkčovadlům, jako je například glycerol nad teplotou skelného přechodu.
- Typ IV: Tento typ popisuje adsorpci bobtnajících hydrofilních pevných látek až do dosažení maximální hydratace.
- Typ V: Brunauerova-Emmettova-Tellerova (BET) vícevrstvá adsorpční izoterma je to izoterma pozorovaná při adsorpci vodní páry na dřevěném uhlí a souvisí s typy izoterm. II a III [39].

Sorpční izotermy většiny potravin obvykle vykazují izotermy typu II. To je způsobeno rozdíly v chemickém složení a fyzikálně-chemickém stavu potravin. Sušené ovoce běžně vykazuje izotermy typu II nebo typu III. Například máta, pistácie, meruňky, fíky a rozinky, papája, třešně, černý rybíz a hrušky vykazují izotermu typu III, zatímco izoterma typu II byla zaznamenána u ovoce jako jsou datle, mango, banán, borůvky, rajčata, zelená paprika, listová zelenina a cibule [40].

1.3.1 Měření sorpčních izoterm

Sorpční izotermu u potravinářských výrobků lze měřit třemi různými měřicími technikami: gravimetricky, manometricky nebo hygrometricky. Při gravimetrických metodách se měří změny hmotnost vzorku pomocí vah. Při manometrických metodách se měří tlak vodní páry, když je v rovnováze se vzorkem při daném obsahu vlhkosti. Při hygrometrických metodách se měří ERH vzduchu ve styku se vzorkem při daném obsahu vlhkosti. Dále lze metody dělit na statické a dynamické [39, 41].

Ve statických neboli diskontinuálních systémech se vzorek umístí nad vhodný chemický systém do vakua nebo atmosférického systému při konstantní teplotě a měří se relativní rovnovážná vlhkost. Vzduch nebo plyn není protlačován přes vysoušedlo. Místo toho se vzduch bezprostředně obklopující vysoušedlo vysušuje a konvekcí a difuzí vodní páry z okolních oblastí se dostává k vysoušedlu, kde je absorbována. Mezi chemické systémy používané k tomuto účelu patří vodné roztoky kyseliny sírové, roztoky glycerinu a vody a nasycené i nenasycené roztoky solí. Každý takový roztok nabízí určitý stupeň regulace vlhkosti, kterého lze dosáhnout změnou jeho koncentrace. Metody, které se používají ke stanovení vodní páry v rovnováze s nasycenými roztoky solí, jsou různé. Může se jednat o přímé měření tlaku vodní

páry, měření rosného bodu, izobarické měření tlaku par, měření relativního tlaku par, měření pomocí kalibrovaného čidla vlhkosti a gravimetrické stanovení, které se obvykle provádí v exikátoru. Ve skupině Water Activity Group evropského projektu COST 90 byla vyvinuta a standardizována statická gravimetrická technika, která používá nasycený roztok soli ke stanovení relativní vlhkosti atmosféry ve styku se vzorky potravin. Relativní vlhkosti pro běžně používané roztoky solí při různých teplotách jsou uvedeny v Tabulce 1. Údaje o sorpci vlhkosti pro potravinářské výrobky publikované v literatuře byly získány použitím této techniky při různých teplotách zaktivní vlhkosti pro její následující výhody [41, 44-46]:

(1) stanovení přesné hmotnosti sušiny vzorku;

(2) minimalizace kolísání teploty mezi vzorky a jejich okolím nebo zdrojem vodní páry;

(3) dosažení hygroskopické a tepelné rovnováhy mezi vzorky a zdrojem vodní páry[42].

Tento systém má ovšem nevýhodu. Dochází k porušení rovnovážného stavu vždy, když je potřeba vzorek vyjmout z exikátoru a zvážit. Dynamická metoda toto eliminuje, neboť se vzorek váží automaticky [47].

Sůl	Rovnovážná relativní vlhkost [%]						
Jui	10 °C	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
КОН	12,34	9,32	8,23	07,38	06,26	5,72	5,49
KCl	82,06	81,67	84,26	83,62	82,32	81,20	80,25
NaCl	75,67	75,47	75,29	75,09	74,68	74,43	75,50
MgCl ₂	33,47	33,07	33,00	32,38	31,59	30,54	29,26
KBr	83,75	81,67	80,89	80,27	79,43	79,02	78,94
NaBr	62,15	59,14	57,57	56,03	53,17	50,93	49,66
KI	72,11	69,90	98,86	67,89	66,09	64,49	63,11
NaI	41,83	39,65	38,17	36,15	32,88	29,21	25,95
K ₂ CO ₃	43,14	43,16	43,16	43,17	—	—	—
KNO ₃	95,96	94,63	93,58	92,31	89,03	84,78	—
K ₂ SO ₄	98,18	97,59	97,30	97,00	96,41	95,82	_
(NH4)2 SO4	82,06	81,34	80,99	80,63	79,91	79,20	_

Tabulka 1: Relativní vlhkosti roztoků solí při různých teplotách [45]

Dynamické neboli kontinuální měření probíhá za cirkulace vzduchu a obvykle se využívá gravimetrických metod. Kontinuální metody využívají eklektické váhy nebo křemenné pružinové váhy a jsou základem automatizovaných komerčních váhových zařízení, které kontinuálně měří hmotnost při různých hodnotách relativní vzdušné vlhkosti bez nutnosti porušení rovnovážného stavu. Běžně se sorpční izotermy modelují pomocí matematických modelů založených na empirických a teoretických kritériích [41, 56, 48].

1.3.2 Matematický popis sorpčních izoterem

Výsledkem experimentu jsou vždy jednotlivé body odpovídající závislosti rovnovážného obsahu vlhkosti na aktivitě vody (nebo relativní vzdušné vlhkosti). Tuto závislost lze popsat různými matematickými modely. Ze znalosti fyzikálních a chemických principů sorpce molekul vody na různý materiál je možné získat další cenné informace, např. termodynamické veličiny sorpce, kritické hodnoty vlhkosti nebo aktivity vody, aktivní povrch materiálu a tím odhadnout udržitelnost materiálu během specifických podmínek skladování [49, 50].

1.3.2.1 Brunauerova-Emmettova-Tellerova Rovnice

Rovnice BET, uvedená v Rovnici 3, je nejpoužívanějším modelem v potravinářských systémech a poprvé ji navrhli Brunauer, Emmett a Teller. Představuje zásadní milník v interpretaci vícevrstvých sorpčních izoterm, zejména typů II a III. Je to také účinná metoda pro odhad množství vázané vody na specifických polárních funkčních skupinách dehydratovaných potravinových systémů. Lze ji odvodit na základě kinetické a statistické mechaniky a také z termodynamických úvah [39, 48].

$$M_w = \frac{M_0 C_{a_w}}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)}$$
(3)

Kde M_w je rovnovážný obsah vlhkosti [kg vody/kg sušiny], M_0 je obsah vlhkosti v monomolekulární vrstvě [kg vody/kg sušiny], který představuje vlhkost, při níž se voda navázaná na jednotlivé polární a iontové skupiny začne chovat jako kapalná fáze. C je energetická konstanta vztahující se k čistému sorpčnímu teplu a souvisí s rozdílem mezi

molekulami, které sorbují energii první vrstvy, a ostatními zbývajícími vrstvami a aw je aktivita vody [39].

Rovnice BET poskytuje odhad obsahu monomolekulární vrstvy vlhkosti adsorbované na povrchu, která odpovídá fyzikálně-chemické stabilitě potravinářských výrobků. Tato dvouparametrová rovnice má platnost v rozmezí aktivity vody od 0,05 do 0,45. Přestože tento model není platný v širokém rozsahu aktivit vody, je koncept monovrstvy užitečný vzhledem k jeho vztahu k několika aspektům fyzikální a chemické degradace dehydratovaných potravin. Je tedy užitečný pro stanovení optimálních vlhkostních podmínek skladování. Rovnice BET má tyto předpoklady: a) rychlost kondenzace na první vrstvě je rovna rychlosti odpařování z druhé vrstvy, b) vazebná energie všech molekul adsorbentu na první vrstvě je stejná a c) vazebná energie ostatních vrstev je stejná jako vazebná energie čistého adsorbentu. Předpoklady rovnoměrného povrchu adsorbentu a absence vzájemných interakcí mezi adsorbovanými molekulami jsou ovšem vzhledem k heterogenním interakcím na povrchu potravin příliš zjednodušené [39, 40, 46, 48].

1.3.2.2 Rovnice Guggenheim-Anderson-De Boer (GAB)

Termín GAB model pochází od jmen Guggenheim, Anderson a De Boer, kteří nezávisle na sobě odvodili tvar této rovnici. Tříparametrová rovnice GAB je vyjádřena v Rovnici 4 [39].

$$M_{w} = \frac{M_{0}CKa_{w}}{(1 - Ka_{w})(1 - Ka_{w} + CKa_{w})}$$
(4)

Kde M_w je rovnovážný obsah vlhkosti [kg vody/kg sušiny], M_0 je obsah vlhkosti v monomolekulární vrstvě [kg vody/kg sušiny], a_w je aktivita vody, C a k jsou adsorpční konstanty, které se vztahují k energii interakce mezi první a další sorbovanou molekulou v jednotlivých sorpčních místech. Teoreticky je lze vyjádřit podle Rovnice (5) a (6) [39].

$$C = c_0 exp\left(\frac{H_0 - H_n}{RT}\right) \tag{5}$$

$$K = k_0 exp\left(\frac{H_n - H_t}{RT}\right) \tag{6}$$

Kde c_o a k_0 jsou entropické akomodační faktory, H_0 , H_n a H_t jsou molární sorpční entalpie monomolekulární, vícevrstvé a kondenzované kapaliny, R je univerzální plynová konstanta (8,314 J · mol⁻¹ · K⁻¹) a T je absolutní teplota [K] [39].

V posledních letech je tato rovnice nejrozšířenějším a nejreprezentativnějším modelem pro sorpční izotermy pro potraviny. Důvodem je především její přesnost a platnost v širokém rozmezí aktivit vody od 0,1 do 0,9. Je vhodná pro analýzu více než 50 % ovoce, masa a zeleniny. Rovnice izotermy GAB je rozšířením modelu BET, která zohledňuje modifikované vlastnosti ve vícevrstvé oblasti a vlastnosti kapalné vody zavedením třetí konstanty, která měří rozdíl chemického standardního potenciálu mezi molekulami tohoto druhého stupně a molekulami čistého kapalného stavu. Tento model uvádí, že stav sorbovaných molekul ve druhé vrstvě je totožný se stavem v nadřazených vrstvách, ale liší se od molekul v kapalném stavu. Proto byl zaveden druhý stupeň sorpce molekul. Použití rovnice GAB bylo doporučeno evropským projektem COST90. Hlavní výhody modelu GAB jsou, že má reálné teoretické základy vycházející z Langmuirovy a BET teorie fyzikální adsorpce, její parametry (c_o, k₀, H₀, H_n a H_t) mají fyzikální význam z hlediska sorpčních procesů a poskytuje popis sorpčního chování téměř každého potravinářského výrobku v širokém rozmezí hodnot a_w [39, 48].

1.3.2.3 Freundlichova rovnice

Freundlichova rovnice vyjadřuje adsorpční kinetiku na heterogenních površích. Materiál poskytuje nepravidelný povrch, takže adsorpce vody probíhá ve frakčních oblastech zahrnujících n_m molekul. Na druhé straně se předpokládá, že proces desorpce probíhá podle kinetiky prvního řádu. Adsrospční rovnováhu lze pak popsat podle Freundlichovy rovnice (7) [51].

$$M_m = K_m a_w^{n_m} \tag{7}$$

Kde M_m obsah vlhkosti v monovrstvě, K_m je konstanta, a_w je aktivita vody, a n_m adsorpční exponent monovrstvy [51].
Voda může být také adsorbována na již vytvořené monomolekulární vrstvě, čímž vzniká složité vícevrstvé uspořádání, které při vysokých hodnotách aw převládá při adsorpci vlhkosti. Podobně jako v případě monovrstev lze pro tvorbu vícevrstev navrhnout Rovnici 8 [51].

$$M_M = K_M a_w^{n_M} \tag{8}$$

Kde M_m obsah vlhkosti ve vícevrstvě, K_M je konstanta, a_w je aktivita vody, a n_M adsorpční exponent vícevrstvy [51].

Celkový obsah vlhkosti je pak dán součtem vlhkosti tvořící monovrstvu a obsahem vlhkosti vícevrtsvy, což odpovídá čtyřparametrové vícenásobné Freundlichově rovnici (9) uvedené níže [51].

$$M_{w} = M_{m} + M_{M} = K_{m} a_{w}^{n_{m}} + K_{M} a_{w}^{n_{M}}$$
⁽⁹⁾

Kde Mw je rovnovážný obsah vlhkosti [kg vody/kg sušiny] [51].

Z hodnot obsahu vlhkosti v monomolekulární vrstvě a obsahu vlhkosti ve vícevrstvě se dá vypočítat takzvaná kritická aktivita vody $a_{w,c}$. Tento parametr se dá brát jako přechod mezi monomolekulární vrstvou (povrchovou) a vícevrstvou (objemovou) adsorpcí vody. z hlediska vícenásobné Freundlichovy rovnice je to ekvivalentní k výrazu $K_m a_w^{n_m} = K_M a_w^{n_M}$, takže kritická aktivita je pak dána Rovnicí 10 [51].

$$a_{w,c} = \left(\frac{K_M}{K_m}\right)^{1/(n_m - n_M)} \tag{10}$$

1.3.2.4 Rovnice podle Knaniho

Tento model zahrnuje čtyři parametry, a to počet molekul adsorbované vody na jedno místo, hustota receptorových míst a dva energetické parametry. Adsorbované množství v závislosti na aktivitě vody je vyjádřeno v Rovnici 11 [52].

$$M_{w} = \frac{Q_{0}}{\left[\left(\frac{a_{1}}{a_{w}}\right)^{n} - \left(\frac{a_{1}}{a_{2}}\right)^{n} + 1\right] \left[1 - \left(\frac{a_{w}}{a_{2}}\right)^{n}\right]}$$
(11)

Kde M_w je rovnovážný obsah vlhkosti [kg vody/kg sušiny], Q_0 je obsah vody v monomolekulární vrstvě na vnitřním povrchu [kg vody/kg sušiny], a_w je aktivita vody, n je počet adsorbovaných molekul na jedno adsorpční místo a a_1 a a_2 jsou dva bezrozměrné parametry, které souvisejí s adsorpční energií [52].

Pomocí hodnot bezrozměrných parametrů a_1 , a_2 a energie vypařování vody ΔE^v lze vypočítat molární adsorpční energii ΔE_1 (Rovnice 12) a ΔE_2 (Rovnice 13). První energie podává informaci o interakci mezi vodou a povrchem, zatímco druhá představuje interakci voda-voda [52].

$$\Delta E_1 = \Delta E^{\nu} - RT \ln(a_1) \tag{12}$$

$$\Delta E_2 = \Delta E^{\nu} - RT \ln(a_2) \tag{13}$$

Kde ΔE_1 je molární adsorpční energie v první vrstvě [J · mol⁻¹], ΔE_2 molární adsorpční energii v druhé vrstvě [J · mol⁻¹], ΔE^v je energie vypařování jednoho adsorbovaného molu molekul vody [J], R je univerzální plynová konstanta (8,314 J · mol⁻¹ · K⁻¹) a T je absolutní teplota [K] a a₁ a a₂ jsou dva bezrozměrné parametry [52].

Ze znalosti hodnot monomolekulárního obsahu vody Q_0 odhadnuté touto rovnicí je možné určit plocha povrchu A_s , která představuje celkovou plochu povrchu materiálu dostupnou pro vazbu vody. Plocha povrchu je vyjádřena v Rovnici 14 [52].

$$A_S = \frac{Q_0 N_A a}{M} \tag{14}$$

Kde A_S je ploch povrchu [m²/kg pevné látky], Q₀ je obsah vody v monomolekulární vrstvě na vnitřním povrchu [kg vody/kg sušiny], N_A je Avogadrova konstanta (6.02 \cdot 10²³ mol⁻¹), a je plocha molekuly vody (10,6 \cdot 10⁻²⁰ m²) a M je molekulová hmotnost vody (18 g \cdot mol⁻¹) [52].

Kromě těchto dvou základních matematických popisů sorpční izotermy (BET, GAB) a těch, které budou využity v experimentální části této práce (Freundlichova a Knaniho izoterma) existuje celá řada dalších matematických modelů. Některé z nich jsou uvedeny v Tabulce 2.

Název modelu	Matematické vyjádření
Langmuir	$a_w \left(\frac{1}{M_w} - \frac{1}{M_0}\right) = \frac{1}{CM_0}$
Oswin	$M_w = C \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^n$
Smith	$M_w = C_1 + C_2 \ln(1)$
Sinth	$(-a_w)$
	M _w
Halsey	$= M_0 \left(-\frac{A}{RT \ln a_w} \right)^{1/n}$
Henderson	$M_w = \left(-\frac{\ln 1 - a_w}{C}\right)^{1/n}$
Peleg	$M_w = C_1 a_w^{c_3} + C_2 a_w^{c_4}$

Tabulka 2: Další Rovnice pro výpočet sorpčních izoterm [42]

1.4 Lyofilizace

Lyofilizace neboli sušení mrazem, je speciálním druhem vakuového sušení, při kterém zmražená vlhkost materiálu přechází z tuhého skupenství rovnou do plynného skupenství. Při tomto procesu dehydratace dojde nejprve ke zmražení a poté je zmrzlý vzorek vystaven vysokému vakuu a následně dochází k sublimaci ledu [53-54].

