

Pigmenty mikrobiálního původu a jejich využití v kosmetice

Pavína Kašková

*Bakalářská práce
2024*



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická**

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav technologie tuků, tenzidů a kosmetiky

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Pavlína Kašková
Osobní číslo: T23652
Studijní program: B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace: Biomateriály a kosmetika
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Pigmenty mikrobiálního původu a jejich využití v kosmetice

Zásady pro vypracování

Zpracujte rešerši věnovanou problematice pigmentů mikrobiálního původu, které mohou být využitelné v kosmetickém průmyslu.

Věnujte se různým typům pigmentů, jejich vlastnostem, zdrojovým mikroorganismům, způsobu produkce.

Formulujte výhody a nevýhody jejich aplikace v kosmetických přípravcích.

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

Seznam doporučené literatury:

- [1] BAKI, Gabriella. *Introduction to cosmetic formulation and technology*. Second edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2023. ISBN 978-111-9709-770.
- [2] SINGH, Om V., ed. *Bio-pigmentation and Biotechnological Implementations*. John Wiley, 2017. ISBN 9781119166146.
- [3] KIKI, Manal Jameel. Biopigments of Microbial Origin and Their Application in the Cosmetic Industry. *Cosmetics* [online]. 2023, **10**(2). ISSN 2079-9284. Dostupné z: doi:10.3390/cosmetics10020047.
- [4] RATHER, Luqman Jameel, Shazia Shaheen MIR, Showkat Ali GANIE, SHAHID-UL-ISLAM a Qing LI. Research progress, challenges, and perspectives in microbial pigment production for industrial applications – A review. *Dyes and Pigments* [online]. 2023, **210**. ISSN 01437208. Dostupné z: doi:10.1016/j.dyepig.2022.110989.
- [5] KUMAR, Subhash, Vijay KUMAR, A A A AMBIKA, et al. Microbial pigments: Learning from Himalayan perspective to industrial applications. [6] *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* [online]. 2022, 2022-08-06. ISSN 1367-5435. Dostupné z: doi:10.1093/jimb/kuac017.

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Iva Čermáková, Ph.D.**
Ústav technologie tuků, tenzidů a kosmetiky

Datum zadání bakalářské práce: **5. února 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Lucie Urbánková, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORKY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků budu uvedena jako spoluautorka.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studentky: Pavlína Kašková

.....
podpis studentky

ABSTRAKT

Vzhledem k rostoucí poptávce po přírodních a bezpečných barvivech v kosmetice, je stále větší zájem o pigmenty získané z mikroorganismů, jako jsou bakterie, plísňe, kvasinky nebo mikroskopické řasy. Použití mikrobiálních pigmentů v kosmetice nabízí několik výhod, včetně lepší snášenlivosti s pokožkou, sníženého rizika podráždění a zvýšené udržitelnosti produktu. Práce se zabývá analýzou vlastností mikrobiálních pigmentů a jejich možných aplikací v kosmetických produktech jako opalovací krémy, antiage nebo bělicí přípravky, které mají za cíl zlepšovat zdraví a vzhled naší pokožky.

Klíčová slova: mikrobiální pigment, karotenoidy, melanin, antioxidant, antiage, fotoprotekce

ABSTRACT

Due to the growing demand for natural and safe dyes in cosmetics, there is an increasing interest in pigments obtained from microorganisms such as bacteria, molds, yeasts or microalgae. The use of microbial pigments in cosmetics offers several advantages, including improved skin tolerance, reduced risk of skin irritation and increased product sustainability. The work deals with the analysis of the properties of microbial pigments and their possible applications in cosmetic products, such as sunscreen, anti-aging or whitening preparations, which aim to improve the health and appearance of our skin.

Keywords: microbial pigments, carotenoids, melanin, antioxidant, anti age, photoprotection

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala RNDr. Ivě Čermákové, Ph.D. za ochotu, vstřícnost, cenné rady a připomínky, které mi poskytla při psaní této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat celé mé rodině za podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 MIKROBIÁLNÍ PIGMENTY	10
1.1 KAROTENOIDY	10
1.1.1 Struktura karotenoidů.....	11
1.1.2 Karoteny.....	11
1.1.3 Xantofyly.....	13
1.1.4 Biosyntéza karotenoidů.....	15
1.1.5 Biotechnologická produkce karotenoidů.....	16
1.2 MELANIN.....	17
1.2.1 Biosyntéza melaninu	18
1.3 FIKOBILIPROTEINY	19
1.4 PRODIGIOSIN	19
1.5 INDIGOIDIN.....	20
1.6 VIOLACETIN	20
2 VYUŽITÍ MIKROBIÁLNÍCH PIGMENTŮ V KOSMETICE	21
2.1 FOTOPROTEKCE A ANTIOXIDAČNÍ KAPACITA	22
2.2 ANTIAGING A SKINCARE	23
2.3 BĚLÍCÍ EFEKT	24
2.4 HYDRATAČE.....	25
ZÁVĚR	26
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	27
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	35
SEZNAM OBRÁZKŮ	36
SEZNAM TABULEK	37

ÚVOD

Před formou kosmetiky, jak ji známe dnes, používali lidé ke zvýraznění a zlepšení svého vzhledu a zdraví přírodní ingredience. K výrobě kosmetiky tak dlouhou dobu sloužily minerální přísady, bylinné pasty a oleje. Kosmetika zahrnuje produkty určené ke zlepšení morfolgie, struktury a vzhledu pleti pomocí aktivních látek, které jsou vhodné pro různé typy pleti. V poslední době se kosmetický průmysl posunul směrem k ekologičtější výrobě, od ingrediencí až po obaly [1,2].

Pigmenty jsou barevné látky, které lze vyrobit syntetickými nebo přírodními prostředky. Pigmenty, které se vyrábějí syntetickými procesy, mají negativní dopad na životní prostředí a živé bytosti. Průmysl se tedy více zaměřuje na výrobu přírodních pigmentů, jako ekologickou alternativu k syntetickým [3]. Pigmenty přírodního původu si v poslední době získávají stále více pozornosti díky svému všestrannému použití ve farmaceutickém, potravinářském, kosmetickém a textilním průmyslu [4]. Přírodní barviva zlepšují prodejnost produktů a poskytují další výhody, včetně antioxidačních, antiagingových, protirakovinných, antivirových, antimikrobiálních a protinádorových vlastností [1]. V této souvislosti jsou mikrobiální pigmenty, díky jejich ekologické povaze a vysoké ekonomické hodnotě, ideálním a udržitelným zdrojem pigmentu [3].

Tato bakalářská práce se věnuje z hlediska kosmetiky nejzajímavějším skupinám pigmentů mikrobiálního původu. Popisuje jejich strukturu, vlastnosti a jejich potenciální využití v kosmetických přípravcích, jako jsou opalovací krémy, bělicí nebo hydratační prostředky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MIKROBIÁLNÍ PIGMENTY

Pigmenty jsou nedílnou součástí života na Zemi. Svůj význam mají u rozmanitých skupin organismů od těch nejjednodušších až po rostliny a živočichy, včetně člověka. U mikroorganismů je produkce pigmentů indukována vnitřními fyziologickými i vnějšími environmentálními signály. Výsledkem je produkce široké škály pigmentů, které mikroorganismům pomáhají k adaptaci na podmínky prostředí a mohou hrát podstatnou roli pro přežití druhu. Díky celé řadě zajímavých vlastností nachází mikrobiální pigmenty uplatnění v mnoha oblastech, jako je zemědělství, potravinářství, farmaceutický, textilní i kosmetický průmysl [2].

Mikrobiální pigmenty jsou přírodní sloučeniny produkované bakteriemi, mikroskopickými houbami a mikroskopickými řasami. Oproti syntetickým pigmentům mohou mít celou řadu výhod, jako je například biokompatibilita, nižší toxicita, biodegradabilita, relativně nízké výrobní náklady nebo ekologičtější postup výroby. Pigmenty vyráběné syntetickými postupy mají často negativní dopad na životní prostředí a živé organismy. Průmysl se proto zaměřuje na přírodní pigmenty šetrné k životnímu prostředí a jejich výroba přitahuje stále větší pozornost [3].

