

Možnosti využití dielektrické analýzy (DEA) pro hodnocení účinnosti složek kosmetických přípravků

Ing. Marcela Syrovátková

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Ing. Marcela Syrovátková
Osobní číslo:	T22568
Studijní program:	B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace:	Biomateriály a kosmetika
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Možnosti využití dielektrické analýzy (DEA) pro hodnocení účinnosti složek kosmetických přípravků

Zásady pro vypracování

Vypracujte literární rešerši na zadané téma.

Popište princip dielektrické analýzy (DEA), obecné možnosti jejího využití a vyhledejte v literatuře, zda se tato metoda využívá pro hodnocení prostupu látek do tkání živých organismů.

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

Seznam doporučené literatury:

- [1] STEINHAUS, Johannes et al. Curing kinetics of visible light curing dental resin composites investigated by dielectric analysis (DEA). *Dental Materials*. 2014, vol. 30, no. 3, s. 372-380. ISSN 0109-5641.
- [2] MÖGINGER, B. et al. *Curing behavior and reaction kinetics of binder resins for 3D-printing investigated by dielectric analysis (DEA)* [online]. . . A. DAMORE, D. ACIERNO a L. GRASSIAMELVILLE: Amer Inst Physics, 2016. ISBN 0094-243X.
- [3] VASSILIKOU-DOVA, Aglaia a Ioannis M. KALOGERAS. *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*. , 2008 Dielectric Analysis (DEA). . 497-613 s. ISBN 9780471769170;0471769177.
- [4] LAAKSONEN, T. J. a Y. H. ROOS. Water Sorption and Dielectric Relaxations of Wheat Dough (Containing Sucrose, NaCl, and their Mixtures). *Journal of Cereal Science*. 2003, vol. 37, no. 3, s. 319-326. ISSN 0733-5210.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martina Černeková, Ph.D.**
Ústav technologie tuků, tenzidů a kosmetiky

Datum zadání bakalářské práce: **17. února 2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Lucie Urbánková, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce zkoumá potenciál dielektrické analýzy (DEA) jako pokročilé neinvazivní metody pro hodnocení účinnosti složek kosmetických přípravků. S rostoucími požadavky na vysoce účinnou, bezpečnou a ekologicky udržitelnou kosmetiku vyžaduje průmysl inovativní přístupy k testování stability, penetrace a celkové kvality výrobků. DEA, která měří dielektrické vlastnosti, jako je permitivita a ztrátový faktor, nabízí citlivý způsob hodnocení molekulárních interakcí, obsahu vody a konzistenci složení.

Výzkum ukazuje, že DEA je zvláště účinná při hodnocení emulzí a krémů, protože umožňuje sledovat fyzikální stabilitu v reálném čase a odhalovat změny způsobené stresovými faktory prostředí, jako je teplota a vlhkost. Ukazuje se také jako užitečná při studiu pronikání účinných látek do kůže, což nabízí poznatky o biologické dostupnosti bez nutnosti testování na zvířatech. DEA lze integrovat s dalšími technikami, jako je iontoforéza nebo elektrochemické metody, a zvýšit tak přesnost studií interakce s kůží.

Zjištění této práce potvrzují, že DEA poskytuje spolehlivé údaje pro optimalizaci kosmetických přípravků, zlepšení odhadů trvanlivosti a zajištění souladu s normami bezpečnosti a udržitelnosti. Její schopnost posoudit dielektrické chování i strukturální integritu výrobků z ní činí cenný nástroj v kosmetické vědě a vývoji. Přizpůsobivost metody různým typům přípravků, včetně přípravků s přírodními nebo biologicky odbouratelnými složkami, dále podtrhuje její význam při navrhování moderních, ekologicky šetrných výrobků.

Závěrem lze říci, že dielektrická analýza nabízí kosmetickému odvětví významné výhody, neboť kombinuje přesnost, nedestruktivnost a univerzálnost. Tato práce podporuje její širší uplatnění ve výzkumu i v průmyslové praxi, kde může přispět k vytváření účinnějších, bezpečnějších a udržitelnějších kosmetických výrobků.