Lyofilizace probíhá ve dvou fázích. První fází je sublimační sušení, při kterém dochází k sublimaci zmrzlé vody (ledových krystalů). Za normálních okolností dochází v této fázi k odstranění většiny vody. Druhým stupněm je desorpční sušení, během kterého se odstraní většina nezamrzlé vody adsorbované na pevné matrici. Sušení mrazem se obvykle provádí na konečný obsah vlhkosti 1–3 %. Proces lyofilizace se dá shrnout následujícími kroky [53, 55]:

- Vhodně připravený vzorek se zmrazí buď na chlazených regálech nebo mimo lyofilizátor.
- Tlak v komoře se sníží na požadovanou hodnotu (ne nutně na nejnižší hodnotu, které lze dosáhnout) a led se sublimuje dodáváním tepla do výrobku. Vodní pára se odvádí z komory a kondenzuje jako led (primární sušení).
- Zbývající nezmrzlá voda zachycená ve výrobku se odstraní dalším zahříváním při řízené rychlosti (sekundární sušení).
- 4) Nádoby se uzavřou a vyjmou ze sušárny.
- 5) Kondenzátor se zahřeje, aby se rozpustil a odstranil shromážděný led [56].

Sublimace je přímý přechod z pevného stavu do plynného stavu bez předchozího tání. k sublimaci dochází při určitém rozmezí teplot a tlaků, a to v závislosti na dané látce. Fázový diagram čisté vody (Obrázek 10) udává, že k sublimaci ledu může dojít pouze tehdy, je-li tlak páry a teplota nižší než trojný bod vody, tj. pod 611,73 Pa, respektive 0,01 °C [53].



Obrázek 10: Fázový diagram vody [53]

Vysublimovaná vlhkost ze sušeného materiálu v podobě vodní páry je adsorbována vhodným sorbentem nebo se vysráží a zachycuje se na studených plochách kondenzátoru [53, 54].

Typické lyofilizátory se skládají ze sušící komory, kondenzátoru, vývěvy a zdroje tepla. Sušicí komora (v níž je umístěn vzorek a probíhá zde ohřev/chlazení) je evakuovaná, obsahuje police a její teplotu lze regulovat pomocí cirkulující teplosměnné kapaliny. v praxi se sušení mrazem provádí při tlaku (obvykle 10-50 Pa). Kondenzátor odvádí a kondenzuje vodní páru z blízkosti ztuhlého produktu během procesu sušení. Jakmile se páry dostanou do kontaktu s povrchem

kondenzátoru, odevzdají svou tepelnou energii a změní se na krystalky ledu, které jsou následně ze systému odstraněny. Pro většinu komerčních lyofilizátorů je typická teplota kondenzátoru - 65 °C. Vývěva odstraňuje nekondenzovatelné plyny, aby se v komoře a kondenzátoru dosáhlo vysokého vakua. Zdroj tepla zajišťuje sublimační teplo a jeho teplota se může pohybovat v rozmezí -30 až -150 °C. Schéma lyofilizátoru je na Obrázku 11 [48, 53, 56].



Obrázek 11: Lyofilizátor (foto autorky)

Sublimační teplo je do vzorku dodáváno různými způsoby. Může se jednat o přenos tepla přes výhřevné plochy, tento druh sušení je nazýván kontaktní sušení, nebo je teplo dodáváno infračervenými zářiči, což je sušení radiační. Další možností dodání tepla je sálání z horkých povrchů. Zajímavou možností je též i mikrovlnný ohřev. Dva nejčastěji používané způsoby dodávky tepla jsou sálání z horkých povrchů a vedení tepla [53, 54].

V potravinářském průmyslu je zájem o komerční lyofilizaci dán vyšší kvalitou mrazem sušených produktů ve srovnání s potravinami dehydratovanými jinými metodami. Sušení mrazem probíhá při nízké teplotě, čímž se zachovává chuť, barva a vzhled a minimalizuje poškození živin citlivých na teplo. Protože celý proces probíhá v pevném stavu, nedochází ke smršťování jako při sušení horkým vzduchem a eliminují se i strukturní změny [53, 57].

Proces lyofilizace lze použít i k takzvané enkapsulaci. Enkapsulaci lze definovat jako proces, při kterém se jedna aktivní látka (jádro) uzavře do jiné struktury obalového materiálu (stěny), aby bylo "jádro" chráněno před negativními vlivy prostředí, neboť stěna funguje jako fyzikální bariéra. Enkapsulace zahrnuje různé procesy (chemické a mechanické) k zachycení aromatických látek, bioaktivní sloučeniny jako jsou antioxidanty, vitaminy, minerály, fenolické

sloučeniny nebo probiotické mikroorganismy v ochranné stěně. Aplikace enkapsulace v potravinářském průmyslu má svůj význam. Jako enkapsuláční materiály se dají použít sacharidy, bílkoviny, lipidy, biopolymery nebo povrchově aktivní látky. Aktivní látka a obalové matriály ve formě roztoků jsou v daném poměru smíchány, lyofilizovány a následně rozemlety. Citlivé materiály jsou chráněny v suché formě před chemickými reakcemi, oxidací a odpařováním a celkově dochází ke stabilizaci labilních sloučenin. Lyofilizace se používá k dehydrataci těkavých materiálů, které jsou citlivé na teplo a je vhodná k enkapsulaci přírodních aromat a ve vodě rozpustných silic i léčiv. Rovněž mohou obalové materiály modulovat rychlost uvolňování aktivních sloučenin [36, 58-60].

1.5 Infračervená spektroskopie

Infračervená (IR) spektroskopie je jednou z nejdůležitějších analytických technik, které mají dnešní vědci k dispozici. Výhodou infračervené spektroskopie je, že lze studovat prakticky jakýkoli vzorek v prakticky jakémkoli stavu. Kapaliny, roztoky, pasty, prášky, vlákna, plyny a povrchy lze zkoumat při rozumné volbě techniky odběru vzorků. v důsledku zdokonalení přístrojového vybavení byla vyvinuta řada nových citlivých technik, které umožňují zkoumat dříve obtížně analyzovatelné vzorky [61].

Infračervené záření je elektromagnetické záření s rozsahem vlnových délek od 780 nm do 1 mm, což odpovídá vlnočtu 12500 až 10 cm⁻¹. Infračervená spektroskopie se dělí na tři základní oblasti. Blízká IR je v rozmezí 0,7-2,5 μ m a 12500-4000 cm⁻¹. Střední oblast je v rozmezí 2,5-50 μ m a 4000-200 cm^{-1 a} vzdálená oblast leží mezi 50-1000 μ m a 200-10 cm⁻¹. Nejdůležitějším a nejvyužívanějším spektrálním rozsahem pro analytické účely je infračervený rozsah středních vlnových délek od 2,5 do 25 μ m [62-65].

Elektromagnetické záření lze v mnoha ohledech považovat za proud částic (neboli kvant), pro něž je energie E dána Rovnicí 15 [61].

$$E = h \cdot \nu \tag{15}$$

Kde E je energie [J], h je Planckova konstanta, která má hodnotu (6,626 \cdot 10⁻³⁴ J \cdot s) a v je frekvence [cm⁻¹] [61].

V IR spektroskopii existují dvě základní experimentální techniky, transmisní a reflektanční. Transmisní technika je založena na absorpci infračerveného záření o specifických vlnových délkách při průchodu vzorkem. Při použití této metody je možné analyzovat vzorky v kapalném, pevném nebo plynném skupenství. k získání infračerveného spektra využívají transmisi, tedy průchod světla přes vzorek. Následně se určí, jaká část záření je absorbována vzorkem při určité energii pomocí měření intenzity světla dopadajícího na detektor. Reflektanční techniky fungují na principu odrazu infračerveného paprsku na povrchu vzorku. Reflektanční metody lze rozdělit do dvou kategorií. Měření vnitřní reflektance lze provádět pomocí cely s tlumenou totální reflektancí, která je v kontaktu se vzorkem. Existuje také řada měření vnější reflektance, která zahrnují infračervený paprsek odražený přímo od povrchu vzorku. Mezi různé typy reflexní spektroskopie patří například infračervená reflexně-absorpční spektroskopie (IRAS) a zeslabená totální reflektance (ATR) [61, 63, 64, 66].

Intenzitu detekovaného záření lze vyjádřit jako procento transmitance (T(%)) nebo jako absorbanci (A). Absorbance se pohybuje v rozmezí hodnot od 0 do nekonečna a transmitance se pohybuje od 0 do 100 % T (0 % T odpovídá absorbanci nekonečna). Infračervené absorpční spektrum materiálu se obvykle zobrazuje jako graf závislosti absorbance na vlnočtu. Jestliže I₀ je energie dopadajícího záření a I je energie detekovaného procházejícího záření, lze transmitanci vyjádřit podle Rovnice 16, procenta transmitance podle Rovnice 17 a absorbanci podle Rovnice 18 [63, 64, 67, 68].

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{16}$$

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} \cdot 100 \tag{17}$$

$$A = \log \frac{I}{T} = \log \frac{I_0}{I} \tag{18}$$

Kde T je transmitance. T(%) je transmitance vyjádřená v procentech, a je absorbance, I_0 je intenzita původního, dopadajícího záření a I je intenzita detekovaného záření [64].

Užitečnou rovnicí pro studium kvantitativních aspektů absorpce je Lambert-Beerův zákon (19). Zákon tvoří kvantitativní základ pro všechny typy absorpční spektroskopie a vyjadřuje vztah absorbance k vlastnostem prostředí [67].

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot c \tag{19}$$

Kde a je absorbance, ε je molární absorpční koeficient [dm³·mol⁻¹·cm⁻¹], l je délka absorpční vrstvy [cm] a c je koncentrace [mol·L⁻¹] [67].

Získání infračerveného spektra vyžaduje detekci změn intenzity v závislosti na vlnočtu. Komerční infračervené přístroje nazývané spektrometry rozdělují světlo na jednotlivé intervaly vlnočtů pomocí disperzního spektrometru, spektrometru s Fourierovou transformací nebo nastavitelného infračerveného laserového zdroje [64].

Mezi hlavní přednosti infračervené spektroskopie patří její citlivost na funkční skupiny, zatímco ostatní techniky jsou citlivé především na prvky. Mnoho funkčních skupin vibruje na téměř stejných frekvencích nezávisle na svém molekulárním prostředí. Díky tomu je infračervená spektroskopie užitečná při charakterizaci materiálů. Dále lze z frekvenčních posunů a změn intenzity vznikajících spojením vibrací různých chemických vazeb a funkčních skupin zjistit mnoho strukturních detailů. Tato technika je také nedestruktivní a kvantitativní [64,68].

1.5.1 Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) je založena na myšlence interference záření mezi dvěma paprsky, která vede k výslednému interferogramu modulovaného svazku záření. Interferogram je signálem, který vzniká jako funkce změny délky dráhy mezi dvěma paprsky v závislosti na intenzitě. Fourierovu transformací interferogramu lze následně získat infračervené absorpční spektrum vzorku [61, 64, 68].

Ve spektrometru FTIR zdroj (např. odporově vyhřívaná keramická tyč nebo vysokotlaká rtuťová výbojka) vyzařuje infračervené záření, které je fokusováno na interferometr, jehož hlavní součásti se skládají z rozdělovače paprsků, pevného zrcadla, pohyblivého zrcadla a detektoru. Rekombinace paprsků v interferometru vytváří modulovaný rozdíl optických drah. Rekombinovaný paprsek podléhá konstruktivní a destruktivní interferenci v závislosti na

okamžitém rozdílu optických drah. k vytvoření modulovaného rozdílu optických drah lze použít několik metod. Nejběžnější je Michelsonův interferometr [64, 68].

Základní schéma FTIR spektrometru je znázorněno na Obrázku 12. Záření vycházející ze zdroje prochází interferometrem ke vzorku a teprve poté se dostane k detektoru. Po zesílení signálu, v němž byly vysokofrekvenční příspěvky eliminovány filtrem, jsou data převedena do digitální podoby analogově-digitálním převodníkem a přenesena do počítače k Fourierově transformaci [61].



Obrázek 12: Schéma FTIR spektrometru [64]

Mezi výhody infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací patří bezesporu to, že informace o celém infračerveném spektru je obsažena v jednom interferogramu a pořízení takového záznamu trvá 1 sekundu nebo méně [64].

Jednou z užitečných reflektančních technik je spektroskopie zeslabené totální reflektance, ve které se využívá jevu totálního vnitřního odrazu. Při ATR se krystal z materiálu s relativně vysokým indexem lomu umístí do těsného kontaktu se vzorkem a infračervené záření se odráží od rozhraní krystal/vzorek. Při vlnových délkách, kdy vzorek absorbuje záření, je však reflektance "zeslabená" nebo menší než úplná. v ATR tak lze získat absorpční spektrum, které je podobné spektru získanému při transmisi [61, 64, 68].

Prakticky je ATR založena na ztrátě intenzity infračerveného záření po totálním odrazu na jedné nebo více plochách takzvaného vnitřního reflexního prvku (IRE), krystalu, z materiálu s vysokým indexem lomu (obvykle větším než 2). Světlo vstupuje do IRE pod určitým úhlem a je vnitřně odráženo na každém rozhraní vzorek/IRE. Vzorek může být roztok, nanesený film nebo pevná látka přitlačená k IRE. Pokud úhel dopadu na rozhraní mezi vzorkem a krystalem překročí kritický úhel, světlo se zcela odrazí dovnitř (dojde k totální vnitřní reflektanci). Přičemž kritický úhel je funkcí indexů lomu obou povrchů. Při úplném odrazu vzniká uvnitř IRE v každém bodě odrazu stojatá vlna kolmá k povrchu nebo evanescentní vlna. Pokud je IRE v těsném kontaktu se vzorkem, proniká vlna do tohoto vzorku na krátkou vzdálenost (řádově vlnová délka světla) a může být vzorkem selektivně pohlcována, jak ukazuje Obrázek 13 [61, 64, 70].



Obrázek 13: Schéma vnitřního reflexního prvku [64]

Měření zeslabeného celkového odrazu lze provádět na disperzních přístrojích nebo přístrojích s Fourierovou transformací. Spektra zeslabeného celkového odrazu zaznamenaná na FTIR přístrojích jsou obecně lepší než disperzní ATR spektra. Zlepšení citlivosti FTIR spektrofotometrů v průběhu let umožnilo měřit ATR spektra s pomocí příslušenství s jedním odrazem. To značně usnadňuje přípravu vzorků a mnoho levných FTIR přístrojů je nyní obvykle tímto příslušenstvím vybavena. z tohoto důvodu se ATR stala metodou volby pro získání infračervených spekter v mnoha analytických laboratořích [64].

1.6 Měření barevnosti

Barva je obvykle považována za nejdůležitější atribut vzhledu každé potraviny, zejména pokud je spojena s dalšími aspekty kvality potravin, například s dozráváním ovoce nebo viditelným znehodnocením, ke kterému dochází při kažení potraviny [71].

V procesu vizuálního pozorování objektu existují tři složky nebo prvky, jak je znázorněno na Obrázku 14. Jsou to jmenovitě zdroj světla, pozorovaný objekt a lidský pozorovatel. Všechny tři faktory ovlivňují barvu a vzhled, které pozorovatel vnímá. Ke klasifikaci, odhadu a měření barevného podání jakéhokoli objektu jsou tedy zapotřebí tři vzájemně se ovlivňující faktory: pochopení lidského zrakového procesu, vliv světla na prostředí a povaha sledovaného materiálu [71, 72].



Obrázek 14: Tři elementy barevného vidění [72]

Zdroj osvětluje objekt a je charakterizován vyzařovanou energií různých vlnových délek, což je charakterizováno parametrem spektrální intenzity vyzařování. Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) definovala několik standardizovaných zdrojů osvětlení. Pro denní osvětlení se používá označení D a následně jsou označovány podle korelovaných teplot barev. Nejdůležitějším zdrojem je D65, což je černý objekt s teplotou barvy 6500 K. Dále se také používají zdroje D50, D55, D75 atd [72, 73].

Když světlo dopadá na objekt, je světelný paprsek modifikován absorpcí, rozptylem a dalšími fyzikálními procesy, které závisí na fyzikální a chemické struktuře objektu. Nakonec se světlo dostane do oka pozorovatele ve formě odraženého nebo lomeného světla. Světlo citlivé pigmenty v oku absorbují světelnou energii. Tím vznikají nervové impulsy, které jsou přenášeny do mozku. Mechanismus lidského oka a mozku provádí rychlé a nepřetržité vyhodnocování vzhledu a barvy objektů. Světlo, které vstupuje do našich očí, obsahuje charakteristické otisky zdroje světla i objektu [72].

Aspekt zářivé energie, který si prostřednictvím zrakových vjemů vznikajících podnětem na sítnici oka lidský pozorovatel uvědomuje, je viditelné světlo. Vlnová délka viditelného světla se pohybuje v rozmezí přibližně 380 a 780 nm. Čípkové vidění je trichromatické. To znamená, že jakémukoli barevnému světlu může odpovídat vhodná směs červeného (R), zeleného (G)

a modrého (B) primárního světla. Složka světlosti se skládá z váženého součtu všech tří absorpcí pigmentu čípků, zatímco míra rozdílů mezi absorpcemi R, G, B vytváří mechanismus barevného protějšku [71, 72].

Za účelem konzistentního hodnocení barev definovala Mezinárodní komise pro osvětlení v roce 1931 standardního (kolorimetrického) pozorovatele. Standardní pozorovatel byl založen na sérii experimentů, při nichž pozorovatel určil množství tří základních barev (červené, zelené a modré), které je nutné k tomu, aby odpovídaly barvám všech vlnových délek viditelného spektra. Tyto soubory tří hodnot se nazývají tristimulové hodnoty. Vzhledem k rozmístění tří různých typů čípků s různými hodnotami citlivosti v oku závisí tristimulové hodnoty na zorném poli pozorovatele. Údaje pro standardního pozorovatele byly získány pro průměrného člověka, který se dívá na objekt pod úhlem 2 °. a to z důvodu přesvědčení, že v lidském oku jsou receptorové čípky, které jsou zodpovědné za barevné vidění, soustředěny v oblasti 2 ° kolem fovey. Později se ukázalo, že většina hodnocení zraku se provádí se zorným polem mnohem větším než 2 °. v roce 1964 proto CIE zavedla standardní pozorovací úhel 10 ° – 10 ° zahrnuje oblast v oblasti fovey, která obsahuje tyčinkové receptory (zodpovědné za rozlišování světla), a je tak bližší lidskému vidění [71, 73, 74].