Mikrobiální pigmenty jsou často zajímavé i z pohledu své biologické aktivity, některé z nich působí jako antioxidanty, deodoranty, antimikrobní látky, repelenty nebo ochrana proti ultrafialovému (UV) záření. Tyto vlastnosti mohou být využitelné v mnoha odvětvích průmyslu, včetně oblasti kosmetiky [4].

Mezi nejdůležitější pigmenty, které jsou produkovány mikroorganismy, patří karotenoidy, flavonoidy, tetrapyroly xantofyly nebo melaniny [2].

1.1 Karotenoidy

Karotenoidy patří mezi nejdůležitější složky potravin. Jsou to přírodní barviva žluté, červené až fialové barvy. Některé karotenoidy jsou prekurzory vitamínu A. Z hlediska lidského zdraví se řadí mezi bioaktivní fytochemikálie, které snižují riziko onemocnění, jako je rakovina, kardiovaskulární onemocnění, věkem podmíněná makulární degenerace či šedý zákal [5].

Karotenoidy jsou v tucích rozpustné terpenoidní pigmenty přirozeně se vyskytující jako doprovodná fotosyntetická barviva ve fotosyntetických aparátech vyšších rostlin, řas a fototrofních bakterií. U nefotosyntetizujících organismů karotenoidy plní roli ochrany před

fotooxidativním poškozením. Slouží tedy jako antioxidanty chránící cytoplazmatické membrány buněk před poškozením kyslíkovými radikály [1].

1.1.1 Struktura karotenoidů

Karotenoidy jsou přírodní lipofilní pigmenty rozmanité struktury patřící mezi uhlovodíky. Základ karotenoidů tvoří 8 isoprenových jednotek. Jejich struktura je odvozena od acyklického řetězce $C_{40}H_{56}$ s jednoduchými a dvojnými vazbami distribuovanými po celé délce řetězce. Základní cyklická struktura může být modifikována hydrogenací, dehydrogenací, cyklizací, migrací dvojných vazeb, zkrácením nebo prodloužením řetězce, izomerizací a oxidací nebo kombinací těchto reakcí, což vede k diverzifikovaným strukturám karotenoidů [3].

Karotenoidy lze, na základě rozdílné chemické struktury, rozdělit na karoteny a xantofyly. Karoteny, jako je β -karoten, torulen a lykopen, obsahují ve svých chemických strukturách pouze uhlovodíkové kostry. Xantofyly jsou oxidační produkty karotenů, což vede k přítomnosti různých funkčních skupin, jako jsou epoxidové (violaxantin, neoxantin a fukoxantin), hydroxy (lutein a zeaxantin), keto (astaxantin a kanthaxantin) a methoxy (spirilloxantin) skupiny [6].

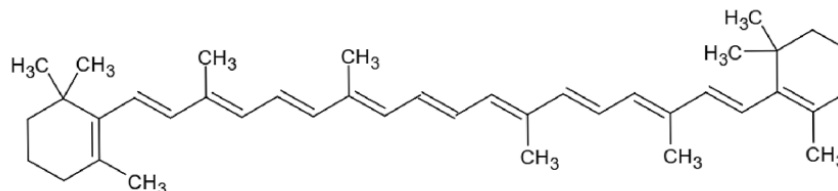
Karotenoidy lze dále rozdělit i podle počtu atomů uhlíku. Karotenoidy C_{40} nalzáme v hojné míře u eukaryot, archeí i bakterií, C_{30} a C_{50} karotenoidy produkují bakterie a archea, karotenoidy C_{45} , jejichž molekulu tvoří 9 isoprenových jednotek, nacházíme výlučně u bakterií [7].

1.1.2 Karoteny

β -karoten

β -karoten je používán jako potravinářské barvivo nebo jako doplněk stravy působící jako provitamin A. Své využití má také jako antioxidant. Díky své vysoké antioxidační kapacitě podporuje imunitní systém a snižuje riziko srdečních poruch a některých druhů rakoviny. Navíc je efektivní při prevenci onemocnění oka, jako je šedý zákal. Je to nenasycená bioaktivní látka nerozpustná ve vodě, mírně rozpustná v jedlých olejích [8].

Stavebně patří β -karoten k isoprenoidním fytochemikáliím. Má chemický vzorec $C_{40}H_{56}$ (viz Obrázek 1) a molekulovou hmotnost 536,88 g/mol. Tato biomolekula se vyskytuje jako hnědočervené nebo červenofialové krystaly, které jsou převážně složeny z trans izomerů s různými hladinami cis izomerů závislých na konfiguraci [8].



Obrázek 1: Chemická struktura β -karotenu [6]

Torulen a torularhodin

Torulen a torularhodin reprezentují skupinu karotenoidů produkovanou některými kvasinkami a plísněmi, nejvýznamnějším producentem jsou kvasinky rodu *Rhodotorula*. Tyto karotenoidy zatím nejsou příliš studovány, ale v posledních letech se objevují studie věnované jejich antioxidačním, antibakteriálním účinkům a ochranným účinkům vůči UV záření, což je kombinace vlastností velmi dobře využitelná v kosmetických přípravcích.

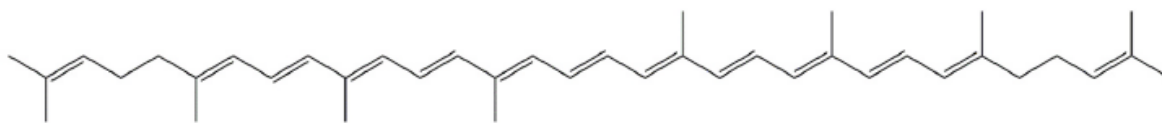
Torulen má ve své struktuře systém 13 konjugovaných vazeb, kterému jsou připisovány antioxidační vlastnosti. Torulen má vyšší oxidační účinnost než β -karoten, který obsahuje méně dvojných vazeb [5, 9, 10].

Lykopen

Lykopen patří do skupiny karotenoidů, které se vyskytují v ovoci, zelenině a zelených rostlinách. Lykopen, stejně jako ostatní karotenoidy, je přírodní pigment syntetizovaný rostlinami a mikroorganismy. Absorbuje světlo během fotosyntézy a chrání je před fotosenzibilizací.

Jedná se o nocyklický karotenoid s molekulovým vzorcem $C_{40}H_{56}$ (viz Obrázek 2) a molekulovou hmotností 536,85 g/mol. Je to lipofilní pigment nerozpustný ve vodě [11, 12]. Cyklizací lineární sloučeniny lykopenu vznikají α -, β -, γ - nebo ϵ -karoteny. Monocyklický karoten je prekurzorem myxoxantofylů u sinic, je meziproduktem i konečným produktem karotenogeneze u oranžových a žlutých květů a plodů a je

meziproduktem v biosyntéze chlorobaktenu u zelených sírných bakterií. Dicyklický karoten je hlavní složkou fotosystémů I a II u sinic a rostlin [13].



Obrázek 2: Chemická struktura lykopenu [4]

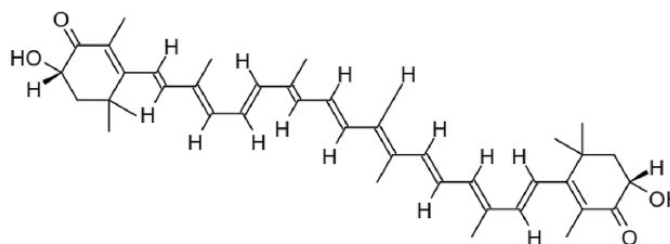
V současné době existují tři hlavní způsoby syntézy lykopenu. Lze ho získat extrakcí rajčat, chemickou syntézou nebo může být produkován mikroorganismy. Syntéza mikroorganismy není ovlivněna ročním obdobím, regionem, klimatem a dalšími faktory a její výhodou jsou nízké náklady, kontrolovatelná kvalita produktu, vysoká bezpečnost a menší znečištění životního prostředí [14].

V přírodě existuje mnoho bakterií, které produkují lykopen jako hlavní karotenoid. V průmyslu je plíseň *Blakeslea trispora* uznávána jako přírodní zdroj karotenoidů, zejména β -karotenu a lykopenu. Pro účinné zvýšení výtěžnosti lykopenu se obvykle používají blokátory inhibující přeměnu lykopenu na β -karoten, která je katalyzována lykopencyklázou. Nikotin a 4-methylmorfolín vykazují lepší účinky než pyridin a piperidin jako inhibitory cyklázy u *B. trispora* [14].