Klíčová slova: dielektrická analýza, kosmetika, stabilita produktu, penetrace kůže, kvalita složení

ABSTRACT

This bachelor thesis explores the potential of dielectric analysis (DEA) as an advanced non-invasive method for evaluating the efficacy of cosmetic ingredients. With increasing demands for highly effective, safe and environmentally sustainable cosmetics, the industry requires innovative approaches to testing stability, penetration and overall product quality. DEA, which measures dielectric properties such as permittivity and loss factor, offers a sensitive way to assess molecular interactions, water content and consistency of formulations.

Research shows that DEA is particularly effective in evaluating emulsions and creams, as it allows for real-time monitoring of physical stability and detecting changes caused by environmental stress factors such as temperature and humidity. It also proves useful in studying the penetration of active ingredients into the skin, offering insights into bioavailability without the need for animal testing. DEA can be integrated with other techniques such as iontophoresis or electrochemical methods to increase the accuracy of skin interaction studies.

The findings of this work confirm that DEA provides reliable data for optimizing cosmetic formulations, improving shelf life predictions, and ensuring compliance with safety and sustainability standards. Its ability to assess both dielectric behavior and structural integrity of products makes it a valuable tool in cosmetic science and development. The adaptability of the method to different types of formulations, including those with natural or biodegradable ingredients, further underlines its importance in the design of modern environmentally friendly products. In conclusion, dielectric analysis offers significant advantages to the cosmetic industry, as it combines accuracy, non-destructiveness, and versatility. This work supports its wider application in research and industrial practice, where it can contribute to the creation of more effective, safer, and more sustainable cosmetic products.

Keywords: dielectric analysis, cosmetics, product stability, skin penetration, formulation quality

Ráda bych vyjádřila své upřímné poděkování Ing. Martině Černekové, Ph.D., mé vedoucí bakalářské práce, za její neocenitelnou trpělivost, odborné vedení a cenné rady, které mi poskytovala během celého procesu vytváření této práce. Jsem nesmírně vděčná za její čas, energii a za ochotu vždy se podělit o své znalosti a zkušenosti. Stejně tak bych chtěla poděkovat i prof. Ing. Berenice Hausnerové, Ph.D. za její hluboké znalosti a podporu v rámci využití DEA i v oblasti kosmetiky.

OBSAH

ÚVOD	9
1 METODY POUŽÍVANÉ K TESTOVÁNÍ KOSMETICKÝCH PŘÍPRAVKŮ .	10
1.1 TESTOVÁNÍ V KOSMETICE.....	10
1.2 METODY POUŽÍVANÉ K TESTOVÁNÍ PENETRACE KOSMETICKÝCH PŘÍPRAVKŮ DO KŮŽE	12
1.2.1 Franzova difúzní cela	12
1.2.2 Stripování (Tape stripping)	14
1.2.3 Konfokální Ramanova spektroskopie	15
1.2.4 Iontoforéza a elektroporace	17
2 DIELEKTRICKÁ ANALÝZA.....	19
2.1 PRINCIP DIELEKTRICKÉ ANALÝZY	19
2.2 OBECNÉ VYUŽITÍ DEA	25
2.3 VYUŽITÍ DEA PŘI ANALÝZE ŽIVÝCH TKÁNÍ.....	26
3 APLIKACE DEA V KOSMETICE.....	29
3.1 ROLE DEA PŘI HODNOCENÍ KOSMETICKÝCH PRODUKTŮ	29
3.2 PŘÍKLADY REÁLNÉHO VYUŽITÍ DEA V KOSMETICE.....	30
3.2.1 Aplikace DEA ve studiích stability emulzí	30
3.2.2 Aplikace DEA ve studiích kosmetiky a její interakce s vodou	33
3.2.3 Kontrola bezpečnosti a kvality pomocí DEA.....	35
ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	44

ÚVOD

Kosmetické výrobky hrají v moderní společnosti zásadní roli nejen z hlediska zlepšení vzhledu, ale také z hlediska udržování a zlepšování stavu pokožky. S rostoucími očekáváními spotřebitelů nebyla potřeba účinných a bezpečných výrobků nikdy tak zásadní. Kosmetický průmysl proto čelí rostoucímu tlaku na zajištění toho, aby výrobky splňovaly přísné normy.