Pro usnadnění byla data matematicky transformována tak, aby odpovídala použití imaginárních primárních světel označených X, Y a Z. Tím byl tedy definován jeden z prvních systém měření barev, takzvaný systém CIE XYZ 1931. Tento prostor ovšem není vizuálně jednotný. Proto byl vyvinut takzvaný prostor CIELAB, který pomocí nelineární transformace převádí hodnoty X, Y a z na souřadnice L^* , a^* , b^* . Konkrétně je parametr Y transformován na parametr L^* , X a Y na a^* a z a Y na b^* . Parametr L^* je osou světlosti (vlastnost, podle které se posuzuje, zda objekt odráží více či méně světla, 0 = dokonalá černá, 100 = dokonalá bílá), osa vyjadřující červenou/zelenou barvu je charakterizována parametrem a^* (- a^* = zelená, + a^* = červená) a osa pro žlutou/modrou barvu je popsána parametrem b^* (- b^* = modrá, + b^* = žlutá). Systém CIELAB je znázorněn na Obrázku 15 [72-74].



Obrázek 15: Zobrazení prostoru L*, a*, b* [74]

Osy a^* a b^* jsou odstupňovány od hodnot -100 do +100. z hodnot a^* a b^* lze vypočítat odstín h° (Rovnice 20) a sytost C^* (Rovnice 21). Odstín je definován jako vlastnost barvy popsaná běžnými názvy, jako je červená, žlutá, zelená, modrá atd. Sytost neboli chroma udává intenzitu barvy [71, 72].

$$h^{\circ} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \tag{20}$$

$$C^* = \sqrt{\left(a^{*^2} + b^{*^2}\right)} \tag{21}$$

Obvyklé válcové zobrazení světlosti, odstínu a sytosti je znázorněno na Obrázku 16. Odstíny jsou běžně uspořádány do kruhu v pořadí, v jakém se vyskytují ve spektru, a proto jsou vyjadřovány jako úhly a světlost je znázorněna přímkou procházející středem kruhu odstínu a kolmou na jeho rovinu [72, 73].



Obrázek 16: Uspořádání os odstínu, světlosti a sytosti [73]

Dalším parametrem je celkový barevný rozdíl ΔE^* . Ten lze vyjádřit buď jako souřadnice barevného prostoru, nebo jako souřadnice světlosti, chromatičnosti a odstínu, jak je uvedeno v Rovnici 22 [71].

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta h^*)^2}$$
(22)

Standardní pozorovatel vnímá na základě hodnot ΔE^* rozdíl barev následovně:

- $0 < \Delta E^* < 1$ pozorovatel si rozdílu nevšimne,
- $1 < \Delta E^* < 2$ rozdílu si všimne pouze zkušený pozorovatel
- $2 < \Delta E^* < 3,5$ rozdílu si všimne i nezkušený pozorovatel,
- $3,5 < \Delta E^* < 5$ zřetelný rozdíl v barvě,
- $5 < \Delta E^*$ pozorovatel si všimne dvou různých barev [75].

Důležitým faktorem pro měření barev je i geometrie přístroje. Světlo se může šířit jedním směrem reprezentovaným vektorem nebo rozptýleně všemi směry. Spektrofotometry měří spektrální odrazivost ve viditelném spektru vzhledem k určité referenční hodnotě. Úhel pohledu a podmínky osvětlení výrazně ovlivňují vnímanou barvu. Geometrie osvětlovacích a pozorovacích světel v těchto přístrojích může být dvojího typu, a to obousměrná geometrie nebo difuzní geometrie pomocí integrované (sférické) koule. Spektrofotometry jsou obvykle konstruovány na základě dvou typů geometrie, 45°/0° (obousměrné) a d/8° (difúzní). Na základě definic CIE se první číslo týká geometrie zdroje osvětlení a druhé označuje geometrii pozorování. Termín "d" (difúzní) znamená, že osvětlení nebo zobrazení není směrové, ale je do

jisté míry rozptýlené, obvykle pomocí sférické koule. Pro difúzní osvětlení nebo pro zobrazení v rozptýleném světle se používá speciální zařízení. Jedná se o dutou kouli, která je uvnitř potažena spektrálně neselektivním (bílým) materiálem s vysokou difúzní odrazivostí. Koule může mít libovolný průměr za předpokladu, že celková plocha otvorů nepřesahuje 10 % celkové vnitřní odrazné plochy. Integrační koule nasměruje zdroj světla na objekt a shromažďuje prakticky veškeré odražené světlo od objektu s kulovou dutinou, která je zcela rozptýlená a velmi bílá [72].

CIE doporučuje měřit činitel odrazu za jedné ze čtyř podmínek osvětlení a pohledu (CIE, 1986), které jsou znázorněny na Obrázku 17 a to:

- a) Osvětlení 0 ° a pozorování 45 °,
- b) Osvětlení 45 ° a pozorování 0 °,
- c) 8° osvětlení a rozptýlené zobrazení,
- d) Difuzní osvětlení a pozorovací úhel 8 ° [72].



Obrázek 17: Geometrie měření [72]

S rozvojem počítačů se dnes složitá měření a výpočty barev běžně používají v průmyslových procesech. Instrumentální měření barev se stále častěji používá pro standardizaci přísad a kontrolu kvality výrobků v potravinářském průmyslu [71].

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1.7 Přístroje a pomůcky

Automatická potahovačka Q150R Plus (Quorum Technologies Ltd., Velká Británie)

Digitální analytické váhy A&D HR-200

Gravimetrický systém DVS Intrinsic Plus (Measurement System Ltd., Velká Británie)

Infračervený spektrofotometr s Fourierovou transformací Nicolet iS50 FT-IR (Nicolet CZ, Praha, Česká republika)

Laboratorní váhy KERN 440-35N (KERN & SOHN, Německo)

Lyofilizátor Gregor L4- 110 PRO (GREGOR Instruments, s. r. o., ČR)

Magnetické míchadlo IKA[®] RCT digital (*IKA-Werke GmbH & Co. KG, Německo*)

Síto (100 µm) (FRITSCH GmbH, Německo)

Skenovacím elektronovým mikroskopem Tescan Vega3-SBU (Tescan Orsay Holding, a. s., ČR)

Spektrometr UltraScan VIS (HunterLab; USA)

1.8 Vzorky

Plody trnky obecné (viz kapitola 1.9), maltodextrin DE15, inulin a chitosan v práškové formě (Pharao Pictures, ČR)

1.9 Příprava vzorků

Plody byly sbírány v průběhu října 2023 v blízkosti Chrudimi, konkrétní lokalita je vyznačena na Obrázku 18. Přibližní zeměpisné souřadnice jsou: N 49°57.74287', E 15°50.21462'. Foto ze sběru je k vidění na Obrázku 19.



Obrázek 18: Mapa sběru



Obrázek 19: Foto trnky obecné ze sběru (foto autorky)

Po nasbírání bylo 500 g plodů zalito jedním litrem vroucí vody, nechalo se odstát 1 minutu a následně bylo prudce ochlazeno studenou vodou. Takto ošetřené plody byly zbaveny pecek a dužina byla v sáčcích zmražena na -25 °C. Slupky byly v průběhu procesu přípravy vzorků odstraněny. Před přípravou suspenzí se plody nechaly po dobu 24 hodin rozmrznout při 5 °C.

Nejprve byly připravenyvsuspenze dužiny trnky obecné se třemi druhy polysacharidů v prášku. Konkrétně se jednalo o maltodextrin (DE 15), inulin a chitosan. Byly připraveny směsi s obsahem 5, 15, 30 a 50 hm % polysacharidů, a to v poměru 1:2 (dužina trnek/voda). Tento poměr byl zvolen z důvodu snadného míchání výsledné hmoty. Na laboratorních vahách bylo do kádinky naváženo přibližně 35 g dužiny trnek. Vypočtené množství polysacharidů bylo rozpuštěno v poměrném množství destilované vody, zbytek vody byl použit na vypláchnutí kádinky.

Poté byla připravena suspenze obsahující pouze dužinu trnky obecné jako kontrolní vzorek. v případě polysacharidů (35 g) byly připraveny roztoky v destilované vodě (70 g).

Roztoky byly následně na 30 minut umístěna na magnetické míchadlo (IKA RCT digital) při rychlosti otáčení 400 rpm. Poté byla směs nalita do Petriho misek (průměr 10 cm) do výšky 0,5 cm a umístěna do -25 °C.

Po zmražení následovala lyofilizace po dobu 25 hodin, která proběhla v lyofilizátoru L4-110 PRO se systémem řízené teploty polic a teplotou kondenzoru -110 °C. Program lyofilizace je uveden v Tabulce 3.

Krok č.	t [min]	p [hPa]	T polic [°C]
1	120	2,5	-20
2	180	1,5	-10
3	600	1	0
4	360	0,5	15
5	240	0	25

Tabulka 3: Program lyofilizace

Následovalo dosušení v exsikátoru nad čerstvě vyžíhaným silikagelem po dobu 1 týdne ve tmě při laboratorní teplotě. Po dosušení byl vzniklý materiál drcen v třecí misce a pak byla pomocí prosévačky shromážděna frakce o velikosti částic menší než 100 µm. Prášek o vybrané velikosti částic byl přesypán do malých zkumavek. Ty byly uchovávány po celou dobu experimentu v exsikátorech nad silikagelem v temnu při laboratorní teplotě.

Pro lepší orientaci v textu a grafech byly všem lyofilizovaným práškům byly přiděleny kódy, které jsou uvedeny v Tabulce 4.

Složení prášku	Kód
Prášek z dužiny trnky obecné	PPS
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 5 % inulinu	PPS-In5
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 15 % inulinu	PPS-In15
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 30 % inulinu	PPS-In30
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 50 % inulinu	PPS-In50
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 5 % maltodextrinu	PPS-Mdx5
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 15 % maltodextrinu	PPS-Mdx15
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 30 % maltodextrinu	PPS-Mdx30
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 50 % maltodextrinu	PPS-Mdx50
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 5 % chitosanu	PPS-Ch5
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 15 % chitosanu	PPS-Ch15
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 30 % chitosanu	PPS-Ch30
Prášek z dužiny trnky obecné s přídavkem 50 % chitosanu	PPS-Ch50
Prášek z čistého inulinu	PIn
Prášek z čistého maltodextrinu	PMdx
Prášek z čistého chitosanu	PCh

Tabulka 4: Kódy vzorků lyofilizovaných prášků

1.10 Měření barevnosti

Barva prášků byla měřena ve 3 opakováních spektrometrem UltraScan VIS (*Hunterlab, USA*). Tento přístroj je dvoupaprskový s d/8 ° geometrií, jako zdroj záření byla použita pulsní xenonová lampa (D65) a jako detektor sloužila dvě diodová pole s vysokým rozlišením v rozsahu vlnových délek 360–780 nm.

Pro měření barevnosti vzorků v práškové formě bylo potřeba zajistit jejich kompaktnost. k tomu byl vyroben z plastové injekční stříkačky improvizovaný lis. Ze stříkačky byla odstraněna část komory s hrdlem. Na zbylou část komory bylo vteřinovým lepidlem nalepeno optické sklo. Vzorky prášků byly přitlačeny pístem v komoře stříkačky proti optickému sklu. Stříkačka byla přiložena kolmo ke sférické kouli a bylo změřeno barevné spektrum v režimu odrazu pouze v difúzní složce odraženého světla. Poté byla stříkačka vymyta vodou a ethanolem a usušena v sušárně. Tento postup se opakoval u všech vzorků. Každý vzorek byl takto proměřen třikrát.

Měření bylo provedeno v barevném systému CIELAB. Byly měřeny parametry L^* , a^* a b^* . Dále byly určeny parametry $h^\circ a C^*$. Barvová odchylka ΔE byla vypočítána podle Rovnice 22. Jako standard byl použit vzorek PPS. Data byly vyhodnoceny pomocí softwaru EasyMatch QC (v. 2.70, *HunterLab*, *USA*). Pro potřeby vizualizace barvy v tabulkách výsledků byly hodnoty L^* , a^* a b^* převedeny na hodnoty R, G, B pomocí aplikace dostupné na adrese https://colorizer.org.

1.11 ATR-FTIR spektrometrie

Ke stanovení spekter všech prášků byl použit jednopaprskový infračervený spektrometr s Fourierovou transformací Nicolet iS50 FT-IR (*Nicolet, CZ, Praha, ČR*), který pracuje na principu Michelsonova interferometru a je vybavený ATR. Spektrum bylo měřeno ve spektrálním rozsahu vlnočtů 4000-400 cm^{-1 s}rozlišením 4 cm⁻¹, počtem skenů 50 a vyhodnoceno softwarem

Na ATR modul bylo nadávkováno malé množství vzorků a bylo proměřeno spektrum proti vzduchu. Vzápětí byl ATR modul očištěn a proměřeny zbývající vzorky.

1.12 Skenovací elektronová mikroskopie

Vzorky prášků byly před mikroskopováním potaženy 5 nm vrstvou zlata pomocí přístroje Q150R Plus (*Quorum Technologies Ltd., Velká Británie*) pro zlepšení povrchové vodivosti. Snímky byly pořízeny skenovacím elektronovým mikroskopem Tescan Vega3-SBU (*Tescan Orsay Holding, a. s., ČR*) v zobrazení zpětně odražených elektronů, s urychlovacím napětím 10 kV a ve 400násobném zvětšení.

1.13 Měření adsorpce vlhkosti

1.13.1 Adsorpční izotermy

Izotermy adsorpce vlhkosti ve vzorcích prášků byly stanoveny pomocí gravimetrického systém DVS Intrinsic Plus (Pragolab s.r.o., Praha, Česká republika) při teplotě 25 °C. Vzorky o hmotnosti 10 ± 1 mg byly vloženy do předem zvážené hliníkové misky na vzorky a zavěšena na citlivé analytické váhy (rozlišení vah $\pm 0.1 \ \mu g$) v uzavřeném prostoru. Vlhkost v komůrce byla nastavena na hodnoty relativních vlhkostí od 0 do 50 % v 5% intervalech a dále od 50 do 90 % v 10% intervalech. Vlhkost v komůrce byla měněna pomocí proudu vzduchu (rychlost proudění 200 ccm), který proudil přes rezervoár s redestilovanou vodou. Před vlastním měřením byl vzorek vysušen proudem suchého vzduchu (RH < 1,8 %) po dobu 180 min. Hmotnost vzorku byla kontinuálně zaznamenávaná v minutových intervalech. Adsorpce vlhkosti při dané úrovní relativní vzdušné vlhkosti v komůrce probíhala do rovnovážného stavu. Ten byl pro účely experimentu definován jako procentuální změna hmotnosti v čase, tj. dm/dt $\leq 0,002$ % během 20 min. Změny hmotnosti v čase byly přepočítány na obsah vlhkosti v sušině vzorku. Sušina vzorku byla určena jako hmotnost vzorku po expozici suchého vzduchu. Nastavení experimentálních podmínek proběhlo pomocí softwaru DVS Control Software (v. 1.3.0.0, Surface Measurement Systems, Velká Británie). Experimentální data byla vyhodnocena doplňkem DVS Standard Analysis Suite (v. 7.4, Surface Measurement Systems, Velká Británie) v rámci programu Excel (Microsoft Corp., USA). Pro matematický popis sorpčních izoterm byly použity následující tři Rovnice:

- tříparametrová rovnice GAB (Rovnice 4),
- čtyřparametrová vícenásobná Freundlichova rovnice (Rovnice 9),
- čtyřparametrová rovnice podle Knaniho (Rovnice 11).

1.13.1.1 Statistická analýza

Statistické analýzy byly provedeny pomocí programu Statistica 14 (v. 14.0.0.15, TIBCO software Inc., USA). Pro odhad parametrů rovnic a vyhodnocení jednotlivých modelů byla použita nelineární regrese s metodou nejmenších čtverců.

Vhodnost a použitelnost jednotlivých modelů (rovnic) byla hodnocena podle tří kritérií, a to koeficientu determinance R², střední absolutní procentní chyba odhadu (MAPE) a bezrozměrné

Akaikeho informační kritérium (AIC). u všech modelů a parametrů byla na hladině významnosti p = 0.05 testována statistická významnost pomocí F-testu a t-testu.

Koeficient determinance je základním ukazatelem míry vhodnosti použitého modelu, vyjadřuje, jaký podíl z celkové variability závislé proměnné regresní model vysvětluje. Může nabývat hodnoty od 0 % do 100 %, přičemž maximální hodnota 100 % znamená dokonalou predikci hodnot závislé proměnné.

Koeficient MAPE udávaný v procentech je měřítkem přesnosti modelu. Bezrozměrné Akaikeho informační kritérium slouží k posouzení schopnosti různých modelů vysvětlit variabilitu v pozorovaných datech. u obou kritérií platí, že čím nižší hodnota, tím je model přesnější a vhodnější.

Koeficient determinance a chyby odhadů pro výpočet MAPE poskytl program Statistica 14. Kritérium AIC je pak vypočteno podle Rovnice 23.

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSC}{n}\right) + 2m \tag{23}$$

Kde n je počet dat, m je počet parametrů a RSC je reziduální součet čtverců.