1.1.3 Xantofyly

Astaxantin

Astaxantin má molekulový vzorec $C_{40}H_{52}O_4$ (viz Obrázek 3). Je to v tučích rozpustný červeně zbarvený sekundární metabolit, který má vynikající antioxidační vlastnosti. Využívá se v potravinářském průmyslu, v kosmetice nebo v léčivech. Astaxantin se obvykle vyrábí synteticky, přírodní se získává z ryb, krevet a mikroorganismů. Existuje celá řada zdrojů přírodního astaxantinu, mezi ně patří např. mikroskopické řasy *Haematococcus pluvialis*,



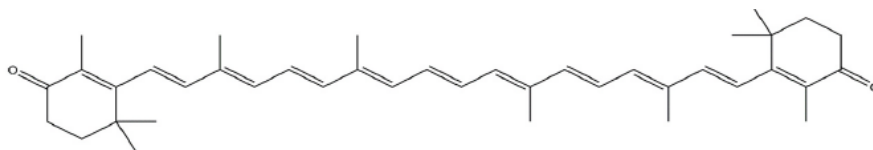
Obrázek 3: Chemická struktura astaxantinu [6]

Chlorella vulgaris, *Chlorococcum* sp., *Chromochloris zofingiensis* nebo načervenalé kvasinky *Phaffia rhodozyma* [15, 16].

Astaxantin je nejsilnější antioxidant, má 100x vyšší antioxidační aktivitu než α -tokoferol (vitamín E) a dalších více než 600 známých přírodních karotenoidů. Kromě toho má astaxantin protizánětlivé, antihypertenzní, antiobezitní, antiapoptotické, antimikrobiální, gastroprotektivní, neuroprotektivní a protinádorové účinky [15, 16, 17].

Kantaxantin

Kantaxantin ($C_{40}H_{52}O_2$) je di-ketokarotenoid známý také jako β,β -karoten-4,4'-dion (Obrázek 4) a má molekulovou hmotnost 564,86 g/mol. Vzhledem k absorpci světla ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra při vlnové délce přibližně 470 nm v závislosti na rozpouštědle (aceton $\lambda = 477$ nm, petrolether $\lambda = 466$ nm) se kantaxantin jeví jako červenooranžový lipofilní pigment [18, 19].



Obrázek 4: Chemická struktura kantaxantinu [5]

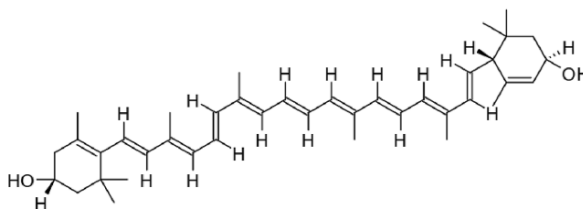
Lutein

Lutein, zářivě žlutý karotenoidní pigment rozpustný v tucích, vyniká mezi ostatními karotenoidy a nabízí mnoho léčivých a výživových výhod. Je to primární metabolit mikroskopických řas, který je nedílnou součástí sběru světla, fotosyntézy a ochrany před fotooxidačním poškozením [20].

Má řadu bioaktivních vlastností, a proto se široce používá ve farmaceutickém průmyslu, nutraceutikách, akvakultuře nebo kosmetice. Kromě antioxidačních vlastností, protirakovinných účinků a funkci při vývoji dětského nervového systému, hraje významnou roli při ochraně očí před oxidačním poškozením způsobeným modrým světlem. Je klinicky prokázáno, že lutein zabraňuje vzniku šedého zákalu a užívání většího množství luteinu by mohlo člověka chránit před makulární degenerací [20,21].

Molekulový vzorec luteinu je $C_{40}H_{56}O_2$ (viz obrázek 5). Obsahuje 40 atomů uhlíku a šest dvojných vazeb uhlík-uhlík s připojenými methylovými skupinami. Přítomnost dvou

hydroxylových skupin na obou koncích molekuly odlišuje lutein a zeaxantin od několika dalších karotenoidů, je také zodpovědná za jejich zvýšenou chemickou reaktivitu se singletovým kyslíkem [20].



Obrázek 5: Chemická struktura luteinu [6]

Dosud jediným komerčním zdrojem luteinu jsou květy měsíčku lékařského. Použití tohoto zdroje má však mnoho nevýhod, jako je závislost na ročním období. Oproti tomu je získávání luteinu z mikroskopických řas relativně levný a jednoduchý proces. Míra produkce luteinu u mikroskopických řas je 3-6krát vyšší než u květů měsíčku lékařského [17]. Existuje mnoho druhů mikroskopických řas, které jsou schopny produkovat lutein, například *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Haematococcus* a *Scenedesmus* [20].

1.1.4 Biosyntéza karotenoidů

Biosyntéza karotenoidů mikroby je dobře regulovatelný proces, který závisí na genotypu, environmentálních podmínkách a stresu kultur během jejich růstu [3]. Zahrnuje dvě prekurzorové molekuly – isopentenylpyrofosfát (IPP) a jeho allylový izomer dimethylallyldifosfát (DMAPP). Obě tyto pětiuhlíkaté molekuly jsou součástí mevalonátové metabolické dráhy (MVA) i metylerytritolfosfátové (MEP) dráhy. Fotosyntetizující organismy včetně mikroskopických řas a rostlin využívají dráhu MVA, zatímco dráha MEP převládá u většiny bakterií a hub [6]. Výchozími substráty MVA a MEP dráhy jsou acetyl-CoA, glycerinaldehyd-3-fosfát (G3P) a pyruvát [3].

V MVA dráze dochází ke kondenzaci 2 molekul acetyl-CoA, čímž vzniká 3-hydroxy-3-methylglutaryl-CoA (HMG-CoA), HMG-CoA se dále redukuje na mevalonát. Tento mevalonát podstoupí tři fosforylace a jednu dekarboxylaci, aby vznikl IPP [3]. Biosyntéza IPP v MEP dráze začíná kondenzací G3P a pyruvátu, následuje redukční izomerační reakce, následná kopulace s cytidintrifosfátem (CTP) a na závěr fosforylační a cyklizační reakce [2].

Po vytvoření izoprenových prekurzorů 1 molekula DMAPP a 3 molekuly IPP kondenzují za vzniku 1 molekuly geranyldifosfátu (GPP; C10). Dochází k prodloužení a vzniku

farnesyldifosfátu (FPP; C15) a geranylgeranyldifosfátu (GGDP; C20). Dvě molekuly GGDP kondenzují a vzniká bezbarvý karotenoid – lykopen. Lykopen působí jako prekurzorová molekula k vytvoření dalších karotenoidů, které zahrnují α -karoten, β -karoten, lutein, zeaxantin a astaxantin [22].

1.1.5 Biotechnologická produkce karotenoidů

Karotenoidy jsou v současné době stále vyráběny synteticky, případně jsou izolovány z rostlinného materiálu. Čím dál častěji jsou ale upřednostňovány biotechnologické výrobní postupy, které využívají k produkci karotenoidních pigmentů mikroorganismy.

Karotenoidy mohou být za definovaných podmínek syntetizovány třemi základními skupinami mikroorganismů, mezi které patří mikroskopické řasy, bakterie a vláknité houby [6].

1.1.5.1 Produkce karotenoidů mikrořasami

Mikrořasy získávají velkou pozornost jako možný udržitelný zdroj lipidů a karotenoidů. Jejich mechanismus akumulace lipidů a karotenoidů může být spuštěn stresovými podmínkami, jako je omezení živin nebo vystavení škodlivým fyzikálním faktorům. Toho může být efektivně využito při nastavení podmínek produkce karotenoidů. Na druhé straně je ale kultivační proces nutné optimalizovat tak, aby při stresových podmínkách nedocházelo k nežádoucímu zpomalení růstu buněk [17].

Fotosyntetizující mikrořasy, jako je *Arthrospira (Spirulina)*, *Chlorella*, *Dunaliella* a *Haematococcus*, jsou jedny z mnoha producentů komerčně důležitých karotenoidů, mezi které patří fukoxantin, violaxantin, neoxantin, α -karoten, β -karoten nebo lutein. Při vhodných podmínkách kultivace mohou mikrořasy vyprodukovat značné množství karotenoidů (3–5 % sušiny biomasy), v biomase jsou pak obsaženy hlavní převažující karotenoidy se zbytkovými frakcemi jiných minoritních karotenoidů. Například 80 % všech karotenoidů vyprodukovaných řasou rodu *Arthrospira* tvoří β -karoten, ve zbytkové frakci najdeme lutein, kryptoxantin a další pigmenty [6, 17, 23].