Oblast testování kosmetických přípravků se v průběhu let výrazně vyvinula. Tradiční metody, jako je testování *in vivo*, často narážely na etické problémy, což vedlo k vývoji alternativních přístupů. Testování *in vitro* v kombinaci s pokročilými analytickými technikami nyní tvoří základní kámen moderního kosmetického výzkumu. Techniky, jako jsou Franzova difuzní cela, stripovací páska a konfokální Ramanova spektroskopie, jsou široce využívány ke studiu penetrace kůží a interakce kosmetických složek s kožní bariérou. Tyto neinvazivní metody poskytují cenné poznatky o účinnosti účinných látek bez nutnosti testování na zvířatech (Barthe et al., 2021). Kosmetický průmysl jako takový učinil významný pokrok při sladování s etickými normami a zároveň zlepšil přesnost a reprodukovatelnost testovacích postupů.

Jednou z takových pokročilých metod je dielektrická analýza, která nachází stále větší uplatnění při hodnocení kosmetických výrobků. DEA měří elektrické vlastnosti materiálů, jako je permitivita a ztrátové faktory, v závislosti na teplotě, frekvenci a čase. Tato technika nabízí citlivý a přesný způsob studia molekulární dynamiky a interakcí v kosmetických přípravcích.

Cílem této práce je prozkoumat možnosti využití dielektrické analýzy v kosmetickém průmyslu se zvláštním zaměřením na její schopnost posoudit účinnost složek výrobku. V následujících částech bude uveden přehled metod používaných při testování kosmetických přípravků, po němž bude následovat podrobná diskuse o principech DEA, jejím využití v kosmetickém výzkumu a jejím potenciálu pro zlepšení vývoje výrobků. Dále budou uvedeny případové studie, které ilustrují reálné využití DEA při hodnocení kosmetických přípravků.

1 METODY POUŽÍVANÉ K TESTOVÁNÍ KOSMETICKÝCH PŘÍPRAVKŮ

1.1 Testování v kosmetice

Kosmetické testování zahrnuje široké spektrum metodologií určených k hodnocení bezpečnosti, účinnosti a stability produktu. Tyto techniky jsou zásadní pro zajištění toho, aby kosmetické výrobky splňovaly regulační normy a očekávání spotřebitelů. Tradiční metody se často spoléhají na testování in vivo. Rostoucí legislativní omezení však vedla k výraznému posunu směrem k alternativním přístupům, včetně in vitro a výpočetních metod. Tyto alternativy jsou nejen humánnější, ale také nabízejí větší přesnost a reprodukovatelnost pro hodnocení specifických parametrů, jako je penetrace kůží a stabilita produktu (Barthe et al., 2021).

Metody testování in vitro tvoří základ moderního kosmetického výzkumu. Metody in vitro simulují skutečné podmínky, aby poskytly náhled na absorpci a účinnost aktivních složek bez potřeby živých subjektů. Přijetí syntetických membrán a pokročilých analytických nástrojů zvýšilo přesnost těchto technik a sladilo se s regulačními trendy, které zdůrazňují testovací protokoly bez krutosti (Williams a Barry, 2004).

V kosmetickém testování hrají čím dál tím větší roli výpočtové modely a simulace. Tyto modely jsou zvláště užitečné pro screening nových sloučenin a optimalizaci formulací, což snižuje potřebu rozsáhlého fyzikálního testování. Ve spojení s algoritmy strojového učení se tyto nástroje stávají nepostradatelnými pro urychlení cyklů vývoje produktů a zajištění souladu s předpisy (Monteagudo Honrubia et al., 2023).