1.13.2 Rychlost adsorpce vlhkosti

Rychlost adsorpce vlhkosti ve vzorcích prášků byla měřena gravimetrickým systém DVS Intrinsic Plus (*Measurement System Ltd., Velká Británie*) pracující se softwarem DVS Control Software (v. 1.3.0.0, *Surface Measurement Systems, Velká Británie*). Vzorky o hmotnosti 10 ± 1 mg byly vloženy do misky na vzorky a vystaveny sérii rovnovážných relativních vlhkostí 0 %, 20 %, 40 %, 60 % a 80 při teplotě 25 °C po dobu 200 min. Hmotnost vzorku byla zaznamenávaná každou minutu a tím byla získána závislost hmotnosti (v %) na čase. z této závislosti byla zjištěna rychlost adsorpce vlhkosti během 60 min po změně relativní vlhkosti. Experimentální data byla vyhodnocena programem Microsoft Excel pomocí softwaru DVS Standard Analysis Suite (*Surface Measurement Systems, verze 7.4*). Pro následnou analýzu byla použita data pro prvních 60 min sorpce.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

1.14 Měření barevnosti

Základními parametry pro popis barev jsou parametry L^* , a^* a b^* . Parametr L^* vyjadřuje světlost barvy, parametr a^* popisuje červenou (+ a^*) a zelenou barvu (- a^*) a parametrem b^* popisuje žlutou (+ b^*) a modrou (- b^*) barvu. Tyto parametry jsou uvedeny v Tabulce 5.

Vzorek	L*	<i>a</i> *	<i>b</i> *	ΔE^{*}
PPS	$19{,}69\pm0{,}09$	$17{,}52\pm0{,}09$	$4,5 \pm 0,2$	_
PPS-In5	$19,8\pm0,1$	$14,3 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$
PPS-In15	$28{,}5\pm0{,}6$	$14,9\pm0,1$	$3,4 \pm 0,1$	$9,4 \pm 0,1$
PPS-In30	$25{,}9\pm0{,}2$	$13,9 \pm 0,4$	$6,1 \pm 0,2$	$7{,}4\pm0{,}35$
PPS-In50	$39,06\pm0,09$	$14,8\pm0,2$	$3,76\pm0,09$	$19{,}68\pm0{,}06$
PPS-Mdx5	$24{,}9\pm0{,}2$	$16,5 \pm 0,2$	$4,28 \pm 0,02$	$5,42 \pm 0,03$
PPS-Mdx15	$29{,}9\pm0{,}2$	$14,6 \pm 0,3$	$3,46 \pm 0,07$	$10,1 \pm 0,1$
PPS-Mdx30	$33,2 \pm 0,2$	$12,6 \pm 0,3$	$5{,}08\pm0{,}04$	$14,\!46\pm0,\!07$
PPS-Mdx50	$42,\!96\pm0,\!07$	$12,\!49\pm0,\!06$	$3,6 \pm 0,1$	$23,\!93\pm0,\!09$
PPS-Ch5	$26,7\pm0,6$	$7,1 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,4$	$12,73 \pm 0,07$
PPS-Ch15	$25{,}8\pm0{,}2$	$0,51 \pm 0,06$	$0,73\pm0,06$	$18{,}60\pm0{,}07$
PPS-Ch30	28 ± 8	0 ± 2	1 ± 1	21 ± 2
PPS-Ch50	$37,7 \pm 0,3$	$-2,23 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$	$26{,}90\pm0{,}09$

Tabulka 5: Barevnost prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In), maltodextrinu (Mdx) a chitosanu (Ch)

Aritmetický průměr \pm standardní odchylka (N = 3).

Základní hodnoty L^* , a^* , b^* pro PPS byly 19,69 ± 0,09; 17,52 ± 0,09; 4,5 ± 0,2. Pro nízké hodnoty (od 0 do ca 40) světlosti L^* v kombinaci s nízkými hodnotami v pozitivní oblasti parametru a^* (od 0 do ca 20) je parametr b^* , který běžně určuje žlutou a modrou barvu, při pozitivních hodnotách vyjadřuje spíš hnědou barvu. Také platí, že čím více se hodnoty a^* a b^* blíží 0, tím blíže je barva přechodu mezi dvěma barvami a je tak více neutrální (má šedé odstíny).

Přídavkem 5 % (*m/m*) inulinu zůstala hodnota L^* stejná (19,8 ± 0,1), zatímco přídavek 15 % (*m/m*) hodnotu L* zvýšil na 28,5 ± 0,2 ve srovnání s vzorkem PPS. Dalším přídavkem se hodnota světlosti snížila na 25,9 ± 0,2 a následně se posledním přídavkem opět zvýšila na 39,06 ± 0,09. Lze konstatovat, že přídavky vyšší než 15 % (*m/m*) inulinu způsobily významné

zesvětlení barvy vzorku. Všechny hodnoty parametru a^* , který určuje přechod mezi červenou a zelenou barvou, byly pro všechny přídavky inulinu oproti PPS nižší. Vzorky s přídavky byly méně červené. Mezi hodnotami parametru a* a množstvím inulinu ve vzorku nebyl nalezena žádná zřejmá souvislost. Nejnižší hodnotu parametru b^* měl vzorek PPS-In15, u něj se hodnota oproti PPS snížila z 4,5 ± 0,2 na 3,4 ± 0,1. Jediný přídavek 30 % (*m/m*) inulinu hodnotu parametru b^* oproti PPS zvýšil na 6,1 ± 0,2, takže byl tento vzorek víc hnědý. Všechny vzorky s přídavky byly světlejší než samotný prášek z dužiny trnky obecné, méně červené a méně hnědé (s výjimkou PPS-In30).

Přídavky maltodextrinu postupně zvedaly hodnoty světlosti barvy (parametr L*). z původní hodnoty pro PPS 19,69 ± 0,09 až na hodnotu pro PPS-Mdx50 42,96 ± 0,07. Vzorek s nejvyšším přídavkem maltodextrinu byl výrazně světlejší než PPS, a dokonce byl nejvíce světlý i v porovnání s přídavky ostatních polysacharidů. Hodnoty a^* se s postupnými přídavky postupně snižovaly, takže byly vzorky méně červené. Parametr a^* v porovnání s PPS klesl z 17,52 ± 0,09 na 16,5 ± 0,2 pro PPS-Mdx50, na 14,6 ± 0,3 pro PPS-Mdx15, na 12,6 ± 0,3 pro PPS-Mdx30 a na 12,49 ± 0,06 PPS-Mdx50. Rovněž parametr b^* se s přídavky maltodextrinu oproti PPS snižoval. Nejnižší hodnota byla stejně jako u přídavků inulinu u druhého přídavku. u vzorku PPS-Mdx15 klesla hodnota parametru $b^* z 4,5 \pm 0,2$ na 3,46 ± 0,07 ve srovnání s PPS vyšší (5,08 ± 0,04). Vzorky PPS-Mdx5, PPS-Mdx15 a PPS-Mdx50 byly oproti PPS méně hnědé, vzorek PPS-Mdx30 byl naopak více hnědý. Čím vyšší přídavek maltodextrinu, tím byly vzorky světlejší, méně červené a hnědé (s výjimkou PPS-Mdx30).

I přídavky chitosanu postupně zvyšovali hodnoty světlosti. Hned první přídavek zvýšil hodnotu L^* oproti PPS z 19,69 ± 0,09 na 26,7 ± 0,6. Další zvyšování obsahu chitosanu se na světlosti barvy projevilo až při nejvyšším přídavku (50 % (*m/m*)). u všech hodnot parametru *a** došlo s každým přídavkem k jeho snížení. Po prvním přídavku došlo k výraznému snížení z hodnoty pro PPS z 17,52 ± 0,09 na hodnotu 7,1 ± 0,2 pro PPS-Ch5 a 0,51 ± 0,06 pro PPS-Ch15. Všechny vzorky měly tedy méně červenou barvu a měly spíš šedé odstíny. Hodnoty pro PPS-Ch30 a PPS-Ch50 byly dokonce záporné (-0,4 ± 1,8 a -2,2 ± 0,2), došlo tedy k přechodu na zelenou barvu. Nicméně jejich barva byla vzhledem k jejich velmi nízkým hodnotám také do šedých odstínů a zelené odstíny nebyly patrné. Hodnota parametru *b** nejprve u PPS-Ch5 a PPS-Ch15 oproti PPS klesla z 4,5 ± 0,2 na 4,1 ± 0,4 a 0,73 ± 0,06. Poté hodnoty stouply u PPS-Ch30 na 1 ± 1 a u PPS-Ch50 na 1,3 ± 0,2. Ale obě tyto hodnoty byly oproti vzorku PPS nižší. Vzorky s přídavky chitosanu byly v porovnání s PPS světlejší, méně červené i méně hnědé. Kromě

prvního přídavku se hodnoty a^* i b^* blížily 0. Tyto vzorky měly nevýraznou barvu, spíše šedou barvu.

Dalším parametrem při měření barevnosti je parametr ΔE^* , který udává celkový barevný rozdíl mezi dvěma barvami (Rovnice 22). v tomto případě byly měřeny rozdíly mezi vzorkem bez přídavku polysacharidů (PPS) a vzorky s jejich přídavky. Hodnoty parametru ΔE^* jsou uvedeny v tabulce 5.

U všech tří polysacharidů došlo po každém přídavku ke zvýšení hodnoty celkového rozdílu mezi barvami (kromě 30% (*m/m*) přídavku inulinu). Nejvíce podobný vzorek vůči standardu byl vzorek s nejnižším přídavkem inulinu. Největší rozdíly v barevnosti byly zaznamenány u chitosanu, a to už při nejnižším přídavku (5 % (*m/m*)), kdy byla $\Delta E^* = 12,73 \pm 0,07$. u něj byly výrazné rozdíly především v hodnotách parametrů a^* a b^* a tyto vzorky měly na první pohled odlišnou barvu vůči vzorkům s přídavky inulinu a maltodextrinu.

Podle navržených intervalů hodnot ΔE^* a vnímání rozdílů barevnosti hodnotiteli [75] je z výsledků patrné, že už při nejnižším přidaném množství polysacharidů může i nezkušený hodnotitel tento rozdíl rozeznat, zejména u vzorků s maltodextrinem ($\Delta E^* = 5,42 \pm 0,03$) a chitosanem ($\Delta E^* = 12,73 \pm 0,07$). Hodnoty $\Delta E^* v$ intervalu 3,5 až 5,0 indikují zřetelný rozdíl v barvě. v případě většiny zkoumaných vzorků si pozorovatel všimne dvou různých barev ($\Delta E^* > 5,0$). Porovnáním hodnot $\Delta E^* u$ vzorků se stejným množstvím polysacharidů je evidentní, že přídavky inulinu způsobily nejmenší změny v barevnosti vzorků.

Hodnoty sytosti barvy C^* udávající intenzitu barvy a parametr h° udávajícího odstín bary (barvu jako takovou), jsou uvedeny v Tabulce 6. u standardu PPS byla hodnota C^* 18,1 ± 0,1 a hodnoty h° 14,8 ± 0,5.

Vzorek	<i>C</i> *	h°
PPS	$18,1 \pm 0,1$	$14,5 \pm 0,5$
PPS-In5	$14,7 \pm 0,2$	$13,7\pm0,7$
PPS-In15	$15,2 \pm 0,1$	$12,9\pm0,6$
PPS-In30	$15,2 \pm 0,4$	$23{,}6\pm0{,}2$
PPS-In50	$15,2 \pm 0,2$	$14,3 \pm 0,2$
PPS-Mdx5	$17,1 \pm 0,2$	$14,5 \pm 0,2$
PPS-Mdx15	$15,0 \pm 0,3$	$13,3 \pm 0,3$
PPS-Mdx30	$13,6 \pm 0,3$	$22,0\pm0,4$
PPS-Mdx50	$13,\!00\pm0,\!08$	$16,2 \pm 0,4$
PPS-Ch5	$8,2 \pm 0,4$	30 ± 2
PPS-Ch15	$0,\!89\pm0,\!08$	56 ± 2
PPS-Ch30	$2,3 \pm 0,9$	106 ± 3
PPS-Ch50	$2,7 \pm 0,3$	153 ± 3

Tabulka 6: Barevnost prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In), maltodextrinu (Mdx) a chitosanu (Ch) vyjádřených pomocí polárních souřadnic

Aritmetický průměr \pm standardní odchylka (N = 3)

Přídavky inulinu snížily hodnoty sytosti barvy C^* oproti standardu prášku z plodů trnky obecné $(18,1 \pm 0,1)$ a pohybovaly se v rozmezí od 14,7 ± 0,2 do 15,2 ± 0,4. Nejméně výraznou barvu ze vzorků s přídavky inulinu měl vzorek PPS-In5, což mohlo být způsobeno kombinací nejnižších hodnot parametrů L^* a a^* a nízkou hodnotou parametru b^* , která vedla ke vzniku tmavé, málo červené a málo hnědé barvy. Pro vzorky s přídavky 5, 15 a 50 % (m/m) inulinu hodnoty parametru odstínu barvy h° kolísaly kolem hodnoty parametru h° pro standard ($14,5 \pm 0,5$) a pohybovaly se v rozmezí od 12,9 ± 0,6 do 14,3 ± 0,2. Pouze přídavek 30 % (m/m) inulinu měl hodnotu odstínu vyšší ($23,6 \pm 0,2$).

Po všech přídavcích maltodextrinu se hodnoty sytosti barvy postupně snižovaly. Pro PPS-Mdx5, PPS-Mdx15, PPS-Mdx30 a PPS-Mdx50 byly hodnoty tohoto parametru $17,1 \pm 0,2$; $15,0 \pm 0,3$; $13,6 \pm 0,3$ a $13,00 \pm 0,08$. Snižování intenzity barvy bylo způsobeno zvyšováním hodnot parametru L^* a zároveň snižováním hodnot parametrů a^* i b^* . To mělo za následek vznik světlejších, méně červených a méně hnědých barev. Pro přídavky maltodextrinu platilo obdobně jako pro inulin, že hodnoty parametru h° pro standard ($14,5 \pm 0,5$) a pohybovaly se v rozmezí od $13,3 \pm 0,3$ do $16,2 \pm 0,4$. Přídavek 30 % (m/m) maltodextrinu měl hodnotu

odstínu vyšší (22,0 \pm 0,4) oproti standardu. Rozdíly v odstínu barvy pro 30% přídavky maltodextrinu a inulinu mohly být způsobeny vyššími hodnotami parametru b^* .

U přídavků chitosanu byly hodnoty *C** oproti PPS i v porovnání se vzorky s přídavky inulinu a maltodextrinu výrazně nižší. Hodnoty po jednotlivých přídavcích kolísaly v rozmezí od 0,89 \pm 0,08 (PPS-Ch15) do 2,7 \pm 0,3 (PPS-Ch50). Takto nízké intenzity barvy byly způsobeny vyššími hodnotami *L** (v porovnání s PPS) a především velmi nízkými hodnotami *a** i *b**. Výsledné barvy byly světlé a měly nevýraznou, poměrně šedou barvu. Jak je patrné z parametrů pro celkový rozdíl barev, nejvíc odlišné byly vzorky s přídavky chitosanu. Toto potvrzují i hodnoty parametru pro odstín barvy, které jsou pro tyto vzorky výrazně vyšší vůči standardu (i v porovnání se vzorky s přídavky inulinu a maltodextrinu). Hodnoty parametru *h*° byly pro PPS-Ch5, PPS-Ch15, PPS-Ch30 s PPS-Ch50 30 \pm 2, 56 \pm 2, 106 \pm 3 a 153 \pm 3.

Výsledné barvy s využitím hodnot R, G, B jsou pro vzorky s přídavky inulinu, maltodextrinu a chitosanu vizualizovány v Tabulce 7.

Vzorek	Barva	Vzorek	Barva	Vzorek	Barva
PPS		PPS		PPS	
PPS-In5		PPS-Mdx5		PPS-Ch5	
PPS-In15		PPS-Mdx15		PPS-Ch15	
PPS-In30		PPS-Mdx30		PPS-Ch30	
PPS-In50		PPS-Mdx50		PPS-Ch50	

Tabulka 7: Vizualizované barvy po přídavcích inulinu

Jak vyplývá z parametrů pro popis barev L^* , a^* , b^* , celkového rozdílu mezi barvami, parametru sytosti a odstínu barvy, na výslednou barvu měly největší vliv přídavky chitosanu. Tyto vzorky byly oproti standardu PPS i vzorkům s přídavky inulinu a maltodextrinu výrazně méně červené, méně hnědé a jejich barva měla šedé odstíny. Pro všechny tři polysacharidy platilo, že jejich přídavky zvyšovaly světlost vzorků.

1.15 ATR-FTIR spektrometrie vzorků prášků z plodů trnky obecné

U ATR-FTIR spekter byly popsány charakteristické pásy a následně byly tyto pásy přiřazeny k funkčním skupinám, vazbám. Popsány byly nejprve spektra PPS, PIn, PMdx a PCh. Poté byla porovnána spektra PPS s přídavky jednotlivých polysacharidů.

Výsledné ATR-FTIR spektrum s popsanými pásy pro vzorek PPS je zobrazeno v Grafu 1.



Graf 1: ATR-FTIR spektrum prášku z plodů trnky obecné

Spektru prášku z trnky obecné dominuje v oblasti 4000–2000 cm⁻¹ dva pásy s vysokou intenzitou, konkrétně 3289 cm⁻¹ a 2927 cm⁻¹. První široký pás odpovídá valenčním vibracím O-H skupin, druhý je tvořen valenčními vibracemi C-H v -CH₂- skupině. Dalším významným pásem v blízké infračervené oblasti může být vibrace C-O (1023 cm⁻¹), která je doprovázená vibrací aldehydových skupin u vlnočtu 1716 cm⁻¹ [76].

ATR-FTIR spektrum pro inulin je zobrazen v Příloze 1 spolu s vyznačenými absorpčními pásy, které jsou pro inulin charakteristické [77-79]. Grafické porovnání základního spektra prášku z plodů trnky obecné s přídavky inulinu je uvedeno v Grafu 2.