1.1.5.2 Produkce karotenoidů bakteriemi

Bakterie produkující karotenoidy lze rozdělit do několika skupin, z nichž nejvýznamnější je skupina anoxygenních fototrofních bakterií, kterým karotenoidy slouží jako doprovodné

fotosyntetické pigmenty. V této skupině bakterií bylo identifikováno více než 50 rodů a 130 druhů schopných produkovat více než 100 různých karotenoidních pigmentů [6].

U heterotrofních bakterií jsou karotenoidy produkovány jako sekundární metabolity a hrají ústřední roli ve schopnosti buněk přizpůsobit se různým prostředím. Je známo, že poskytují ochranu buněk před UV zářením. Mezi nejznámější rody a druhy bakterií produkující karotenoidy patří *Flavobacterium* spp., *Agrobacterium* spp., *Micrococcus* spp., *Arthrobacter* spp., *Serratia marcescens*, *Pseudomonas aeruginosa* a *Agrobacterium* spp. [24, 25].

Průmyslově významnými producenty karotenoidních pigmentů jsou například *Brevibacterium linens* (kryptoxantin), *Bradyrhizobium* spp. (kantaxantin), *Brevundimonas* spp. nebo *Sfingomonas* spp. (astaxantin) [26].

1.1.5.3 Produkce karotenoidů kvasinkami a mikroskopickými houbami

Běžnými mikrobiálními zdroji karotenoidů jsou také kvasinky a mikroskopické houby. Plísňe jako *Blakeslea trispora* a *Mucor circinelloides* produkují β -karoten, zatímco kvasinka *Xanthophyllomyces dendrorhous* produkuje především astaxantin. Další kvasinky produkující karotenoidy např. *Rhodoturula*, *Sporobolomyces* a *Sporidiobolus* syntetizují výhradně torulen [5].

1.2 Melanin

Melaniny jsou přírodní vysokomolekulární pigmenty, které se vyskytují u živočichů, rostlin a většiny mikroorganismů. Vznikají oxidační polymerací fenolových nebo indolových sloučenin [25].

Melanin má poměrně rozmanitou a heterogenní strukturu. To je způsobeno všudypřítomnými zdroji melaninu, což vede k jeho heterogenitě ve složení, velikosti, barvě a funkci. Fyzikálně-chemické vlastnosti melaninu (vysoce negativní náboj, vysoká molekulová hmotnost a hydrofobní povaha) navíc brání analytickým přístupům k identifikaci a charakterizaci jeho struktury [27].

Výsledné pigmenty mají často hnědou nebo černou barvu, mohou být ale také zbarveny do žluta či červena. Melaniny hrají důležitou roli v ochraně mikroorganismů před tepelným, chemickým a biochemickým stresem [28]. Melanin je známý svou absorpční schopností záření všech vlnových délek s optimální absorpcí v UV oblasti, která zabraňuje fotooxidaci. Proto se používá při přípravě fotoabsorpčních optických čoček a v bioplastech. Kromě fotoprotekce má všestranné biologické účinky, jako je vychytávání radikálů, antioxidační,

protinádorové, protizánětlivé účinky, uplatňuje se i jako látka stimulující imunitní systém [25]. U lidí melanin nejen určuje barvu kůže, ale hraje také důležitou roli při ochraně před UV zářením a jeho nedostatek vede k řadě abnormalit a onemocnění [28].

Melaninové pigmenty lze rozdělit podle jejich chemické struktury na eumelanin, feomelanin, neuromelanin a alomelanin [27]. Eumelaniny jsou hnědé až černé pigmenty vznikající oxidační polymerací tyrosinu (nebo fenylalaninu) na L-3,4-dihydroxyfenylalanin (L-DOPA), který se dále přeměňuje na dopachrom a poté na melanin. Eumelanin je převládající pigment syntetizovaný u lidí a mikroorganismů. Feomelaniny jsou červené nebo žluté barevné pigmenty, které jsou zpočátku syntetizovány stejně jako eumelaniny, ale DOPA podléhá cysteinylaci a obsahují ve své struktuře síru [28]. Neuromelanin vzniká explicitně v lidských neuronech oxidací dopaminu a dalších prekurzorů katecholaminů. U rostlin, hub a bakterií se identifikovaný melanin nazývá alomelanin. Tato skupina zahrnuje řadu nedusíkatých podskupin melaninu odvozených od různých katecholových a dihydroxynaftalenových prekurzorů, které se obvykle uvádějí jako katecholový melanin (u rostlin), dihydroxynaftalen (DHN) melanin a pyomelanin (u bakterií a hub) [27]. Alomelaniny jsou pigmenty zahrnují heterogenní skupinu polymerů bez dusíku, které vznikají z různých zdrojů, jako je například dihydrofolát, kyselina homogentisová nebo katecholy [28].

1.2.1 Biosyntéza melaninu

Většina bakteriálních melaninů vzniká přeměnou aromatických aminokyselin, jako je tyrosin. Některé bakterie mohou navíc vyrábět melanin z malonyl-CoA v procesu katalyzovaném polyketidovými syntázami. Malonyl CoA dává vzniknout melaninu typu DHN. Naproti tomu tyrosin působí jako substrát pro tyrosinázu a lakázu a vytváří melanin typu DOPA [27].

Monohydroxylovaná sloučenina tyrosin je oxidována za vzniku dihydroxylovaných (difenolových) derivátů reakcemi, při nichž může být aminoskupina zachována, čímž vzniká L-DOPA, nebo eliminována před oxidací, čímž vznikají sloučeniny homogentisát (2,5-dihydroxyfenylacetát) nebo homoprotokatechová kyselina (3,4-dihydroxyfenylacetát). Tyto sloučeniny jsou oxidovány spontánně nebo činností specifických enzymů za vzniku dopachinonů nebo benzochinonů [20]. Dopachinony jsou vysoce aktivní a spontánně se oxidují a autopolymerují za vzniku melaninu [27].

S ohledem na výtěžnost produkce melaninu nejsou mikroorganismy využívající DHN-cestu preferovány, protože při této cestě je pigment syntetizován endogenně a je pevně vázán na vnitřní stranu buněčné stěny. To činí extrakci melaninu velmi obtížnou. Alternativou je melanogeneze prostřednictvím DOPA-dráhy, což je mechanismus, který mikroorganismy využívají k neutralizaci toxických fenolových sloučenin z prostředí, například těch, které mikroorganismy uvolňují během obrany hostitele. V důsledku toho je mnoho mikrobů při syntéze melaninu závislých na exogenních substrátech tyrosinu nebo tyrosinových derivátů.

V neposlední řadě lze mikrobiální produkci melaninu dále zlepšit použitím technik genového inženýrství ke zvýšení přirozené melanogenní kapacity některých organismů nebo vytvořením nových kmenů produkujících melanin [27].

1.3 Fykobiliproteiny

Fykobiliproteiny (PBP) jsou hlavní složkou světlosběrných komplexů u sinic a červených řas [29].

Fykobiliproteiny jsou ve vodě rozpustné molekuly složené z proteinů a chromoforů, nazývaných fykobiliny, kovalentně vázané přes cystei. Kromě důležité úlohy ve fotosyntéze mají PBP mnoho potenciálních aplikací v potravinách, kosmetice a lékařské diagnostice [29].

PBP lze rozdělit do čtyř typů podle jejich spektrálních vlastností: fykoerytrin (PE), fykocyanin (PC), allofykocyanin (APC) a fykoerytrocyanin (PEC) [29].

Základní stavební jednotkou PBP je monomer složený z podjednotek α a β . Monomery oligomerizují do $(\alpha\beta)_3$ trimeru s C3 symetrií. Dva $(\alpha\beta)_3$ tvoří $(\alpha\beta)_6$ hexamerovou strukturu s trojnásobnou symetrií. V PE se další podjednotka γ obvykle váže na jednu část $(\alpha\beta)_6$, čímž vzniká stabilnější PBP. U sinic a červených řas se trimery nebo hexamery PBP skládají do PBS. Absorpční vlastnosti PBP jsou připisovány přítomnosti tetrapyrrolových chromoforů s otevřeným řetězcem zvaných fykobiliny, mezi které patří fykokyanobilin (PCB), fykoerythrobilin (PEB), fykurobilin (PUB) a fykoviolobilin (PXB) [29].