Kromě testování účinnosti zůstává základním kamenem vývoje kosmetických přípravků i analýza jejich stability. K tomuto účelu se používají metody jako termická analýza a reologie, přičemž obě metody slouží k hlubšímu studiu fyzikální a chemické stability kosmetických přípravků za různých podmínek. Tyto techniky pomáhají zajistit, aby si produkty zachovaly své zamýšlené vlastnosti po celou dobu své skladovatelnosti. Například testy tepelného cyklování mohou simulovat účinky kolísání teploty během přepravy a skladování, což poskytuje cenná data pro úpravu balení a složení (Steinhaus et al., 2014).

Posun směrem k udržitelné a ekologické kosmetice dále ovlivnil metodiky testování. Vědci stále častěji využívají ve formulacích přírodní přísady a biologicky odbouratelné materiály, což mimo jiné vyžaduje vývoj nových hodnotících protokolů. Techniky, jako je dielektrická spektroskopie, se ukázaly jako účinné při charakterizaci těchto inovativních materiálů a nabízejí pohled na jejich stabilitu a kompatibilitu se stávajícími formulacemi. Tento trend podtrhuje závazek průmyslu kombinovat udržitelnost s technologickým pokrokem (Raj et al., 2020).

Celkově se prostředí kosmetického testování rychle vyvíjí, což je dáno jednak pokrokem ve vědě a technologii, stejně jako měnícími se očekáváními spotřebitelů a regulačními požadavky. Integrace technik *in vitro*, výpočtových modelů a pokročilých analytických nástrojů nadále zvyšuje přesnost, efektivitu a etické standardy kosmetického výzkumu a připravuje cestu pro bezpečnější a inovativnější produkty (Barthe et al., 2021; Möglinger et al., 2016).

1.2 Metody používané k testování penetrace kosmetických přípravků do kůže

1.2.1 Franzova difúzní cela

Franzova difúzní cela je široce používaný přístroj ve farmaceutických a kosmetických vědách, který umožňuje studium prostupu a uvolňování léčiv přes biologické a syntetické membrány. Tento systém obsahuje donorovou komoru obsahující formuli a receptorovou komoru naplněnou vhodným médiem, oddělené membránou, která napodobuje bariérové vlastnosti kůže. Řízením proměnných, jako je teplota a míchání, mohou vědci replikovat fyziologické podmínky, díky čemuž je Franzova difúzní cela nepostradatelným nástrojem pro preklinická hodnocení (Salamanca et al., 2018).

Jeho aplikace pokrývá různé oblasti, zejména při hodnocení účinnosti topických a transdermálních přípravků. Například ketoprofen, běžně používané nesteroidní protizánětlivé léčivo, byl studován pomocí Franzovy difúzní cely k hodnocení jeho uvolňování z gelových a suspenzních přípravků. Výzkum ukázal, že gelové formulace vykazovaly vyšší rychlosti pronikání díky jejich solubilizačním schopnostem, což zdůrazňuje důležitost vehikula při určování profilů uvolňování léčiva (Salamanca et al., 2018).

Jednou z významných výhod Franzovy difúzní cely je její jednoduchost a hospodárnost. Na rozdíl od dynamických systémů, které vyžadují nepřetržité vzorkování a pokročilou automatizaci, umožňuje statická povaha tohoto zařízení přímou manipulaci při zachování vysoké reprodukovatelnosti. Studie ukázaly, že účinně měří tok v ustáleném stavu, dobu zpoždění a kumulativní permeaci, což poskytuje spolehlivá data pro screening formulací v raném stádiu (Bosman et al., 1998).

Výběr správné membrány je kritickým faktorem pro zajištění přesných a smysluplných výsledků. Syntetické membrány, jako jsou membrány Strat-M®, jsou často preferovány pro svou strukturální podobnost s lidskou kůží, přičemž zároveň nabízejí reprodukovatelné výsledky bez etických obav spojených s testováním na zvířatech. Ve srovnávacích studiích byly také použity membrány z regenerované celulózy, které prokázaly adekvátní výkon pro hodnocení difúze léčiv ve vodném prostředí (Salamanca et al., 2018).