Graf 2: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In)

Porovnáním FTIR spekter prášků z plodů trnky obecné s přídavky inulinu jsou patrné rozdíly v intenzitě pásu při vlnočtech 3300 cm⁻¹ ^a 2926 cm⁻¹. Intenzita pásů však nijak nesouvisí s množstvím přidaného inulinu. Pouze vzorek PPS-In50 má výrazně nižší intenzitu pásu u 3300 cm-1. Dále došlo ke snížení intenzity pásů v oblasti 2900–2100 cm⁻¹. v této oblasti se vedle vlny při 2926 cm⁻¹ objevila další překrývající se vlna při nižším vlnočtu, což je typické pro všechny polysacharidy [83].

U prášků s vyšším přídavkem inulinu (30 a 50 hm%) se na pásu při 1020 cm⁻¹ objevilo rameno při vlnočtu 1104 cm⁻¹. Ten patrně odpovídá vibracím vazby C-O z pyranózového kruhu [79]. u PPS-In15, PPS-In30 a PPS-In50 je viditelný pás při vlnočtu 930 cm⁻¹, ten je charakteristický pro β-(2-1) glykosidickou vazbu [78] a největší intenzitu má pás pro PPS-In30 a PPS-In50.

ATR-FTIR spektrum maltodextrin je zobrazen v Příloze 2 spolu s vyznačenými absorpčními pásy, které jsou pro maltodextrin charakteristické [79-81]. Grafické porovnání základního spektra PPS s přídavky maltodextrinu je uvedeno v Grafu 3.



Graf 3: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) maltodextrinu DE15 (Mdx)

Prášek s 5 % (*m/m*) maltodextrinu měl podobnou intenzitu pásů v oblasti 3300–2800 cm⁻¹ jako samotný vzorek PPS. s následnými přídavky maltodextrinu se intenzita tohoto pásu výrazně snížila a klesala v pořadí vzorků PPS-Mdx15, PPS-Mdx50 a PPS-Mdx30. v oblasti otisku prstu byly zaznamenány výrazně nižší intenzity pásů pro vzorky s obsahem 15–50 % (*m/m*) maltodextrinu (1716–1240 cm⁻¹). Pro vzorky PPS-Mdx15, PPS-Mdx30 a PPS-Mdx50 se při vlnočtu 1147 cm⁻¹ začíná objevovat pás, který odpovídá vibracím vazby C-O z pyranózového kruhu [79], s vyššími přídavky intenzita tohoto pásu stoupá. Obdobou je i pás při vlnočtu 927 cm⁻¹, ten je charakteristický pro α-(1-4) glykosidickou vazbu a největší intenzitu má pás pro PPS-Mdx50 [80].

ATR-FTIR spektrum pro chitosan je zobrazen v Příloze 3 spolu s vyznačenými absorpčními pásy, které jsou pro chitosan charakteristické [78, 79, 81, 82]. Grafické porovnání základního spektra PPS s přídavky chitosanu je uvedeno v Grafu 4.



Graf 4: ATR-FTIR spektra prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) chitosanu (Ch)

U pásů s vlnočty 3289 cm⁻¹ a 2874 cm⁻¹ se po první, druhém a třetím přídavku postupně snižovala jejich intenzita, po čtvrtém přídavku zůstala stejná. Pás 1176 cm⁻¹, který je charakteristický pro PPS, nebyl patrný už při přídavku 5 % (m/m) chitosanu. Původní pás pro PPS 1602 cm⁻¹ se po přídavcích chitosanu snižoval a zároveň se posunul k nižším vlnočtům (1575 cm⁻¹), což naznačuje interakci mezi částicemi prášku z plodů trnky a chitosanem. Intenzity pásů při vlnočtech 1246 cm^{-1 a} 1023 cm⁻¹ se postupně snižovaly.

Pro vzorky PPS-Ch15, PPS-Ch30 a PPS-Ch50 se při vlnočtu 1149 cm⁻¹ začíná objevovat pás, který odpovídá vibracím vazby C-O z pyranózového kruhu [79], největší intenzitu má tento pás u vzorku PPS-Mdx50. Obdobou je i pás při vlnočtu 892 cm⁻¹, ten je charakteristický pro β -(2-1) glykosidickou vazbu [78] a s vyššími přídavky intenzita tohoto pásu stoupá.

1.16 Skenovací elektronová mikroskopie

Snímek pro prášek z dužiny trnky obecné s přídavky inulinu je uveden na Obrázku 20.



Obrázek 20: Snímek prášku z dužiny trnky obecné (PPS)

Vzorek PPS má větší částice (ca 100-150 μm), některé z nich tvoří shluky. Okraje částic jsou spíše zaoblené. s postupnými přídavky inulinu docházelo k rozpadu a zmenšování částic, viditelné byly malé fragmenty (Obrázek 21A-D). Okraje částic byly s vyššími přídavky ostřejší. u vzorku PPS-In5 byly částice ještě přibližně stejně velké jako u PPS, měly převážně zaoblené okraje a tvořily shluky. u vzorků PPS-In15 a PPS-In30 byl poměř větších částic se zaoblenými okraji k menším částicím (do ca 100 μm) s ostrými okraji přibližně 1:1. Shluky byly méně časté a tvořeny byly převážně většími částice. u vzorku PPS-In50 už převládají menší, ostré částice.

Obrázek 21: Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In)



A) PPS-In5; B) PPS-In15; C) PPS-In30; D) PPS-In50

Rovněž přídavky maltodextrinu vedly ke zmenšování částic (Obrázek 22A-D). Po prvním přídavku bylo menších částic s ostrými okraji vůči větším částicím méně než polovina. u vzorku PPS-Mdx15 došlo ke zmenšení částic, ale nebyly pozorovány tak výrazné rozdíly ve velikosti mezi částice navzájem. Místy se vyskytovaly menší shluky či malé fragmenty. Naopak u PPS-Mdx30 byly opět pozorovatelné rozdíly ve velikosti a zastoupení větších a menších částic bylo přibližně stejné. u posledního přídavku převládaly menší částice s ostrými okraji.

Obrázek 22: Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) maltodextrinu DE15 (Mdx)







A) PPS-Mdx5; B) PPS-Mdx15; C) PPS-Mdx30; D) PPS-Mdx50

Obrázek 23: Snímek prášku z plodů trnky obecné s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) chitosanu (Ch)



A) PPS-Ch5; B) PPS-Ch15; C) PPS-Ch30; D) PPS-Ch50

PPS-Ch5 mělo velké částice s poměrným zastoupením menších částic (Obrázek 23A-D). Oproti PPS měls i větší částice spíše ostré okraje. u PPS-Ch15 byly pozorovány přibližně stejně velké částice, které měly ostré okraje a velikostí byly podobné těm u PPS. Dalším přídavkem došlo k mírnému zvětšení a zaoblení. u posledního přídavku bylo opět pozorováno větší množství menších částic, které měly oproti přídavkům 50 % (m/m) inulinu a maltodextrinu více zaoblené okraje.

V morfologii částic nebyly pozorovatelné výrazné rozdíly. Daly se pouze postřehnout drobné rozdíly ve velikosti částic a tvaru okrajů. Největší rozdíly byly patrné u vzorků s přídavky chitosanu.

1.17 Adsorpční izotermy prášků z plodů trnky obecné: vliv přídavků polysacharidů na vybrané parametry rovnic

V následujících tabulkách jsou uvedeny jednotlivé parametry rovnic, dále parametry R^2 , MAPE a AIC, vhodnost ("ANO" ~ model je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky významný; "NE" ~ model je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky nevýznamný) a rozsah aktivity vody, ve kterém byl model pro konkrétní vzorek aplikován.

Výše zmíněné údaje pro vzorky s přídavkem inulinu jsou uvedeny v Tabulce 8, pro přídavky maltodextrinu v Tabulce 9 a přídavky chitosanu v Tabulce 10. v Příloze 5 jsou pak uvedeny údaje pro prášek z dužiny trnky obecné a pro jednotlivé polysacharidy.

Z Rovnice GAB (Rovnice 4) byly určeny parametry M_0 , B a C. z vícenásobné Freundlichovy rovnice (Rovnice 9) byly určeny parametry K_m , n_m , K_M a n_M . a z rovnice dle Knaniho (Rovnice 11) byly určeny koeficienty Q_0 , a_1 , a_2 a n.
GAB	PPS-In5	PPS-In15	PPS-In30	PPS-In50
M ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,017\pm0,009$	$0,11 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,05$	$0,\!17 \pm 0,\!08$
В	$1,0 \pm 0,1$	$0,\!9 \pm 0,\!2$	$0,5*\pm0,2$	$0,5* \pm 0,2$
С	$0,946 \pm 0,009$	$0,94 \pm 0,01$	$0,\!93\pm0,\!03$	$0,\!90 \pm 0,\!04$
R ²	99,96	99,95	99,89	99,91
MAPE	9,92	15,96	17,70	26,14
AIC	-111,8	-108,0	-100,3	-60,4
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Freundlichova				
rovnice				
Km	$0,41 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,05$
n _m	$1,\!89\pm0,\!04$	$1,\!98\pm0,\!05$	$2,\!46\pm0,\!08$	$2,4 \pm 0,2$
K _M	$1,\!07\pm0,\!03$	$0,\!99\pm0,\!04$	$1,2 \pm 0,1$	$0,9\pm0,2$
n _M	$11,0\pm0,5$	$11,4 \pm 0,6$	15 ± 2	14 ± 3
R ²	99,99	99,99	99,99	99,99
MAPE	3,1	5,6	17,7	7,7
AIC	-131,9	-129,5	-123,5	-121,3
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Rovnice dle Knaniho				
Q ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,167 \pm 0,004$	$0,164 \pm 0,005$	$0,176 \pm 0,004$	$0,\!18 \pm 0,\!01$
a ₁	$0{,}58\pm0{,}02$	$0{,}57\pm0{,}02$	$0,\!59\pm0,\!01$	$0,\!59\pm0,\!05$
n	$1,\!96\pm0,\!09$	$2,2 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,4$
a ₂	$1,027 \pm 0,003$	$1,02\pm0,005$	$1,004 \pm 0,004$	$1,02 \pm 0,01$
R ²	99,997	99,99	99,99	99,99
MAPE	2,9	5,0	11,5	6,5
AIC	-136,1	-129,3	-130,4	-123,1
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 8: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30a 50 % (m/m) obsahem inulinu (In) pro 25 °C

*parametr je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky nevýznamný; vhodnost modelu stanovena F-testem, průměrná hodnota \pm standardní chyba

GAB	PPS-Mdx5	PPS-Mdx15	PPS-M30	PPS-Mdx50
M ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,13 \pm 0,01$	$0,\!12\pm0,\!02$	$0,\!12\pm0,\!04$	$0,091 \pm 0,009$
В	$0,7 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,2$	$0,\!6 \pm 0,\!2$	$0,\!64 \pm 0,\!09$
С	$0,\!93 \pm 0,\!01$	$0,\!92\pm0,\!02$	$0,91 \pm 0,03$	$0,92 \pm 0,01$
R ²	99,95	99,91	99,90	99,98
MAPE	16,67	27,74	20,86	6,04
AIC	-109,1	-105,5	-106,9	-142,0
Interval a _w	0,15-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,15-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Freundlichova				
rovnice				
Km	$0,412 \pm 0,009$	$0,39 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,03$
n _m	$2,13 \pm 0,03$	$2,\!19\pm0,\!07$	$2,34 \pm 0,06$	$1,8 \pm 0,2$
K _M	$0,\!96\pm0,\!02$	$0,\!88\pm0,\!06$	$0,\!83\pm0,\!07$	$0{,}59\pm0{,}03$
n _M	$11,6 \pm 0,4$	13 ± 1	14 ± 1	$8,9 \pm 0,9$
R ²	99,99	99,99	99,99	99,96
MAPE	10,2	14,4	7,9	10,9
AIC	-146,8	-138,6	-145,9	-129,6
Interval a _w	0,15-0,9	0,15-0,9	0,15-0,9	0,15-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Rovnice dle Knaniho				
Q ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,\!176 \pm 0,\!003$	$0,161 \pm 0,004$	$0,149 \pm 0,004$	$0,09 \pm 0,02$
a ₁	$0,\!62 \pm 0,\!01$	$0{,}58\pm0{,}02$	$0,\!60\pm0,\!02$	2* ± 1
n	$2,3 \pm 0,7$	$2,6 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,2$	1,0 ± 0,3
a ₂	$1,026 \pm 0,003$	$1,020 \pm 0,005$	$1,020 \pm 0,005$	$1,08 \pm 0,02$
R ²	99,99	99,99	99,99	99,99
МАРЕ	9	9,3	8,7	6,2
AIC	-148,4	-143,2	-146,1	-140,0
Interval a _w	0,15-0,9	0,15-0,9	0,15-0,9	0,15-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 9: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30a 50 % (m/m) obsahem maltodextrinu (Mdx) pro 25 °C

*parametr je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky nevýznamný; vhodnost modelu stanovena F-testem; průměrná hodnota \pm standardní chyba

GAB	PPS-Ch5	PPS-Ch15	PPS-Ch30	PPS-Ch50
$M_0 \left[kg H_2 O / kg \right]$	$0,\!17\pm0,\!05$	$0,\!15*\pm0,\!09$	$0,067 \pm 0,009$	$0,064 \pm 0,005$
В	$0,5 \pm 0,2$	$0,4*\pm0,3$	$1,5 \pm 0,4$	$3,0 \pm 0,5$
С	$0,\!89\pm0,\!03$	$0,\!88\pm0,\!06$	$0,91 \pm 0,02$ $0,88 \pm 0,$	
R ²	99,95	99,89	99,84	99,90
MAPE	16,60	33,07	17,36	5,65
AIC	-110,4	-106,1	-110,1	-119,1
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Freundlichova rovnice				
Km	$0,41 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,01$	$0,203 \pm 0,006$
n _m	$2,11 \pm 0,05$	$2,38 \pm 0,07$	$1,71 \pm 0,07$	$1,28 \pm 0,04$
K _M	$0,78 \pm 0,02$	$0,73 \pm 0,08$	$0,\!49 \pm 0,\!07$	0,31 ± 0,02
n _M	$10,6 \pm 0,5$	14 ± 1	13 ± 2	$10,4 \pm 0,8$
R ²	99,99	99,99	99,97	99,98
MAPE	4,6	9,3	8,1	2,3
AIC	-123,9	-119,2	-125,9	-138,4
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Rovnice dle Knaniho				
Q ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,191 \pm 0,005$	$0,153 \pm 0,003$	$0,101 \pm 0,002$	$0,090 \pm 0,001$
a ₁	$0,\!66 \pm 0,\!03$	$0,\!59 \pm 0,\!01$	$0,\!437\pm0,\!009$	$0,343 \pm 0,005$
n	$2,2 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$	$2,03 \pm 0,08$
a ₂	$1,049 \pm 0,007$	$1,024 \pm 0,004$	$1,032 \pm 0,005$	$1,077 \pm 0,005$
R ²	99,99	99,99	99,99	99,99
MAPE	4,6	5,1	4,7	1,3
AIC	-121,2	-127,5	-136,9	-149,4
Interval a _w	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9	0,2-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO

Tabulka 10: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15,30 a 50 % (m/m) obsahem chitosanu (Ch) pro 25 °C

*parametr je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky nevýznamný; vhodnost modelu stanovena F-testem; průměrná hodnota \pm standardní chyba

Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné, prášek inulinu, maltodextrinu a chitosanu jsou uvedeny v Příloze 4. Hodnota M₀ pro PPS byla 0,125 ± 0,009 kg vody/kg sušiny. Pro samotný inulin, maltodextrin i chitosan byla tato hodnota v porovnaní s PPS nižší, a to 0,11 ± 0,01; 0,046 ± 0,002 a 0,102 ± 0,007 kg vody/kg sušiny. Po přídavcích 5, 15 a 30 % *(m/m)* inulinu hodnoty M₀ (tabulka 8) kolísaly v rozmezí od 0,117 ± 0,009 do 0,13 ± 0,05 kg vody/kg sušiny oproti hodnotě pro prášek z trnky obecné (0,125 ± 0,009 kg vody/kg sušiny). Přídavek 50 % *(m/m)* inulinu hodnotu M₀ mírně zvýšil z 0,125 ± 0,009 kg vody/kg sušiny na 0,17 ± 0,08 kg vody/kg sušiny.

Pro přídavky 5, 15 a 30 % (*m/m*) maltodextrinu hodnoty M₀ (Tabulka 9) kolísaly v rozmezí od $0,12 \pm 0,01$ do $0,13 \pm 0,02$ kg vody/kg sušiny oproti hodnotě pro prášek z trnky obecné $(0,125 \pm 0,009$ kg vody/kg sušiny). Přídavek 50 % (*m/m*) maltodextrinu hodnotu M₀ mírně snížil na $0,091 \pm 0,009$ kg vody/kg sušiny). k podobným závěrům vedla studie Stepien a kol. [84], ve které přídavky inulinu a maltodextrinu do avokádového pyré také snížily hodnoty M₀ (0,038-0,057 kg vody/kg sušiny) ve srovnání s čistým vzorkem (0,068 kg vody/kg sušiny).

Přídavky 5 a 15 % (*m/m*) chitosanu hodnotu M₀ (Tabulka 10) v porovnání s PPS zvýšily z 0,125 \pm 0,009 na 0,17 \pm 0,05 a 0,15 \pm 0,09 kg vody/kg sušiny. U vzorků PPS-Ch30 a PPS-Ch50 hodnota M₀ klesla na 0,067 \pm 0,009 a 0,064 \pm 0,005 kg vody/kg sušiny.