1.4 Prodigiosin

Červený pigment prodigiosin je sekundární metabolit produkovaný bakteriemi *Serratia marcescens*, *Pseudomonas magnesorubra*, *Vibrio psychroerythrous*, *Serratia rubidaea* nebo *Vibrio gazogenes*. Prodigiosin je velmi účinná léčivá chemická látka, své využití

nachází zejména jako imunosupresivum a lék proti rakovině. Má také insekticidní, antifungální, antibakteriální a antimalarické vlastnosti [1]. Bylo zjištěno, že prodigiosin zvyšuje ochranný faktor proti slunečnímu záření (SPF) komerčních opalovacích krémů [30]. Struktura prodigiosinu byla objasněna na počátku 60. let 20. století částečnou. Tři pyrrolové kruhy prodigiosinu se běžně označují jako pyrrolový kruh A, kruh B a kruh C. Prodigiosin existuje ve dvou interkonvertujících rotamerech, cis (nebo β) a trans (nebo α). Rovnováha mezi těmito formami je závislá na pH roztoku, trans forma snadněji protonuje [30].

1.5 Indigoidin

Indigoidin (5,5'-diamino-4,4'-dihydroxy-3,3'-diazadifenoguinon-(2,2')) je ve vodě rozpustný modrý pigment. Kromě svých antioxidačních a antimikrobiálních aktivit může indigoidin díky své stabilitě a tmavě modré barvě najít uplatnění jako průmyslové barvivo šetrné k životnímu prostředí [1, 31].

1.6 Violacetin

Violacein je purpurový pigment odvozený od bis-indolu s několika unikátními biologickými vlastnostmi. Tento pigment mohou produkovat rody *Pseudoalteromonas*, *Alteromonas*, *Collimonas* a *Chromobacterium spp.* Violacein vykazuje vrchol absorpance UV při 260 nm, což naznačuje možnou funkci ochrany proti UV a viditelnému záření. Kromě odolnosti vůči UV záření má violacein antimikrobiální účinek proti gramnegativním a grampozitivním bakteriím, ale i plísním [1].

2 VYUŽITÍ MIKROBIÁLÍCH PIGMENTŮ V KOSMETICE

Před vznikem kosmetiky, jak ji známe dnes, používali lidé ke zlepšení svého vzhledu a zdraví přírodní ingredience. K výrobě kosmetiky se používaly minerální složky, bylinné pasty nebo oleje. Kosmetika zahrnuje výrobky určené ke zlepšení morfologie, struktury a vzhledu pokožky pomocí účinných látek [32].

Přírodní pigmenty vykazují příznivé biologické vlastnosti, zejména antioxidační a antimikrobiální. Kůže je důležitý orgán, který chrání lidské tělo mnoha způsoby. S věkem se ale postupně ztenčuje a ztrácí svou elasticitu a hydrataci. Protože je kůže vystavována chemikáliím a ultrafialovému (UV) záření, může ztrácet svou antioxidační schopnost, a tak rychleji stárne. Péče o pleť je proto důležitá nejen pro vzhled a zdraví pokožky, ale také pro její bariérovou funkci [33].

Řada kosmetických produktů obsahuje syntetické přísady, které působí nepříznivě na lidský organismus. Mezi tyto látky patří například některé UV filtry nebo kovové pigmenty v očních stínech nebo rtěnkách. Kosmetika je v přímém kontaktu s lidským organismem, některé látky v ní obsažené se mohou vstřebávat a působit jako karcinogeny, reprodukční toxiny, endokrinní disruptory nebo mutageny [34].

Spotřebitelé, kteří se zajímají o bezpečnost, jsou ochotni utratit více peněz za produkty obsahující přírodní složky, které jsou lepší pro jejich kůži. Přítomnost přírodních pigmentů v kosmetice může zvýšit prodejnost výrobku [1]. Výroba takových pigmentů je navíc levná, šetrná k životnímu prostředí a obnovitelná. V důsledku toho je zásadní zkoumat četné přírodní zdroje barviv a jejich využití [35].

Příklady využití pigmentů produkovaných mikroorganismy jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1: Využití pigmentů produkovaných mikroorganismy v kosmetickém průmyslu [35, upraveno]

Mikroorganismus	Chemická látka	Kosmetická aplikace
<i>Halomonas venusta</i>	melanin	UV ochrana
<i>Haematococcus pluvialis</i>	astaxantin	redukce pigmentace pokožky, antioxidant, hydratace
<i>Cryptococcus neoformans, Aspergillus fumigatus, and Axophiala dermatitidis</i>	melanin	zesvětlení a depigmentace pokožky

<i>Rhodosporidium, ustilago, sclerotium</i>	karotenoidy	prostředky na opalování
<i>Muriellopsis sp., Chlorella protothecoides</i>	lutein	antioxidační a antiage účinek
<i>Nannochloropsis oculata</i>	zeaxantin	produkty na zesvětlení pleti

2.1 Fotoprotekce a antioxidační kapacita

UV záření přispívá k řadě kožních onemocnění včetně zánětů, degenerativního stárnutí a rakoviny. Rekreační expozice UV záření se v posledních letech dramaticky zvýšila kvůli venkovním volnočasovým aktivitám a záměrnému opalování pro kosmetické účely. UV fotony jsou součástí elektromagnetického spektra a spadají mezi vlnové délky viditelného světla a gama záření. UV energii lze na základě elektrofyzikálních vlastností rozdělit na složky UVA, UVB a UVC, přičemž fotony UVC mají nejkratší vlnové délky (100–280 nm) a nejvyšší energii, UVA má nejdelší vlnovou délku (315–400 nm). Každá složka UV může mít různé účinky na buňky, tkáně a molekuly [36].

Opalovací krémy jsou přípravky na ochranu proti slunci, které pomáhají snižovat rizika poškození způsobené UV zářením. Některé opalovací krémy postrádají světelnou stabilitu, dráždí pokožku a způsobují alergické reakce. Kromě toho mohou tyto přípravky také ovlivnit životní prostředí. Kosmetický trh proto neustále hledá nové ekologicky šetrné molekuly odolné vůči UV záření, které by tuto situaci změnily. Nižší eukaryota, jako jsou mořské mikrořasy, si vyvinuly mechanismy k syntéze sekundárních metabolitů nesouvisejících s jejich růstem a reprodukcí, ale většina těchto metabolitů může interagovat s UV světlem a koordinovat buněčné funkce. Mnoho mořských mikrobiálních zdrojů mykosporinových aminokyselin může absorbovat UV záření v rozsahu od 310 do 360 nm [33].

Antioxidant je molekula, která má schopnost inhibovat oxidaci. Přírodní antioxidanty vyskytující se v kůži inhibují reaktivní formy kyslíku (ROS). Tyto molekuly mají velmi vysokou reaktivitu a jsou produkovány při normálním aerobním metabolismu v organismech. Oxidativní stres buněk může mít za následek poškození DNA, RNA, lipidů nebo proteinů. Hromadění ROS mohou dále způsobovat buněčnou smrt prostřednictvím nekrotických a apoptotických procesů a vznik vrásek. Chemické UV filtry nemusí

poskytovat kompletní ochranu kůže, protože UV paprsky absorbují a neodrážejí. Z toho důvodů musí být v přípravcích na opalování přítomny také antioxidanty [1, 8].

Součástí složení opalovacích krémů, přípravků proti stárnutí a antioxidačních přípravků mohou být například karotenoidy. Tyto sloučeniny jsou uvnitř buněk sinic zodpovědné za zachycení energie z fotosyntetického metabolismu, zmírnění škodlivých účinků a poškození buněk. Po extrakci mohou být tyto sloučeniny použity pro podobný účel v lidské kůži, kde dlouhodobé vystavení slunečnímu záření (UV záření a vysoká intenzita světla) přispívá k potenciálnímu poškození buněk [32].