Dalším důležitým aspektem experimentů s Franzovou difúzní celou je regulace teploty. Udržování konstantní teploty kolem 37 °C zajišťuje, že experimentální uspořádání přesně napodobuje podmínky lidské kůže. Výzkum ukázal, že změny teploty významně ovlivňují proces difúze, zejména změnou doby zpoždění a toku léčiva, což podtrhuje důležitost přesné kontroly během experimentů (Bosman et al., 1998).

Schopnost Franzovy difúzní cely udržovat podmínky propadu v receptorovém prostoru je zásadní pro zajištění konzistentní difúze léčiva. Podmínky propadu brání nasycení receptorového média, čímž umožňují dosažení ustálené difúze. Tato funkce je zvláště užitečná při studiu aktivních látek určených k postupnému nebo řízenému uvolňování, jelikož pomáhá předpovídat jejich účinnost po delší dobu (Williams a Barry, 2004).

V kosmetických vědách hraje Franzova difúzní cela klíčovou roli při hodnocení dermální absorpce účinných látek. Pomocí syntetických membrán nebo vyříznuté lidské kůže mohou vědci simulovat scénáře aplikací v reálném světě a posoudit bezpečnost a účinnost kosmetických produktů. Tyto studie jsou v souladu s regulačními rámci, které zdůrazňují metodologie testování bez zvířat pro zajištění bezpečnosti spotřebitelů (Barthe et al., 2021).

Navzdory svým výhodám není Franzova difúzní cela bez omezení. Nebere totiž v úvahu dynamické fyziologické podmínky, jako je průtok krve, které by mohly ovlivnit absorpci léčiva in vivo. Tyto nedostatky se snaží řešit automatizované dynamické systémy, které jsou navrženy tak, aby tyto nedostatky překlenuly. Integrují funkce, jako je kontinuální tok roztoku receptoru a vzorkování v reálném čase, čímž zvyšují přesnost a prediktivní schopnost experimentů in vitro (Bosman et al., 1998).

Další omezení spočívá ve využití membrán, které nemusí plně replikovat komplexní bariérové vlastnosti lidské kůže. Přestože membrány Strat-M® nabízejí bližší přiblížení, jejich lipidové složení a charakteristiky propustnosti se mohou lišit od přirozené pokožky, což může mít vliv na extrapolaci výsledků. Přesnost těchto studií zlepší pokroky v membránové technologii, jako je začlenění lipidových vrstev k napodobení stratum corneum (Williams a Barry, 2004).

Všestrannost Franzovy difúzní cely sahá i do její aplikace při studiu účinků zesilovačů penetrace. Tyto látky se používají ke zlepšení dodávání aktivních látek kůži změnou bariérových vlastností stratum corneum. Experimenty využívající tento systém ukázaly, že

zesilovače penetrace mohou významně zvýšit tok léčiva, čímž demonstrují svůj potenciál při optimalizaci transdermálních formulací (Williams a Barry, 2004).

Kromě farmaceutických aplikací je Franzova difúzní cela cenná při hodnocení bezpečnosti a účinnosti kosmetických produktů. Analýzou permeačních profilů aktivních složek mohou výrobci zajistit, že jejich formulace přinášejí požadované výhody a zároveň dodržují bezpečnostní normy. Tento přístup je zvláště důležitý v kontextu regulačních omezení testování na zvířatech, která si vyžádala přijetí alternativních metodologií, jako jsou modely *in vitro* a *ex vivo* (Barthe et al., 2021).

Studie také zkoumaly dopad proměnných formulace na uvolňování a permeaci léčiva. Například viskozita, pH a iontová síla formulace mohou ovlivnit její výkon v experimentu s Franzovou difúzní celou. Tyto parametry jsou pečlivě kontrolovány, aby byla zajištěna reprodukovatelnost a spolehlivost, které jsou rozhodující pro vývoj robustních formulací (Salamanca et al., 2018).