Voda v monomolekulární vrstvě se považuje za silně fixovanou a není k dispozici pro chemické reakce. Jinými slovy, čím více z celkového obsahu vody v potravině je adsorbováno v monomolekulární vrstvě, tím se potravina se stává stabilnější. Bylo tedy žádoucí, aby přídavky polysacharidů zvyšovaly hodnoty parametru M₀ prášku z plodů trnky obecné. To splnily přídavky 5 a 15 % (m/m) chitosanu a 50 % (m/m) inulinu. Naopak přídavky 30 a 50 % (m/m) chitosanu a 50 % (m/m) maltodextrinu hodnotu M₀ snížily.

Parametr Q₀ z rovnice dle Knaniho vyjadřuje obsah vody v monomolekulární vrstvě na vnitřním povrchu [kg vody/kg sušiny]. Je tedy obdobou k parametru M₀ z rovnice GAB. Parametr Q₀ měl u vzorku prášku z plodů trnky obecné hodnotu $0,170 \pm 0,005$ kg vody/kg sušiny, což bylo více ve srovnání s hodnotou M₀. Pro všechny přídavky inulinu platilo, že parametr Q₀ (tabulka 8) měl vyšší hodnoty než parametr M₀. Tyto hodnoty však byly podobné Q₀ pro vzorek bez přídavků inulinu a pohybovaly se v rozmezí od $0,164 \pm 0,005$ do $0,18 \pm 0,01$ kg vody/kg sušiny.

Pro přídavky 5, 15 a 30 % (m/m) maltodextrinu byly hodnoty Q₀ (Tabulka 9) vyšší v porovnání s hodnotami M₀ a pohybovaly se v rozmezí od 0,149 ± 0,004 do 0,176 ± 0,003

kg vody/kg sušiny, což bylo podobné Q₀ vzorku PPS. Přídavek 50 % (*m/m*) maltodextrinu hodnotu Q₀ stejně jako parametr M₀ mírně snížil na 0,09 \pm 0,02 kg vody/kg sušiny.

U parametru Q₀ (Tabulka 10) měl v porovnání s parametrem M₀ hodnotu vyšší pouze přídavek 5 % (*m/m*) chitosanu (0,191 ± 0,005 kg vody/kg sušiny) oproti prášku z plodů trnky obecné (0,170 ± 0,005 kg vody/kg sušiny). Přídavky 15, 30 a 50 % (*m/m*) chitosanu měly hodnoty parametru Q₀ mírně vyšší než hodnoty M₀. Tyto hodnoty byly nižší v porovnání s práškem z plodů trnky obecné a pohybovaly se v rozmezí od 0,090 ± 0,001 do 0,153 ± 0,003 kg vody/kg sušiny.

Z parametru Q₀ lze podle Rovnice 14 vypočítat plocha povrchu A_s [m²/kg pevné látky], která představuje celkovou plochu povrchu materiálu dostupnou pro vazbu vody. z parametr a₁ lze podle Rovnice 12 vypočítat molární adsorpční energii v první vrstvě ΔE_1 [J · mol⁻¹], která podává informaci o interakci mezi vodou a povrchem. z parametru a₂ lze pak podle Rovnice 13 vypočítat molární adsorpční energii v druhé vrstvě ΔE_2 [J · mol⁻¹], ta představuje interakci voda-voda. z hodnot obsahu vlhkosti v monomolekulární vrstvě K_m a obsahu vlhkosti ve vícevrstvě K_M se dá podle Rovnice 10 vypočítat takzvaná kritická aktivita vody a_{w,c}. Všechny tyto parametry jsou uvedeny v Tabulkách 11-14.

Tabulka 11: Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ pro prášek z plodů trnky obecné při 25 °C

	A _s [m ² /kg pevné látky]	$\Delta E_1 \ [kJ \cdot mol^{-1}]$	$\Delta E_2 [kJ \cdot mol^{-1}]$	a _{w,c}
PPS	602,7	42,0	40,7	0,89

Tabulka 12: Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50% (m/m) obsahem inulinu (In) při 25 °C

	A _s [m ² /kg pevné látky]	$\Delta \mathbf{E}_1 \ [\mathbf{kJ} \cdot \mathbf{mol}^{-1}]$	$\Delta E_2 [kJ \cdot mol^{-1}]$	a _{w,c}
PPS-In5	592,0	42,2	40,7	0,90
PPS-In15	581,4	42,2	40,8	0,91
PPS-In30	623,9	42,1	40,8	0,93
PPS-In50	638,1	42,1	40,8	0,94

	A _s [m²/kg pevné látky]	$\Delta E_1 \ [kJ \cdot mol^{-1}]$	$\Delta E_2 [kJ \cdot mol^{-1}]$	a _{w,c}
PPS-Mdx5	623,9	42, 0	40,7	0,91
PPS-Mdx15	570,8	42,2	40,8	0,93
PPS-Mdx30	528,2	42,1	40,8	0,93
PPS-Mdx50	319,1	39,1	40,6	0,87

Tabulka 13: Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) obsahem maltodextrinu (Mdx) při 25 °C

Tabulka 14: Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ prášek z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50% (m/m) obsahem chitosanu (Ch) při 25 °C

	A _s [m ² /kg pevné látky]	$\Delta E_1 \ [kJ \cdot mol^{-1}]$	$\Delta E_2 [kJ \cdot mol^{-1}]$	a _{w,c}
PPS-Ch5	677,1	41,8	40,7	0,93
PPS-Ch15	542,4	42,1	40,7	0,94
PPS-Ch30	358,1	42,9	40,7	0,94
PPS-Ch50	319,1	43,5	40,6	0,96

Hodnoty A_s, ΔE_1 , ΔE_2 a a_{w,c} pro samotný inulin, maltodextrin a chitosan jsou uvedeny v Příloze 5.

Pro prášek z plodů trnky obecné byla plocha povrchu (Tabulka 11) 602,7 m²/kg pevné látky. Pro všechny tři samotné polysacharidy byly plochy povrchu menší (390,0 m²/kg pevné látky pro PIn, 219,8 m²/kg pevné látky pro PMdx a 382,9 m²/kg pevné látky pro PCh). Pro prášky s 5 a 15 % (*m/m*) obsahem inulinu byla zjištěna menší plocha (592,0 a 581,4 m²/kg) ve srovnání s vzorkem PPS. Vyšší přídavky inulinu měly z následek zvýšení adsorpční plochy na 623,9 až 638,1 m²/kg. Přídavek 5 % (*m/m*) maltodextrinu do prášku z dužiny trnky obecné způsobil mírné zvýšení sorpční plochy materiálu (Tabulka13) z původních 602,7 m²/kg na 623,9 m²/kg. Dalším zvyšováním přídavků maltodextrinu způsobilo výrazné snížení sorpční plochy na 570,8; 528,2 a 319,1 m²/kg pevné látky pro PPS-Mdx15, PPS-Mdx30 a PPS-Mdx50. Přídavky chitosanu měly stejný účinek jako přídavky maltodextrinu. Přídavek 5 % (*m/m*) chitosanu měl hodnotu A_s (Tabulka14) přibližně stejnou (677,1 m²/kg pevné látky) jako prášek z plodů trnky obecné. Pro přídavky 15, 30 a 50 % (*m/m*) chitosanu byla plocha povrchu 542,4; 358,1 a 319,1 m²/kg pevné látky a byla tedy nižší v porovnání s práškem z poldů trnky obecné. Vyšší přídavky maltodextrinu a chitosanu vedou ke snížení celkové plochy povrchu materiálu dostupné pro vazbu vody. Molární adsorpční energie v první vrstvě (Rovnice 12) byla pro vzorek prášek z plodů trnky obecné 41,98 kJ · mol⁻¹ ^a molární adsorpční energie v druhé vrstvě (Rovnice 13) 40,72 kJ · mol⁻¹ (Tabulka 11). Interakce voda-voda je tedy nepatrně slabší než interakce mezi vodou a povrchem materiálu, což odpovídá závěrům studie Knani a kol. [52]. Energie vazby mezi molekulami vody a povrchem inulin byla 39,80 kJ · mol⁻¹, což je nižší v porovnání s práškem z plodů trnky obecné, ale i s maltodextrinem a chitosanem ($\Delta E_1 = 44,55$ a 44,34 kJ · mol⁻¹). Přítomnost inulinu se hodnotách ΔE_1 neprojevil. v případě použití 50 % (*m/m*) maltodextrinu došlo k jejímu snížení z ca 42,0 na 39,1 kJ· mol⁻¹ a tato energie byla dokonce nižší než energie mezi molekulami vody ($\Delta E_2 = 40,6$ kJ· mol⁻¹). Rostoucí obsah chitosanu ve vzorku PPS měl za následek rostoucí energii vazby mezi povrchem materiálu a molekulami vody v intervalu 41,8–43,5 kJ· mol⁻¹.

Kritická hodnota aktivity vody ($a_{w,c}$) byla vypočítána s využitím zjištěných parametrů a Rovnice 10. Pro prášek z plodů trnky obecné byla kritická aktivita vody stanovena na 0,89 (Tabulka 11). Pro samotný inulin a maltodextrin byla tato hodnota nižší, a to 0,86 pro oba polysacharidy. Pro samotný chitosan dosáhla kritická aktivita vody nejvyšší možné hodnoty 1. Po všech přídavcích inulinu hodnota kritické aktivity vody (Tabulka 12) stoupla z 0,89 na 0,90; 0,91; 0,93 a 0,94 pro PPS-In5, PPS-In15. PPS-In30 a PPS-In50 ve srovnání se vzorkem práškem z plodů trnky obecné. Přídavky 5, 15 a 30 % (m/m) maltodextrinu $a_{w,c}$ (Tabulka 13) zvýšily v porovnání s práškem z plodů trnky obecné z 0,83 na 0,91 pro PPS-Mdx5 a na 0,93 pro PPS-Mdx15 a PPS-Mdx30. Přídavkem 50 % (m/m) hodnota $a_{w,c}$ výrazně klesla na 0,87. Všechny přídavky chitosanu hodnotu $a_{w,c}$ (Tabulka 14) v porovnání s práškem z plodů trnky obecné postupně zvyšovaly. Pro PPS-Ch5 byla kritická aktivita vody 0,93, pro PPS-Ch30 i PPS- 0,94 a pro PPS-Ch50 0,96.

S výjimkou PPS-Mdx50 všechny přídavky inulinu, maltodextrinu i chitosanu zvyšovaly hodnoty kritické aktivity vody, při jejichž překročení se stávají některé potraviny nepřijatelnými z hlediska kvality či bezpečnosti. Nejvíce tento parametr zvyšovaly přídavky chitosanu, což bylo dáno tím, že kritická hodnota chitosanu se blížila hodnotě 1,0. Chitosan byl v nedávné době úspěšně použit jako ochranný faktor pro zachování funkčních vlastností extraktu z čaje rooibos [85] nebo nanoemulze nenasycených mastných kyselin [86].

1.17.1 Volba vhodného matematického popisu adsorpce vlhkosti

Podle parametru R^{2 a} hodnot pro MAPE a AIC byl jako nejvhodnější model pro matematický popis sorpčních izoterem zvolena rovnice podle Knaniho. Po aplikování této rovnice dosáhl parametr R² pro všechny vzorky s přídavky hodnoty 99,99 % a pro samotné polysacharidy a prášek se samotnou dužinou trnky obecné byl v rozmezí 98-99 %. To znamená, že tento modle vysvětluje u téměř všech vzorků 99,99 % variability přítomné ve výsledkové proměnné. Těchto výsledků nebylo dosaženo s použitím rovnice GAB ani vícenásobné Feundlichovy rovnice. Rovnice podle Knaniho poskytla i nejnižší hodnoty MAPE a AIC. Hodnota MAPE se pohybovala v rozmezí od 1,3 do 11,5 a hodnoty AIC byly v rozmezí od -177,5 do -121,2. Nejvyšší hodnota MAPE pro rovnici GAB byla dokonce 33,07 a nejnižší hodnota byla 3,5. Pro rovnici GAB se hodnoty AIC pohybovaly v rozmezí od -145,0 do -60,4. Hodnoty MAPE u vícenásobné Freundlichovy rovnice se pohybovaly od hodnot 1,6 do 17,7 a hodnoty AIC se pohybovaly v rozmezí od -179,9 do -119,2. Na základě těchto skutečností, byla rovnice podle Knaniho vyhodnocena jako nejvhodnější pro matematický popis sorpčních izoterem vzorku prášku z dužiny trnky obecné, inulinu, maltodextrinu, chitosanu a vzorků prášků trnky obecné s přídavky těchto polysacharidů.

Pro možné porovnání jsou v Grafu 5 pro inulin, Grafu 6 pro maltodextrin a Grafu 7 pro chitosan uvedeny sorpční izotermy pro PPS, samotný polysacharid a jeho jednotlivé přídavky.

Graf 5: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s přídavkem 5, 15, 30 a 50 % (m/m) inulinu (In) při 25 °C



Všechny izotermy s přídavky inulinu odpovídají izotermě typu III, tedy Floryho-Hugginsově izotermě. Sorpční izoterma čistého inulinu má sigmoidní tvar a odpovídá tak izotermě typu II.

K nárůstu rovnovážného obsahu H₂O došlo u PPS, PPS-In5, PPS-In15, PPS-In30 a PPS-In50 od hodnoty aktivity vody 0,50. Od hodnoty aktivity vody 0,25 byl rovnovážný obsahu H₂O u všech přídavků inulinu nižší ve srovnání s PPS. s prvními třemi přídavky se hodnoty M_w postupně snižovaly, PPS-In50 měl oproti PPS-In30 hodnoty M_w vyšší.

Tomuto trendu odpovídají i rozdíly v maximálních hodnotách rovnovážného obsahu H₂O při aw 0,90 (aw,90). u přídavků 5 a 15 % (m/m) inulinu je patrný postupný pokles hodnot aw,90, zatímco mezi přídavkem 30 a 50 % (m/m) je pouze nepatrný rozdíl. Všechny hodnoty maximálního rovnovážného obsahu vody byly oproti prášku z plodů trnky obecné nižší. z původní hodnoty 0,70 kg vody/kg sušiny klesl na 0,67 kg vody/kg sušiny pro PPS-In5, 0,62 kg vody/kg pro PPS-In15, 0,58 kg vody/kg pro PPS-In30 a 0,57 kg vody/kg pro PPS-In50.

Graf 6: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) maltodextrinu (Mdx) při 25 °C



Sorpční izotermy všech vzorků s přídavky maltodextrinu odpovídají izotermě typu III. Pouze sorpční izoterma čistého maltodextrinu má sigmoidní tvar a odpovídá tak izotermě typu II.

K nárůstu rovnovážného obsahu H₂O došlo u PPS, PPS-Mdx5, PPS-Mdx15, PPS-Mdx30 a PPS-Mdx50 přibližně od hodnoty aktivity vody 0,50. Hodnoty M_w se od 0,35 a_w postupně snižovaly s rostoucím obsahem maltodextrinu v prášku z plodů trnky obecné. Jinými slovy, čím více maltodextrinu v hmotě, tím je nižší adsorpce vlhkosti, např. při 0,90 a_w adsorbuje vzorek PPS 0,70 kg vody/kg sušiny. v případě PPS-Mdx5 se hodnota M_{w,90} snížila na 0,61 kg vody/kg sušiny. Dalším zvyšováním množství maltodextrinu mělo za následek snížení obsahu rovnovážné vlhkosti na hodnoty 0,54 (PPS-Mdx15), 0,47 (PPS-Mdx30) a na 0,41 kg vody/kg sušiny (PPS-Mdx50).

Graf 7: Adsorpční izotermy prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 % (m/m) chitosanu (Ch) při 25 °C



Pro PPS, PPS-Ch5, PPS-Ch15 a PPS-Ch30 odpovídají sorpční izotermy svým exponenciálním tvarem izotermě typu III. Naopak čistý chitosan a nejvyšší přídavek chitosanu (PPS-Ch50) přecházejí na sigmoidní tvar a jejich sorpční izotermy odpovídají tak izotermě typu II.

K exponenciálnímu nárůstu rovnovážného obsahu H₂O došlo u PPS, PPS-Ch5 a PPS-Ch15 při hodnotě aktivity vody 0,50. u PPS-Ch30 došlo k tomuto nárůstu až od hodnoty a_w 0,70. Pro první tři přídavky chitosanu se od aktivity vody 0,50 hodnoty M_w postupně snižovaly. Hodnoty M_w pro PPS-Ch50 byly při hodnotách a_w 0,20-0,30 mírně vyšší v porovnání s PPS, následně oproti PPS klesaly. Pro PPS-Ch byly hodnoty M_{w v} rozmezí hodnot aktivity vody 0,15-0,50 vyšší v porovnání s PPS. Od hodnoty a_w 0,50 byly tyto hodnoty naopak nižší. Tyto odlišné průběhy u PPS-Ch50 a PCh oproti prvním třem přídavkům souvisí s odlišným typem (průběhem) izotermy.

U všech přídavků je patrný pokles maximální hodnoty rovnovážného obsahu H₂O při a_w 0,90. u přídavků 5, 15 a 30 % (m/m) chitosanu byl pokles výraznější, po přídavku 50 % (m/m) byl pokles menší. u prášku z plodů trnky byla hodnota M_{w,90} 0,70 kg vody/kg sušiny. v případě PPS-Ch5 se hodnota $M_{w,90}$ snížila na 0,59 kg vody/kg sušiny. Dalším zvyšováním množství chitosanu mělo za následek snížení obsahu rovnovážné vlhkosti na hodnoty 0,45 (PPS-Ch15), 0,33 (PPS-Ch30) a na 0,28 kg vody/kg sušiny (PPS-Ch50).

1.17.2 Rychlost adsorpce vlhkosti

Při sérii rovnovážných relativních vlhkostí 0 %, 20 %, 40 %, 60 % a 80 % byla zaznamenána změna hmotnosti v čase, která souvisí s rychlostí adsorpce vlhkosti. v Tabulkách 15-18 jsou pro hodnoty ERH z 0 na 20, z 20 na 40, z 40 na 60 a z 60 na 80 % uvedeny průměrné změny hmotnosti [%/min].