β -karoten vykazuje dobré antioxidační vlastnosti a existuje korelace mezi jeho konzumací a ukládáním v kůži. Tělo ho přeměňuje na vitamin A, který pomáhá produkci melaninu. Také lykopen, silný přírodní antioxidant, neutralizuje reaktivní formy kyslíku. Díky těmto vlastnostem je považován za slibnou doplňkovou složku opalovacích krémů, kde přináší výhody ve zlepšení zdraví a textury pokožky. Astaxantin působí proti vzniku vrásek a skvrn a hraje klíčovou roli při ochraně pokožky před škodlivými vlivy fotooxidace vyvolanými UV paprsky [1, 8].

2.2 Antiaging a skincare

V důsledku urbanizace a globalizace došlo ke zvýšení stresu a znečištění, což vedlo k předčasnému stárnutí kůže. Stárnutí pokožky zahrnuje její ztenčení, tvorbu vrásek a jemných linek, rozšířené póry, křehkost, ochablost a suchost [37].

Vnitřní stárnutí znamená zhoršení stavu kůže v podobě ztráty elasticity, zvýšené průhlednosti a cévní prominence. Naproti tomu vnější stárnutí je způsobeno vystavením UV záření a dráždivým látkám. Je charakterizováno úbytkem keratinocytární dysplazie v epidermis a dermální extracelulární matrix, což vede k pigmentaci, ochablosti, vráskám a hrubnutí [1].

Antioxidanty a krémy proti stárnutí jsou nejoblíbenějšími řešeními a jsou neustále žádané, protože lidé chtějí vypadat atraktivněji a zdravěji. S rostoucími obavami o biologickou bezpečnost a toxicitu se spotřebitelé obracují k přírodním produktům, jejichž používání je bezpečnější [38]. Současná poptávka po udržitelných složkách v kosmetickém průmyslu podpořila hledání nových aktivních přírodních složek. Například karotenoidy jsou jedny z nejdůležitějších mikrobiálních pigmentů, které jsou bezpečné a díky své barvě se

v kosmetickém průmyslu používají různými způsoby [39]. Biologické funkce karotenoidů v kůži jsou spojeny jak s jejich úlohou prekurzoru vitamínu A, tak s jejich funkcí v kůži a jejich schopností sloužit jako fotoprotektivní prostředek proti UV záření. Mechanismem účinku při prevenci poškození kůže způsobeného sluncem je přímá absorpce UV záření. Některé klinické studie ukázaly, že použití karotenoidů jako nutrikosmetických složek může pomoci zabránit předčasnému stárnutí kůže [1].

Bylo zjištěno, že β -kryptoxantin, karotenoid obsažený v *Dunaliella salina* a dalších mikroskopických řasách, může stimulovat produkci kyseliny hyaluronové, což je glykosaminoglykan důležitý pro hydrataci kůže. Lykopen se již používá jako složka proti stárnutí ve skincare produktech, sinice a mikroskopické řasy mohou být vhodným zdrojem lykopenu pro kosmetické účely. Astaxantin produkovaný z *Haematococcus pluvialis* zlepšuje strukturu kůže, vrásky, korneocytární vrstvu a obsah vlhkosti. Existuje mnoho komerčních výrobků, které toto barvivo obsahují, například AstaBlanc, přípravek proti vráskám a skvrnám s obsahem astaxanthinu, který prodává japonská společnost kosmetická společnost Kose. Švédská společnost AstaReal AB uvedla na trh přírodní astaxanthin (AstaReal), který revitalizuje pleť, odstraňuje vrásky a zlepšuje pružnost pokožky [1].

2.3 Bělící efekt

Epidermis, což je svrchní vrstva kůže, se skládá převážně z melanocytů a keratinocytů. Melanocyty předávají melanin keratinocytům, což umožňuje kůži vytvářet melaninové čepičky a snižuje poškození DNA buněk epidermis způsobené UV zářením. Množství, distribuce a typ melaninu v kůži jsou hlavními faktory určujícími barvu kůže. Tyrosináza je klíčovým enzymem při tvorbě melaninu. Tyrosin může být její katalýzou přeměněn na dopachinon, který se pak několika chemickými reakcemi přemění na melanin [1].

Bělení kůže je oblíbeným kosmetickým zákrokem po celém světě, zejména v Asii. V asijské kultuře je bílá pleť považována za atraktivní. V důsledku toho představují přípravky na bělení pleti významnou část kosmetického průmyslu, přičemž se do budoucna předpokládá jejich značný růst [37].

Vystavení slunci zvyšuje produkci tyrosinázy i melanozomů. Melanozomy se vyvíjejí a vytvářejí melanin, který migruje do keratinocytů a rozkládá se, čímž podporuje opálení a melanizaci kůže. Opálení pak může být odstraněno ztrátou melaninu způsobenou deskvamací. Nejčastější metodou bělení kůže je využití inhibitorů tyrosinázy, protože tento enzym katalyzuje proces pigmentace. V kosmetickém a farmaceutickém odvětví nabývají

inhibitory tyrozinázy na významu díky své schopnosti předcházet problémům s pigmentací. Inhibitory tyrozinázy se používají v kosmetice při hyperpigmentaci, zejména při vzniku pih, a mohou způsobit snížení produkce melaninu. Tyrosináza a její inhibitory by mohly být také použity k výrobě léčivých přípravků k léčbě albinismu a piebaldismu, které jsou způsobeny nedostatkem pigmentace. Bylo prokázáno, že fukoxanthin získaný z *Laminaria japonica* inhibuje aktivitu tyrozinázy u morčat ozářených UVB zářením a melanogenezi u myši ozářených UVB zářením. Kromě toho, perorální příjem fukoxanthinu snížil expresi kožní mRNA související s melanogenezí, což naznačuje, že fukoxanthin nepříznivě ovlivňuje melanogenezi na povrchu kůže na transkripční úrovni. [1]

Primární karotenoid v *Haematococcus pluvialis*, astaxanthin, má schopnosti enzymů superoxiddismutázy a katalázy, které chrání proteiny lidských lymfocytů a kritické lipidy před oxidačním poškozením. Je to lepší antioxidant než vitaminy E, C a další karotenoidy. Podle studií, lze astaxanthin používat lokálně i perorálně ke snížení hyperpigmentace kůže, zastavení tvorby melaninu a zlepšení zdraví kůže. Navíc bylo prokázáno, že astaxanthin produkovaný mořskými kvasinkami zabraňuje vzniku stařeckých skvrn [1].

2.4 Hydratace

Fibroblast je základní buňka vazivové tkáně. Produkuje kolagenní, elastinová vlákna a extracelulární matrix, která se skládá z glykoproteinu, kyseliny hyaluronové, glykosaminoglykanů a dalších látek, jako je voda nebo soli. Glykosaminoglykany uchovávají většinu hydratace v kůži. Voda je nezbytná pro správné fungování kůže. Vliv vnějších faktorů urychluje stárnutí kůže a narušuje její ochrannou funkci. Kvůli tomu je kůže křehčí a postupně ztrácí svou přirozenou elasticitu. Keratinocyty v epidermis obsahují přirozený hydratační faktor (NMF). Součástí NMF je například močovina, polysacharidy nebo aminokyseliny. Lipidy mezi buňkami kožní kutikuly také zvlhčují a vytvářejí bariéru, která zabraňuje ztrátě vody [33].

Mořské organismy produkují hydratační molekuly, jako jsou mastné kyseliny a polysacharidy, které se běžně používají v kosmetice. Omega-6 polynenasycené mastné kyseliny pocházející z řas, zejména kyselina linolová a kyselina gama-linolenová, lze přidat do emulzí oleje ve vodě pro zvlhčení pokožky. Nedostatek nenasycených mastných kyselin může způsobovat dermatitidu a dehydrataci pokožky [33].

ZÁVĚR

Cílem práce bylo charakterizovat pigmenty produkované mikroorganismy a jejich využití v kosmetickém průmyslu. Vzhledem k rostoucímu povědomí o škodlivých účincích syntetických barviv roste poptávka po přírodních pigmentech pocházejících z mikrobiálních zdrojů.

Mikrobiální pigmenty nabízejí různé výhody a široké využití v medicíně, potravinářství, farmacii, textilním průmyslu i v kosmetice. V kosmetickém průmyslu mohou působit jako UV filtry, antioxidanty, hydratační nebo bělicí prostředky. Přírodní pigmenty jsou bezpečné, jejich výroba je relativně levná, navíc mají řadu v kosmetice velmi dobře využitelných vlastností. Je ale nezbytný další výzkum, a to především v oblasti syntézy a průmyslové produkce biopigmentů. Zajímavou výzvou je i nadále objevování nových pigmentů mikrobiálního původu. Svět mikroorganismů je rozmanitý a nepochybně skýtá celou řadu dalších slibných látek.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KIKI, Manal Jameel; WANG, Yinan; YI, Lanbo; LIU, Jin; YANG, Shufang et al., 2023. Biopigments of Microbial Origin and Their Application in the Cosmetic Industry: A review. Online. *Cosmetics*. Roč. 10, č. 2, s. 128-152. ISSN 2079-9284. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/cosmetics10020047>. [cit. 2024-05-12].
- [2] MALIK, Kamla; TOKKAS, Jayanti a GOYAL, Sneha, 2012. Microbial Pigments: A review. Online. *International Journal of Microbial Resource Technology*. Roč. 1, č. 4, s. 361-365. ISSN 2278 – 3822. Dostupné z: <http://ijmrt.inpressco.com>. [cit. 2024-02-14].
- [3] SUNDARARAJAN, Priya a RAMASAMY, Shanmuga Priya, 2024. Current perspectives on industrial application of microbial carotenoid as an alternative to synthetic pigments. Online. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. Roč. 37. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255412300387X?via%3Dihub>. [cit. 2024-04-14].
- [4] RATHER, Luqman Jameel; MIR, Shazia Shaheen; GANIE, Showkat Ali; SHAHID-UL-ISLAM, Xiangzhao a LI, Qing. Research progress, challenges, and perspectives in microbial pigment production for industrial applications - A review: A review. Online. *Dyes and Pigments*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 210, č. 24, s. 10307-10324. ISBN 9780120164516. ISSN 01437208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110989>. [cit. 2024-05-11].
- [5] MATA-GÓMEZ, Luis Carlos; MONTAÑEZ, Julio César; MÉNDEZ-ZAVALA, Alejandro a AGUILAR, Cristóbal Noé, 2014. Biotechnological production of carotenoids by yeasts: an overview. Online. *Microbial Cell Factories*. Roč. 13, č. 1. ISSN 1475-2859. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-12>. [cit. 2024-04-14].

- [6] FOONG, Lian Chee; LOH, Carmen Wai Leng; NG, Hui Suan a LAN, John Chi-Wei, 2021. Recent development in the production strategies of microbial carotenoids. Online. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. Roč. 37, č. 1. ISSN 0959-3993. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02967-3>. [cit. 2024-04-14].
- [7] MAPELLI-BRAHM, Paula; GÓMEZ-VILLEGAS, Patricia; GONDA, Mariana Lourdes; LEÓN-VAZ, Antonio; LEÓN, Rosa et al. Microalgae, Seaweeds and Aquatic Bacteria, Archaea, and Yeasts: Sources of Carotenoids with Potential Antioxidant and Anti-Inflammatory Health-Promoting Actions in the Sustainability Era. Online. *Marine Drugs*. 2023, roč. 21, č. 6. ISSN 1660-3397. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/md21060340>. [cit. 2024-05-09].
- [8] JALALI-JIVAN, Mehdi; ROSTAMABADI, Hadis; ASSADPOUR, Elham; TOMAS, Merve; CAPANOGLU, Esra et al., 2022. Recent progresses in the delivery of β -carotene: From nano/microencapsulation to bioaccessibility. Online. *Advances in Colloid and Interface Science*. Roč. 307. ISSN 00018686. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102750>. [cit. 2024-04-14].
- [9] KOT, Anna M.; BŁAŻEJAK, Stanisław; GIENKA, Iwona; KIELISZEK, Marek a BRYŚ, Joanna. Torulene and torularhodin: "new" fungal carotenoids for industry? Online. *Microbial Cell Factories*. 2018, roč. 17, č. 1. ISSN 1475-2859. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0893-z>. [cit. 2024-05-09].
- [10] ZOZ, Liliana; CARVALHO, Julio Cesar; SOCCOL, Vanete Thomaz; CASAGRANDE, Thais Costa a CARDOSO, Ligia. Torularhodin and Torulene: Bioproduction, Properties and Prospective Applications in Food and Cosmetics - a Review. Online. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2015, roč. 58, č. 2, s. 278-288. ISSN 1516-8913. Dostupné z: <https://doi.org/10.1590/S1516-8913201400152>. [cit. 2024-05-09].

- [11] RAO, A.V.; RAY, M.R. a RAO, L.G. Lycopene. Online. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2006, s. 99-164. ISBN 9780120164516. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(06\)51002-2](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(06)51002-2). [cit. 2024-05-11].
- [12] RAO, A.V.; AGARWAL, S. a RAO, L.G. Role of lycopene as antioxidant carotenoid in the prevention of chronic diseases: A review. Online. *Nutrition Research*. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2006, roč. 19, č. 2, s. 305-323. ISBN 9780120164516. ISSN 02715317. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(98\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(98)00193-6). [cit. 2024-05-11].
- [13] MARESCA, Julia A.; GRAHAM, Joel E.; WU, Martin; EISEN, Jonathan A. a BRYANT, Donald A. Identification of a fourth family of lycopene cyclases in photosynthetic bacteria: A review. Online. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2006, roč. 104, č. 28, s. 11784-11789. ISBN 9780120164516. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.0702984104>. [cit. 2024-05-11].
- [14] LI, Lei; LIU, Zhen; JIANG, Hong; MAO, Xiangzhao a BRYANT, Donald A. Biotechnological production of lycopene by microorganisms: A review. Online. *Applied Microbiology and Biotechnology*. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2006, roč. 104, č. 24, s. 10307-10324. ISBN 9780120164516. ISSN 0175-7598. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10967-4>. [cit. 2024-05-11].
- [15] DEBNATH, Taniya; BANDYOPADHYAY, Tarun Kanti; VANITHA, Kondi; BOBBY, Md. Nazneen; NATH TIWARI, Onkar et al., 2024. Astaxanthin from microalgae: A review on structure, biosynthesis, production strategies and application. Online. *Food Research International*. Roč. 176. ISSN 09639969. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113841>. [cit. 2024-04-14].
- [16] PARK, Seon Young; BINKLEY, Robert M.; KIM, Won Jun; LEE, Mun Hee a LEE, Sang Yup. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for high-level astaxanthin

production with high productivity. Online. *Metabolic Engineering*. 2018, roč. 49, s. 105-115. ISSN 10967176. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.08.002>. [cit. 2024-05-09].

[17] FU, Yunlei; WANG, Yinan; YI, Lanbo; LIU, Jin; YANG, Shufang et al., 2023. Lutein production from microalgae: A review. Online. *Bioresource Technology*. Roč. 376, č. 8, s. 128-152. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128875>. [cit. 2024-05-12].

[18] ESATBEYOGLU, Tuba; RIMBACH, Gerald; RAVI, Sarada a ASWATHANARAYANA, Ravishankar, 2017. Canthaxanthin: From molecule to function. Online. *Marine Drugs*. Roč. 61, č. 6, s. 128-152. ISSN 1613-4125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600469>. [cit. 2024-05-12].

[19] REBELO, Bárbara A.; FARRONA, Sara; VENTURA, M. Rita a ABRANCHES, Rita, 2020. Canthaxanthin, a Red-Hot Carotenoid: Applications, Synthesis, and Biosynthetic Evolution. Online. *Plants*. Roč. 9, č. 8, s. 128-152. ISSN 2223-7747. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/plants9081039>. [cit. 2024-05-12].

[20] KADRI, Mohammad Sibtain; SINGHANIA, Reeta Rani; ANISHA, Grace Sathyanesan; GOHIL, Nisarg; SINGH, Vijai et al., 2023. Microalgal lutein: Advancements in production, extraction, market potential, and applications. Online. *Bioresource Technology*. Roč. 389, č. 8, s. 128-152. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129808>. [cit. 2024-05-12].

[21] MITRA, Saikat; RAUF, Abdur; TAREQ, Abu Montakim; JAHAN, Shamima; EMRAN, Talha Bin et al., 2021. Potential health benefits of carotenoid lutein: An updated review. Online. *Food and Chemical Toxicology*. Roč. 154, č. 8, s. 128-152. ISSN 02786915. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112328>. [cit. 2024-05-12].