Tabulka 15: Průměrné změny hmotnosti pro prášek z plodů trnky obecné při adsorpci vlhkosti při 25 °C

ERH [%]	Průměrná změna hmotnosti [%/min]
0-20	0,02
20-40	0,07
40-60	0,12
60-80	0,22

ERH, rovnovážná relativní vlhkost

Tabulka 16: Průměrné změny hmotnosti pro prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30a 50 % (m/m) inulinu (In) při adsorpci vlhkosti (25 °C)

	Průměrná změna hmotnosti [%/min]					
ERH [%]	PPS-In5PPS-In15PPS-In30PPS-In					
0-20	0,02	0,01	0,01	0,02		
20-40	0,09	0,07	0,05	0,01		
40-60	0,13	0,13	0,12	0,08		
60-80	0,25	0,23	0,21	0,16		

ERH, rovnovážná relativní vlhkost

	P	Průměrná změna hmotnosti [%/min]				
ERH [%]	PPS-Mdx5	PPS-Mdx15	PPS-Mdx30	PPS-Mdx50		
0-20	0,02	0,01	0,01	0,02		
20-40	0,07	0,06	0,02	0,02		
40-60	0,12	0,12	0,12	0,08		
60-80	0,22	0,20	0,18	0,16		

Tabulka 17: Průměrné změny hmotnosti prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %(m/m) maltodextrinu (Mdx) při adsorpci vlhkosti (25 °C)

ERH, rovnovážná relativní vlhkost

Tabulka 18: Průměrné změny hmotnosti prášku z plodů trnky obecné (PPS) s 5, 15, 30 a 50 %(m/m) chitosanu (Ch) při adsorpci vlhkosti (25 °C)

	Průměrná změna hmotnosti [%/min]				
ERH [%]	PPS-Ch5	PPS-Ch15	PPS-Ch30	PPS-Ch50	
0-20	0,01	0,01	0,01	0,02	
20-40	0,08	0,03	0,04	0,06	
40-60	0,13	0,11	0,09	0,07	
60-80	0,23	0,19	0,14	0,11	

ERH, rovnovážná relativní vlhkost

Průměrné změny hmotnosti pro inulin, maltodextrin a chitosan jsou uvedeny v Příloze 6. Ihned po zvýšení relativní vlhkosti v měřící komoře docházelo u všech vzorků k rychlé adsorpci vlhkosti s maximálními hodnotami rychlosti dosažených během 10 minut adsorpce. S rostoucím časem rychlost opět klesá. u vzorku PPS byla průměrná změna hmotnosti 0,02; 0,07; 0,12 a 0,22 %/min (tabulka 15) při adsorpci 0-20, 20-40, 40-60 a 60-80 % ERH. Tedy platí, že čím vyšší je hodnota ERH, tím je vyšší rychlost adsorpce.

Přítomnost inulinu ve vzorcích změnila rychlost adsorpce vlhkosti již při přídavku 5 % (m/m) a to při rovnovážných relativních vlhkostech od 20 do 80 % (Tabulka 16). Zde došlo k mírnému navýšení rychlosti adsorpce, ale se zvyšujícím se podílem inulinu ve vzorcích PPS došlo ke snížení rychlosti adsorpce vlhkosti. v případě maltodextrinu a chitosanu byla rychlost adsorpce v přítomnosti 5 % (m/m) množství stejná jako u vzorku PPS, s dalším zvyšováním obsahu těchto polysacharidů došlo také ke snížení rychlosti adsorpce vlhkosti (Tabulky 17 a 18). Tento jev byl patrný zejména u vyšších hodnot ERH (tj. 40-60 a 60-80 %). Přídavek chitosanu do dužiny plodů z trnky obecné měl za následek nižší adsorpční rychlost ve srovnání s přídavky inulinu nebo maltodextrinu (Tabulka 18). Např. rychlost adsorpce vlhkosti mezi 40 a 60 % ERH

pro vzorek PPS-Ch30 byla 0,09 %/min, zatímco vzorky s 30 % (*m/m*) obsahem maltodextrinu a inulinu adsorbovaly vlhkost rychlostí 0,12 %/min.

Rychlost adsorpce se s přídavky polysacharidů při adsorpci z 40 na 60 a z 60 na 80 % ERH obecně snižovala. Snižování rychlosti bylo patrné u vyšších přídavků (od 30 % (m/m)) a nejvíce se projevilo po přídavcích chitosanu. To znamená že by výsledné směsi s přídavky alespoň 30 % (m/m) polysacharidů díky zpomalení adsorpce vody mohly potencionálně zvýšit jejich trvanlivost.

4. ZÁVĚR

Byla provedena charakterizace lyofilizované prášky z plodů z trnky obecné s přídavky inulinu, maltodextrinu a chitosanu (5, 15, 30 a 50 % (m/m)) pomocí měření barevnosti, infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a skenovací elektoronové mikroskopie.

Všechny přídavky polysacharidů měly vliv na parametr světlosti L^* , který zvyšovaly. Výsledné vzorky s přídavky byly tedy světlejší. Rovněž měly tyto přídavky vliv na parametr a^* (červená/zelená barva) a parametr b^* (žlutá/modrá). u těchto parametrů došlo naopak k jejich snížení, vzorky s přídavky měly méně červenou a žlutou (respektive hnědou) barvu. Největší vliv na změnu barvy měly přídavky chitosanu, u kterých dosáhl parametr celkového rozdílu barev ΔE^* hodnoty 26,90 ± 0,09. v tom případě si pozorovatel všimne dvou různých barev.

V infračervených spektrech byly u přídavků 30 a 50 % (m/m) v oblasti 1200-900 cm⁻¹ pozorovatelné charakteristické pásy pro polysacharidy, které odpovídaly C-O vazbám z pyranózového kruhu, β -(2-1) glykosidickým vazbám (pro přídavky inulinu a chitosanu) a α -(1-4) glykosidickým vazbám (pro přídavky maltodextrinu).

Na snímcích ze skenovací elektoronové mikroskopie nebyly po přídavcích polysacharidů pozorovatelné výrazné rozdíly v morfologii částic. Postřehnutelné byly pouze drobné rozdíly ve velikosti a tvaru okrajů).

Pro matematický popis sorpčních izoterm byly použity tři rovnice (GAB, vícenásobná Freundlichova rovnice a rovnice dle Knaniho). Jako nejvhodnější byla vyhodnocena rovnice dle Knaniho u všech polysacharidů došlo s vyššími přídavky k postupnému poklesu rovnovážného obsahu vody [kg vody/ kg sušiny] oproti prášku z plodů trnky obecné. Adsorpční izoterma prášku z plodů trnky obecné odpovídala svým tvarem izotermě typu III a prášky samostatných polysacharidů odpovídaly svým sigmoidním tvarem izotermá typu III. Pouze u přídavku 50 % (m/m) chitosanu došlo k přechodu z izotermy typu III na izotermu typu II. Cílem bylo zvýšení stability, pro kterou bylo žádoucí, aby se obsah vlhkosti (parametr M₀) v první monomolekulární vrstvě s přídavky polysacharidů zvyšoval v porovnání se vzorkem bez přídavku. To nesplnil žádný z polysacharidů. Pouze přídavek 50 % (m/m) inulinu a přídavek 5 % (m/m) chitosanu tento parametr nepatrně zvýšily. Při studiu rychlosti adsorpce vlhkosti bylo zjištěno, že se s přídavky od 30 % (m/m) snižovala průměrná změna hmotnosti, tedy došlo ke snížení rychlosti adsorpce.

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KORBELÁŘ, J.; ENDRIS, Z. Naše rostliny v lékařství (6. ydání). Praha: Avicenum, 1981.
- [2] FARMER-KNOWLES, H. Léčivé rostliny od a do Z: nejnovější průvodce světem bylin, stromů a květin : [podrobný přehled květin, stromů a plodů s uzdravovací silou]. v Praze: Metafora, 2011. ISBN 978-80-7359-270-7.
- [3] FRATERNALE, D., GIAMPERI, L. a BUCCHINI, A. a RICCI, D. Antioxidant activity of prunus spinosa l. Fruit juice. *Italian journal of food science*. 2009, **21**(3), 337-346.
- [4] GEGIU, G. Contributions to the antimicrobial and antifungal study of the aqueous extract of prunus spinosa L. *FARMACIA*. 2015, **63**(2), 275-279.
- [5] RICHTÁROVÁ, E. Bylinky: zdraví z přírody. Ludgeřovice: Pali, 2012. ISBN 978-80-87389-17-1.
- [6] TEDESCHI, G.; RAISER, U. Herbář: přírodní lékárna: bylinky z klášterní zahrady (2. vydání). Esence. Praha: Euromedia Group, 2023. ISBN 978-80-242-8689-1.
- [7] NISTOR, O. V.; MILEA, Ş. A.; PĂCULARU-BURADA, B.; ANDRONOIU, D. G.;
 RÂPEANU, G. et al. Technologically driven approaches for the integrative use of wild blackthorn (*Prunus spinosa L.*) fruits in foods and nutraceuticals. *Antioxidants*. 2023, 12(8). Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/antiox12081637
- [8] BALTA, I.; SEVASTRE, B.; MIREŞAN, V.; TAULESCU M.; RADUCU C. et al. Protective effect of blackthorn fruits (*Prunus spinosa*) against tartrazine toxicity development in albino Wistar rats. *BMC Chemistry*. 2019, 13(1). Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13065-019-0610-y
- [9] GUNES, R. A. Study on quality properties of blackthorn (*Prunus spinosa L.*) fruit powder obtained by different drying treatments. *BIO Web of Conferences*. 2024, 85. Dostupné z: https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501011
- [10] BLAGOJEVIĆ, B.; ČETOJEVIĆ-SIMIN, D.; DJURIĆ, S.; LAZZARA, G.; MILIOTO, S. et al. Anthocyanins and phenolic acids from *Prunus spinosa L*. encapsulation in halloysite and maltodextrin based carriers. *Applied Clay Science*. 2022, 222. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106489

- [11] ARAMOUNI, F.; DESCHENES, K. Methods for developing new food products An instructional guide (expanded 2nd edition). DEStech Publication, 2018. ISBN 978-1-60595-432-5. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMDNFPAI2/methods-developing-new/methods-developing-new
- [12] EMBUSCADO, M. E. Functionalizing carbohydrates for food applications Texturizing and bioactive/flavor delivery systems. DEStech Publication, 2014. ISBN 978-1-60595-038-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpFCFATBF7/toc?bq=Carbohydrates&cid=kpFCFATBF7&include synonyms=no
- [13] ZEECE, M. Introduction to the chemistry of food. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-809434-1. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpICF00006/introductionchemistry/introduction-chemistry
- [14] EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. Pulp and paper chemistry and technology – Wood chemistry and biotechnology. 2009. De Gruyter. ISBN 978-3-11-021339-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpPPCTWCW5/toc?bq=Carbohydrates%20Fischer&cid=kpPPCTWCW5&include_synonyms=no
- [15] BETA, T.; CAMIRE, M. E. Cereal grain-based functional foods –Ccarbohydrate and phytochemical components. Royal Society of Chemistry (RSC), 2019. ISBN 978-1-78801-148-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCGBFFCP3/cerealgrain-based-functional/cereal-grain-based-functional
- [16] PICO, Y. Chemical analysis of food Techniques and applications (2nd edition). Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-813266-1. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCAFTAE02/chemical-analysis-food/chemicalanalysis-food
- [17] BREZONIK, P. L.; ARNOLD, W. A. Water chemistry The chemical processes and composition of natural and engineered aquatic systems (2nd edition). Oxford University Press, 2022. ISBN 978-0-19-765189-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpWCTCPCN1/toc?b-q=Carbohydrates%20enantiomer&cid=kpWCTCPCN1&include synonyms=no
- [18] PAQUIN, P. Functional and speciality beverage technology. Woodhead Publishing, 2009. ISBN978-1-84569-342-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFSBT000T/functional-speciality/functional-speciality

- [19] DAR, Y. L.; LIGHT, J. M. Food texture design and optimization. John Wiley & Sons & Sons, 2014. ISBN 978-0-470-67242-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpFTDO0001/toc?bq=Moisture+sorption+isotherm+characteristics+of+food+products&include_synonyms =no
- [20] KUNEŠOVÁ, M. et al. Základy obezitologie. Galén, 2016. ISBN 978-80-7492-217-6
- [21] PÁNEK, J. Základy výživy. Praha: Svoboda Servis, 2002. ISBN 80-863-2023-5
- [22] Jak funguje jídlo: co jíme, když jíme. Esence. Praha: Euromedia, 2018. ISBN 978-80-7549-585-3
- [23] WILLIAMS, P. A. Renewable resources for functional polymers and biomaterials Polysaccharides, proteins and polyesters. Royal Society of Chemistry (RSC), 2011.
 ISBN 978-1-84973-245-1. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpRRFPBPP2/toc?bq=maltodextrin%20use&cid=kpRRFPBPP2&include synonyms=no
- [24] ELIASSON, A. Ch. Starch in food Structure, function and applications. Elsevier, 2004.
 ISBN 978-1-85573-731-0. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpSFSFA002/toc?bq=maltodextrin%20degradation&cid=kpSFSFA002&include synonyms=no
- [25] ANANDHARAMAKRISHNAN, C., PADMA I. Spray drying techniques for food ingredient encapsulation. John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1-118-86419-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpSDTFIE01/toc?bq=maltodextrin%20structure&cid=kpSDTFIE01&include synonyms=no
- [26] GIBSON, G. R. Food science and technology bulletin Functional foods (volume 3). International Food Information Service (IFIS Publishing), 2007. ISBN 978-0-86014-172-3. Dostupné z:

https://app.knovel.com/kn/resources/kpFSTBFF1S/toc?cid=kpFSTBFF1S

[27] MSAGATI, T. A. M. Chemistry of food additives and preservatives. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-27414-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpCFAP000C/toc?b-content-type=tsection&bq=inulin&cid=kpCFAP000C&include_synonyms=no

- [28] GIBSON, G. R.; WILLIAMS, C. M. Functional foods. Woodhead Publishing, 2000. ISBN 978-1-85573-503-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpFF000006/toc?b-content-type=tsection&bq=inulin&cid=kpFF000006&include synonyms=no
- [29] KASAPIS, S.; NORTON, I. T.; UBBINK, J. B. Modern biopolymer science Bridging the divide between fundamental treatise and industrial application. Elsevier, 2009. ISBN 978-0-12-374195-0. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpMBSBDFT1/toc?bq=inulin%20preparation&cid=kpMBSBDFT1&include synonyms=no
- [30] BEMILLER, J. N. Carbohydrate chemistry for food scientists (3rd edition). Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-812069-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpCCFSE003/toc?b-q=inulin%20preparation&cid=kpCCFSE003&include_synonyms=no
- [31] KHETO, A.; BIST, Y.; AWANA, A.; KAUR, S.; KUMAR, Y. et al. Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*. 2023, **3**. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443
- [32] ZHAO, R.; LI, N.; LIU, Q.; LIU, W.; ZHANG, L. et al. Potato flour, oat bran, and inulin as functional ingredients in gluten-free biscuits: glycemic index reduction and physicochemical characterization improvement. *Food and Bioprocess Technology*. 2023, 16. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11947-023-03082-5
- [33] YIN, P.; YI S.; DU T.; ZHANG Ch.; YU L. et al. Dynamic response of different types of gut microbiota to fructooligosaccharides and inulin. *Food and Function*. 2024, 15(3), 1402–1416. Dostupné z: https://doi.org/DOI: 10.1039/d3fo04855a
- [34] HAN, J. H. Nnovations in food packaging (2nd edition). Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-394601-0. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIFPE0013/innovationsin-food-packaging/innovations-in-food-packaging
- [35] CHAUDHRY, Q.; CASTLE, L.; WATKINS, R. Nanotechnologies in Food (2nd edition). Royal Society of Chemistry (RSC), 2017. ISBN 978-1-78262-171-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNFE00011/nanotechnologies-infood/nanotechnologies-in-food

- [36] VAN DEN BROEK, L. A.; BOERIU, C. G. Chitin and chitosan Properties and applications. John Wiley & Sons, 2020. ISBN 978-1-119-45043-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCCPA0003/chitin-chitosan-properties/chitinchitosan-properties
- [37] ROMANAZZI, G., FELIZIANI, E. a SIVAKUMAR, D. Chitosan, a biopolymer with triple action on postharvest decay of fruit and vegetables: eliciting, antimicrobial and film Forming properties. *Frontiers in Microbiology*. 2018, 9.
 Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02745
- [38] KE, C. L; DENG, F. S.; LIN, C. H. Antimicrobial actions and applications of chitosan. *Polymers*. 2021, 13(6).
 Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym13060904
- [39] RAO, Ch. G. Engineering for storage of fruits and vegetables Cold storage, controlled atmosphere storage, modified atmosphere storage. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-803365-4. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESFVCSC1/engineering-storage-fruits/engineering-storage-fruits
- [40] JAFARI, S. M.; MALEKJANI, N. Drying technology in food processing Unit operations and processing equipment in the food industry. Elsevier, 2023. ISBN 978-0-12-819895-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDTFPUOP6/dryingtechnology-in/drying-technology-in
- [41] SKIBSTED, L. H.; RISBO, J.; ANDERSEN, M. L. Chemical deterioration and physical instability of food and beverages. Woodhead Publishing, 2010. ISBN 978-1-84569-495-1. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCDPIFB02/chemical-deterioration/chemical-deterioration
- [42] KILCAST, D.; SUBRAMANIAM, P. Food and beverage stability and shelf life. Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-1-84569-701-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFBSSL001/food-beverage-stability/foodbeverage-stability
- [43] INTERNATIONAL FOOD INFORMATION SERVICE. Dictionary of food science and technology (2nd edition). International Food Information Service (IFIS Publishing), 2009. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDFSTE001/dictionary-foodscience/dictionary-food-science