[22] LI, Cheng; SWOFFORD, Charles A. a SINSKEY, Anthony J., 2020. Modular engineering for microbial production of carotenoids. Online. *Metabolic*

Engineering Communications. Roč. 10. ISSN 22140301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mec.2019.e00118>. [cit. 2024-04-14].

[23] GUEDES, Ana Catarina; AMARO, Helena M. a MALCATA, Francisco Xavier. Microalgae as Sources of Carotenoids. Online. *Marine Drugs*. 2011, roč. 9, č. 4, s. 625-644. ISSN 1660-3397. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/md9040625>. [cit. 2024-05-09].

[24] SUN, Xiao-Man; REN, Lu-Jing; ZHAO, Quan-Yu; JI, Xiao-Jun a HUANG, He, 2018. Microalgae for the production of lipid and carotenoids: a review with focus on stress regulation and adaptation. Online. *Biotechnology for Biofuels*. Roč. 11, č. 1. ISSN 1754-6834. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1275-9>. [cit. 2024-04-14].

[25] TARANGINI, Korumilli a MISHRA, Susmita, 2014. Production of melanin by soil microbial isolate on fruit waste extract: two step optimization of key parameters. Online. *Biotechnology Reports*. Roč. 4, s. 139-146. ISSN 2215017X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.001>. [cit. 2024-04-14].

[26] RAM, Shristi; MITRA, Madhusree; SHAH, Freny; TIRKEY, Sushma Rani a MISHRA, Sandhya. Bacteria as an alternate biofactory for carotenoid production: A review of its applications, opportunities and challenges. Online. *Journal of Functional Foods*. 2020, roč. 67. ISSN 17564646. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103867>. [cit. 2024-05-09].

[27] TRAN-LY, Anh N.; REYES, Carolina; SCHWARZE, Francis W. M. R. a RIBERA, Javier, 2020. Microbial production of melanin and its various applications. Online. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. Roč. 36, č. 11. ISSN 0959-3993. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02941-z>. [cit. 2024-04-14].

[28] EL-NAGGAR, Noura El-Ahmady a EL-EWASY, Sara M., 2017. Bioproduction, characterization, anticancer and antioxidant activities of extracellular melanin

pigment produced by newly isolated microbial cell factories *Streptomyces glaucescens* NEAE-H. Online. *Scientific Reports*. 2017-03-13, roč. 7, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep42129>. [cit. 2024-04-14].

[29] LI, Wenjun; SU, Hai-Nan; PU, Yang; CHEN, Jun; LIU, Lu-Ning et al. Phycobiliproteins: Molecular structure, production, applications, and prospects. Online. *Biotechnology Advances*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 37, č. 2, s. 340-353. ISBN 9780120164516. ISSN 07349750. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.01.008>. [cit. 2024-05-11].

[30] DARSHAN, N.; MANONMANI, H. K.; AMARO, Helena M.; KIJJOA, Anake; VASCONCELOS, Vitor et al. Prodigiosin and its potential applications: Chemistry and biotechnological applications. Online. *Journal of Food Science and Technology*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 52, č. 9, s. 5393-5407. ISBN 9780120164516. ISSN 0022-1155. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1740-4>. [cit. 2024-05-11].

[31] YUMUSAK, Cigdem; PROCHAZKOVA, Anna Jancik; APAYDIN, Dogukan Hazar; SEELAJAROEN, Hathaichanok; SARICIFTCI, Niyazi Serdar et al., 2019. Indigoidine – Biosynthesized organic semiconductor: A review. Online. *Dyes and Pigments*. Roč. 171, č. 9, s. 5393-5407. ISSN 01437208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.107768>. [cit. 2024-05-12].

[32] PAGELS, Fernando; ALMEIDA, Cíntia; VASCONCELOS, Vitor; GUEDES, A. Catarina; SARICIFTCI, Niyazi Serdar et al. Cosmetic Potential of Pigments Extracts from the Marine Cyanobacterium *Cyanobium* sp: Chemistry and biotechnological applications. Online. *Marine Drugs*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 20, č. 8, s. 5393-5407. ISBN 9780120164516. ISSN 1660-3397. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/md20080481>. [cit. 2024-05-11].

[33] DING, Jinwang; WU, Baochuan; CHEN, Liqun; GUEDES, A. Catarina; SARICIFTCI, Niyazi Serdar et al. Application of Marine Microbial Natural Products

in Cosmetics: Chemistry and biotechnological applications. Online. *Frontiers in Microbiology*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 13, č. 8, s. 5393-5407. ISBN 9780120164516. ISSN 1664-302X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.892505>. [cit. 2024-05-11].

[34] CHENG, Shujun; PEI, Yanyang; ZENG, Yao; GUEDES, A. Catarina; SARICIFTCI, Niyazi Serdar et al. Cosmetic Ingredient: Metabolism and Mechanism. Online. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 6, č. 8, s. 74-82. ISBN 9780120164516. ISSN 2791-0210. Dostupné z: <https://doi.org/10.54097/hset.v6i.936>. [cit. 2024-05-11].

[35] SHARMA, Nitin; SHEKHAR, Pratyush; KUMAR, Vikas; KAUR, Harpreet; JAYASENA, Vijay et al. Microbial pigments: Sources, current status, future challenges in cosmetics and therapeutic applications. Online. *Journal of Basic Microbiology*. Advances in Food and Nutrition Research. 2006, roč. 64, č. 1, s. 4-21. ISBN 9780120164516. ISSN 0233-111X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jobm.202300214>. [cit. 2024-05-11].

[36] D'ORAZIO, John; JARRETT, Stuart; AMARO-ORTIZ, Alexandra a SCOTT, Timothy, 2013. UV Radiation and the Skin. Online. *International Journal of Molecular Sciences*. Roč. 14, č. 6, s. 12222-12248. ISSN 1422-0067. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms140612222>. [cit. 2024-05-12].

[37] WANG, Hui-Min David; CHEN, Ching-Chun; HUYNH, Pauline a CHANG, Jo-Shu, 2015. Exploring the potential of using algae in cosmetics. Online. *Bioresource Technology*. Roč. 184, č. 6, s. 355-362. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.001>. [cit. 2024-05-12].

[38] BRANDT, Fredric S.; CAZZANIGA, Alex; HANN, Michael a CHANG, Jo-Shu, 2011. Cosmeceuticals: Current Trends and Market Analysis. Online. *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery*. Roč. 30, č. 3, s. 141-143. ISSN 10855629. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.sder.2011.05.006>. [cit. 2024-05-12].

[39] NOVOVESKÁ, Lucie; ROSS, Michael E.; STANLEY, Michele S.; PRADELLES, Rémi; WASIOLEK, Virginie et al., 2019. Microalgal Carotenoids: A Review of Production, Current Markets, Regulations, and Future Direction. Online. *Marine Drugs*. Roč. 17, č. 11, s. 5393-5407. ISSN 1660-3397. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/md17110640>. [cit. 2024-05-12].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

APC	allofykocyanin
CTP	cytidintrifosfát
DHN	dihydroxynaftalen
DMAPP	dimethylallyldifosfát
FPP	farnesyl pyrofosfát
G3P	glyceraldehyd-3-fosfát
GGDP	geranylgeranyldifosfát
GPP	geranyldifosfát
HMG-CoA	3-hydroxy-3-methylglutaryl-CoA
IPP	isopentenylpyrofosfát
L-DOPA	L-3,4-dihydroxyfenylalanin
MEP	metyleritritolfosfát
MVA	mevalonát
PBP	fykobiliproteiny
PC	fykocyanin
PCB	fykokyanobilin
PE	fykoerytrin
PEB	fykoerythrobilin
PEC	fykoerytrocyanin
PUB	fykurobilin
PXB	fykoviolobilin
ROS	reaktivní formy kyslíku
SPF	faktor proti slunečnímu záření
UV	ultrafialové záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Chemická struktura β -karotenu [6]	12
Obrázek 2: Chemická struktura lykopenu [4].....	13
Obrázek 3: Chemická struktura astaxantinu [6]	13
Obrázek 4: Chemická struktura kataxantinu [5].....	14
Obrázek 5: Chemická struktura luteinu [6].....	15

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Využití pigmentů produkovaných mikroorganismy v kosmetickém průmyslu [35, upraveno]	21
--	----