- [44] HOWELL, R. H. Principles of heating, ventilating and air conditioning (8th edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2017. ISBN 978-1-939200-73-0. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpPHVACE01/toc?bq=sorption%20static&cid=kpPHVACE01&include synonyms=no
- [45] GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry. 1997, 81A(1), 89-96. Dostupné z: https://doi.org/10.6028/jres.081A.011
- [46] ROOS, Y. H.; DRUSCH, S. *Phase transitions in foods (2nd edition)*. Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-408086-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpPTFE0001/toc?bq=sorption%20%20salts%20solutions&cid=kpPTFE0001&include_synonyms=no
- [47] LEWICKI, P. P.; POMARANSKA-LAZUKA, W. Errors in static desiccator method of water sorption isotherms estimation. *International Journal of Food Properties*. 2003, 6(3), 557-563. Dostupné z: https://doi.org/DOI10.1081/JFP-120021335
- [48] HUI, Y. H.; CLARY, C.; FARID, M. M.; FASINA, O. O.; NOOMHORM, A. et al. Food drying science and technology – Microbiology, chemistry, applications. DeStech Publication, 2008. ISBN 978-1-932078-56-5. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFDSTMCA4/food-drying-sciencetechnology/food-drying-science-technology
- [49] PASAGADI, A. S.; PRAKASH, A. K.; HARTHIKOTE VEERENDRASIMHA, V. S.; GEETHAMBIKA, S. B.; PUSHPADASS, H. A. Shelf-life prediction of milk-millet powders. *Journal of Food Process Engineering*. 2022, 46(10). Dostupné z: https://doi.org/DOI: 10.1111/jfpe.14204
- [50] TAVARES, L.; SOUSA, L. R.; DA SILVA, S. M.; LIMA, P. S.; OLIVEIRA, J. M. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of biodegradable polymers for application infood packaging industry. *Polymers*. 2023, 15(7). Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym15071634
- [51] HOYOS-LEYVA, J. D.; AGAMA-ACEVEDO, E.; BELLO-PEREZ, L. A.; VERNON-CARTER, E. J.; ALVAREZ-RAMIREZ, J. Assessing the structural stability of gluten-free snacks with different dietary fiber contents from adsorption isotherms. *LWT*. 2016, 73, 576–583. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.042

- [52] KNANI, S.; AOUAINI, F.; BAHLOUL, N.; KHALFAOUI, M.; HACHICHA, M. A. et al. Modeling of adsorption isotherms of water vapor on Tunisian olive leaves using statistical mechanical formulation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014, **400**, 57-70. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.01.006
- [53] BERK, Z. Food process engineering and technology (3rd edition). Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812018-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpFPETE002/toc?bq=lyophilization&cid=kpFPETE002&include_synonyms=no
- [54] FRATZSCHER, W.; HEIDENREICH, E. Oborové encyklopedie Chemické inženýrství.
 SNTL, 1990. ISBN 80-03-00183-8
- [55] CRUZ, J. N.; ALTALHI, T. Green sustainable process for chemical and environmental engineering and science – Recent advances in nanocarriers inamuddin. Elsevier, 2023. ISBN 978-0-323-95171-5.
 Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpGSPCEED1/toc?bq=lyophilization&cid=kpGSPCEED1&include synonyms=no
- [56] FRANKS, F. Freeze-drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals. Royal Society of Chemistry (RSC), 2007. ISBN 978-0-85404-268-5.
 Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpFPB00001/toc?cid=kpFPB00001
- [57] KUTZ, M. Handbook of farm, dairy and food machinery engineering (3rd edition). Elsevier, 2019. ISBN 978-0-1281-4803-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHFDFME01/handbook-farm-dairy-food
- [58] KADER, A. E. A.; ABU HASHISH, H. M. Encapsulation techniques of food bioproduct. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020, 63(5), 1881-1909. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.16269.1993
- [59] EVAGELIOU, V.; SALIARI, D. Limonene encapsulation in freeze dried gellan systems.
 Food Chemistry. 2017, 223, 72-75. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.030
- [60] ATTA-UR-RAHMAN. Studies in natural products chemistry (volume 36) Bioactive natural products. Elsevier, 2012. ISBN 978-0-444-53836-9. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpSNPCVBN1/toc?bq=Encapsulation%20lyophilization&cid=kpSNPCVBN1&include_synonyms=no

- [61] STUART, B. Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons, 2004. ISBN 9780470854273. Dostupné z: https://www.pharmaresearchlibrary.com/wpcontent/uploads/2013/04/Infrared-Spectroscopy-Fundamentals-and-Applications-Barbara-Stuart.pdf
- [62] WOLFE, W. L. Introduction to infrared system design. SPIE, 1996. ISBN 978-0-8194-2106-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpIISD0005/toc?b-q=infra-red
- [63] EBNESAJJAD, S.; KHALADKAR, P. R. Fluoropolymer applications in the chemical processing industries the definitive user's guide and handbook (2nd edition). Elsevier, 2018. ISBN 978-0-32-344716-4. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFACPIT03/fluoropolymer-applications/fluoropolymer-applications
- [64] BRUNO, T. J.; DEACON, R; JANSEN, J. A.; MAGDEFRAU, N; MUELLER, E. et al. ASM handbook (volume 10) - Materials characterization (2019 edition). ASM International, 2019. ISBN 978-1-62708-211-2.Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVM2B/asm-handbook-volume-10/asmhandbook-volume-10
- [65] GRELLMANN, W.; SEIDLER, S. Polymer testing (3rd edition). Hanser Publisher, 2022.
 ISBN 978-1-56990-806-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPT000021/polymer-testing-3rd-edition/polymer-testing-3rd-edition
- [66] TIWARI, A.; RAWLINS, J.; HIHARA, L. H. Intelligent coatings for corrosion control. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-411467-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpICCC0001/toc?b-content-type=tsection&bq=ATR&cid=kpICCC0001&include_synonyms=no
- [67] CHANG, R.; THOMAN, J. W. Jr. Physical chemistry for the chemical sciences. University Science Books, 2014. ISBN 978-1-891389-69-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpPCCS0002/toc?b-q=beerlambert%20law&cid=kpPCCS0002&include_synonyms=no
- [68] PACKHAM, D. E. Handbook of adhesion (2nd Edition). John Wiley & Sons, 2005. ISBN 978-0-471-80874 9.
 Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHAE00002/handbook-adhesion-2nd/handbook-adhesion-2nd

- [69] SUN, D.-W. Infrared spectroscopy for food quality analysis and control. Elsevier, 2009.
 ISBN 978-0-12-374136-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpISFQAC0I/toc?b-q=infrared&include synonyms=no
- [70] BABU, S. Advances in chemical mechanical planarization (CMP). Elsevier, 2016. ISBN 978-0-08-100165-3. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpACMPCMP4/advances-in-chemical/advances-in-chemical
- [71] KRESS-ROGERS, E.; BRIMELOW, C. J. B. Instrumentation and sensors for the food industry (2nd edition). Woodhead Publishing, 2001. ISBN 978-1-85573-560-6. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpISFIE008/toc?b-q=D%2F8+spectrophotometers&include synonyms=no
- [72] CHOUDHURY, A. K. R. Principles of colour appearance and measurement (volume 1)
 Object appearance, colour perception and instrumental measurement. Elsevier, 2014.
 ISBN 978-0-85709-229-8. Dostupné z:

https://app.knovel.com/kn/resources/kpPCAMVOA3/toc?cid=kpPCAMVOA3

 [73] KOLESKE, J. V. Paint and coating testing manual – Fifteenth edition of the gardnersward handbook: (MNL 17-2nd). ASTM International, 2012. ISBN 978-0-8031-7017-9. Dostupné z:

https://app.knovel.com/kn/resources/kpPCTMFEG1/toc?cid=kpPCTMFEG1

- [74] DIKEMAN, M.; DEVINE, C. Encyclopedia of meat sciences (2nd edition). Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-384731-7.
 Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpEMSE0003/toc?bq=CIELAB+Color+Space&include synonyms=no
- [75] MOKRZYCKI, W.; TATOL, M. Color difference ΔE a survey. *Machine Graphics and Vision*. 2011, **20**(4), 383-411.
- [76] HSSAINI, L.; OUAABOU, R.; CHARAFI, J.; RAZOUK, R.; HOUMANAT, K. et al. Effects of pre-storage ascorbic and salicylic acids treatments on the enzymatic browning and nutritional quality of dried fig: Combined use of biochemical and ATR-FTIR analyses. *Vibrational Spectroscopy*. 2021, **15**. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2021.103269
- [77] ERIS, F. R.; PAMELA, V. Y.; KUSUMASARI, S.; MEINDRAWAN, B. Extraction of inulin from Beneng tuber (*Xanthosoma undipes*) and its application to yogurt. *Future Foods*. 2024, 9(2). Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100339

- [78] GONTRANI, L.; BAUER, E. M.; RICCI, L. Inulin Coated ZnO nanoparticles: a correlation between preparation and properties for biostimulation purposes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024, 25(5). Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms25052703
- [79] DEMIRCI, K.; ZUNGUR-BASTIOGLU, A.; GORGÜÇ, A.; BAYRAKTAR, B.; YILMAZ, S.; et al. Microwave irradiation, evolutionary algorithm and ultrafiltration can be exploited in process intensification for high-purity and advanced inulin powder production. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2023, **194**. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109565
- [80] DA SILVA SIMÃO R.; DE MORAES J. O.; ZHANG, L. SCHRÖDER, A. Biopolymers to overcome challenges in açaí pulp drying: Processing and powder quality evaluation. *Powder Technology*. 2024, 435(2).

Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119424

- [81] MA, Y.; XU, J.; JIANG, S.; ZENG, M. Effect of chitosan coating on the properties of nanoliposomes loaded with oyster protein hydrolysates: Stability during spray-drying and freeze-drying. *Food Chemistry*. 2022, 385. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132603
- [82] MUJEEB RAHMAN, P.; KARANGADAN, S.; SHANIBA, V.; MURALEEDHARAN, K. Experimental and theoretical investigation of effect of concentrations of zinc acetate and sodium hydroxide on mechanical strength of chitosan nano ZnO films prepared by one pot procedure. *Chemical Physics Impact*. 2024, 8. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100492
- [83] ANJOS, O.; CAMPOS, M. G.; RUIZ, P. C.; ANTUNES, P. Application of FTIR-ATR spectroscopy to the quantification of sugar in honey. *Food Chemistry*. 2015, 169, 218-223. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.138
- [84] STĘPIEŃ, A.; WITCZAK, M.; WITCZAK, T. Moisture sorption characteristics of food powders containing freeze dried avocado, maltodextrin and inulin. *International Journal* of Biological Macromolecules. 2020, 149, 256-261.
 Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.154
- [85] HUMAN Ch.; DE BEER D.; AUCAMP M.; MARX I. J.; MALHERBE Ch J. et al. Preparation of rooibos extract-chitosan microparticles: Physicochemical characterisation and stability of aspalathin during accelerated storage. *LWT*. 2020, **117**(1). Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108653

MENDONÇA ESQUERDO V.; LEGEMANN MONTE M.; DE ALMEIDA PINTO L. A. Microstructures containing nanocapsules of unsaturated fatty acids with biopolymers: Characterization and thermodynamic properties. *Journal of Food Engineering*. 2019, **248**, 28-35. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.12.015

6. PŘÍLOHY

Příloha 1: ATR-FTIR spektrum pro inulin s vyznačenými absorpčními pásy
Příloha 2: ATR-FTIR spektrum pro maltodextrin DE15 s vyznačenými absorpčními pásy. 100
Příloha 3: ATR-FTIR spektrum pro chitosan s vyznačenými absorpčními pásy101
Příloha 4: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS), prášek inulinu (PIn), prášek maltodextrinu (PMdx) a prášek chitosanu (PCh) pro 25 °C102
Příloha 5: Hodnoty A _s , ΔE_1 , ΔE_2 a a _{w,c} pro prášky inulin (PIn), maltodextrin (PMdx) a chitosanu (PCh)
Příloha 6: Průměrné změny hmotnosti pro prášky inulinu (PIn), maltodextrinu (PMdx) a
chitosanu (PCh) při adsorpci vlhkosti při 25 °C104

Příloha 1: ATR-FTIR spektrum pro inulin s vyznačenými absorpčními pásy [77-79]

Vlnočet [cm ⁻¹]	Význam pásu
3289	Valenčních vibrací O-H hydroxylových skupin
2930	Valenční vibrace CH ₂
1645	Valenční vibrace C=O
1417	Valenční vibrace C-C
1337	Deformační vibrace C-O-H (z OH skupiny)
1108	Valenční vibrace C-O
1016	Valenční vibrace C-O-C
987	α-D-glukopyranóza
928	Deformační vibrace C-H (β-(2-1) glykosidická vazba)

Příloha 2: ATR-FTIR spektrum pro maltodextrin DE15 s vyznačenými absorpčními pásy [79-81]

Vlnočet [cm ⁻¹]	Význam pásů
3313	Valenčních vibrací O-H hydroxylových skupin
2923	Valenční vibrace CH ₂
1633	Valenční vibrace C=O
1409	Valenční vibrace vazeb C-C
1360	Deformační vibrace C-O-H
1147	Valenční vibrace C-O
992	Valenční vibrace C-O-C
927	Deformační vibrace C-H (α-(1-4) glykosidická vazba)

Příloha 3: ATR-FTIR spektrum pro chitosan s vyznačenými absorpčními pásy [78, 79, 81, 82]

Vlnočet [cm ⁻¹]	Význam pásu
3357	Valenční vibrace O-H a N-H
2867	Valenční vibrace CH ₂
1652	Deformační vibracemi N-H (amid I), Valenční vibrace C=O
1589	Deformační vibrace N-H (amid II)
1417	Valenční vibrace vazeb C-C
1373	Deformační vibrace C-O-H
1150	Valenční vibrace C-O
1023	Valenční vibrace C-O-C
892	Deformační vibrace C-H (β-(2-1) glykosidická vazba)

GAB	PPS	PIn	PMdx	PCh
M ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,125 \pm 0,009$	$0,11 \pm 0,01$	$0,046 \pm 0,002$	$0,102 \pm 0,007$
В	$1,0 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	$6,2 \pm 0,9$	$4,\!4 \pm 0,\!5$
С	$0,944 \pm 0,008$	$0,\!90\pm0,\!01$	$0,965 \pm 0,005$	$0,72\pm0,02$
R ²	99,98	99,98	99,94	99,85
MAPE	7,6	3,5	5,9	5,5
AIC	-104,9	-126,5	-145,0	-134,5
Interval a	0,2-0,9	0,2-0,9	0,1-0,9	0,1-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Freundlichova				
rovnice				
K _m	$0,41 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,03$	$0,152 \pm 0,002$	$0,223 \pm 0,005$
n _m	$1,83 \pm 0,03$	$1,6 \pm 0,1$	$0,97 \pm 0,02$	$0,93 \pm 0,02$
K _M	$1,\!09\pm0,\!02$	$0,\!57\pm0,\!03$	$0,\!544\pm0,\!008$	$0,\!18\pm0,\!02$
n _M	$10,3 \pm 0,3$	$7,5\pm0,8$	$9,4 \pm 0,2$	10 ± 1
R ²	99,99	99,95	99,99	99,97
MAPE	2,1	5,5	1,6	3,4
AIC	-124,4	-136,9	-179,7	-159,6
Interval a	0,2-0,9	0,1-0,9	0,1-0,9	0,1-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO
Rovnice dle Knaniho				
Q ₀ [kg H ₂ O/kg]	$0,\!170 \pm 0,\!005$	$0,11 \pm 0,02$	$0,062 \pm 0,003$	$0,108 \pm 0,002$
a ₁	$0,\!62\pm0,\!03$	$1,5* \pm 0,8$	$0,22 \pm 0,01$	$0,\!240 \pm 0,\!008$
n	$1,8 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,1$	$1,\!60\pm0,\!08$
a ₂	$1,033 \pm 0,004$	$1,11 \pm 0,02$	$1,020 \pm 0,004$	$1,22 \pm 0,02$
R ²	99,98	99,98	99,98	99,99
MAPE	2,6	4,6	3,0	2,2
AIC	-123,8	-148,9	-158,1	-177,5
Interval a	0,2-0,9	0,1-0,9	0,1-0,9	0,1-0,9
Vhodnost	ANO	ANO	ANO	ANO

Příloha 4: Parametry adsorpčních modelů pro prášek z plodů trnky obecné (PPS), prášek inulinu (PIn), prášek maltodextrinu (PMdx) a prášek chitosanu (PCh) pro 25 °C

*parametr je na hladině významnosti p = 0,05 statisticky nevýznamný; vhodnost modelu stanovena F-testem; průměrná hodnota ± standardní chyba

Příloha 5: Hodnoty A_s , ΔE_1 , ΔE_2 a $a_{w,c}$ pro prášky inulin (PIn), maltodextrin (PMdx) a chitosanu (PCh)

	A _s [m²/kg pevné látky]	$\Delta \mathbf{E}_1 \ [\mathbf{kJ} \cdot \mathbf{mol}^{-1}]$	$\Delta E_2 [kJ \cdot mol^{-1}]$	a _{w,c}
PIn	390,0	39,8	40,6	0,86
PMdx	219,8	44,6	40,8	0,86
PCh	382,9	44,3	40,1	1,02

	Průměrná změna hmotnosti [%/min]			
ERH [%]	PIn	PMdx	PCh	
0-20	0,03	0,04	0,06	
20-40	0,02	0,05	0,08	
40-60	0,09	0,05	0,06	
60-80	0,16	0,13	0,08	

Příloha 6: Průměrné změny hmotnosti pro prášky inulinu (PIn), maltodextrinu (PMdx) a chitosanu (PCh) při adsorpci vlhkosti při 25 °C

ERH, rovnovážná relativní vlhkost