Celkově zůstává Franzova difúzní cela základním kamenem ve vývoji aktivních látek a v kosmetické vědě. Její schopnost poskytovat podrobné informace o pronikání léčiv a charakteristikách uvolňování z něj činí neocenitelný nástroj pro vědce a vývojáře produktů (Williams a Barry, 2004).

1.2.2 Stripování (Tape stripping)

Tape stripping je široce uznávanou neinvazivní metodou pro studium stratum corneum (SC) kůže, zejména v kontextu dermatologického a farmaceutického výzkumu. Tato metoda zahrnuje postupné odstraňování SC vrstev pomocí lepicích pásek, což umožňuje analýzu různých atributů, jako je penetrace aktivních látek, bariérová funkce a fyziologie kůže. Technika byla použita k posouzení distribuce a účinnosti topicky aplikovaných formulací, přičemž nabízí pohled na jejich penetraci a dermatofarmakokinetiku (Lademann et al., 2009).

Kritickou aplikací tape strippingu je vyhodnocení kvantifikace aktivních látek v kůži. To je nezbytné pro stanovení farmakokinetiky topických aktivních látek a jejich biologické dostupnosti. Univerzálnost metody umožňuje její použití při hodnocení penetračních profilů různých látek, včetně hydrofilních a lipofilních sloučenin. Metoda byla také integrována do dermatofarmakokinetických (DPK) přístupů pro hodnocení bioekvivalence, jak zdůraznili Escobar-Chávez et al. (2008).

Užitečnost tape strippingu se rozšiřuje na měření tloušťky zbývajícího SC, což je zásadní pro standardizaci experimentálních podmínek. Množství SC odstraněného během tape strippingu je ovlivněno několika vnitřními faktory (jako je anatomické místo, věk a sezónní změny) a vnějšími faktory, včetně adhezivních vlastností pásky a tlaku aplikovaného během procedury (Dong et al., 2020). Pro řešení variability je pro konzistentní výsledky zásadní standardizace metody spočívající v kontrole tlaku a typu použitého lepidla.

V kontextu kosmetické vědy se tape stripping využívá k hodnocení účinnosti a bezpečnosti kosmetických produktů. Slouží jako nástroj pro zkoumání homogenity distribuce produktu na kůži a také toho, jak kůže produkt vstřebává. Kromě toho může poskytnout údaje o zbytkovém množství produktů, jako jsou opalovací krémy, což je nezbytné pro ověření jejich ochranné účinnosti (Barthe et al., 2021).

I když tape stripping nabízí minimálně invazivní přístup ke studiu SC, není bez omezení. Variabilita v množství odstraněného SC může zkomplikovat srovnání napříč studiemi. Navíc, i když je tato technika účinná pro hodnocení SC, nedokáže adekvátně vyhodnotit hlubší vrstvy pokožky a kůže, což vyžaduje doplňkové metody pro komplexní analýzu (Escobar-Chávez et al., 2008).

Schopnost analyzovat specifické vrstvy SC prostřednictvím sekvenčního odstraňování poskytuje podrobné pochopení penetračních a retenčních profilů aktivních složek. Díky této přesnosti je tape stripping neocenitelný jak ve výzkumu, tak v regulačním prostředí, zejména s rostoucím důrazem na metodologii testování kosmetiky a léčiv bez zvířat. Takové aplikace zdůrazňují pokračující potřebu zdokonalování a standardizace této metody, aby byla zajištěna reprodukovatelnost a spolehlivost napříč studiemi (Barthe et al., 2021).

1.2.3 Konfokální Ramanova spektroskopie

Konfokální Ramanova spektroskopie (CRS) se ukázala jako sofistikovaný, neinvazivní analytický nástroj s různými možnostmi aplikace v dermatologickém výzkumu, zejména pro studium biochemického složení kůže a bariérových funkcí. CRS využívá neelastický rozptyl světla, kde dopadající fotony interagují s molekulárními vibracemi v kůži a vytvářejí spektra jedinečná pro specifické molekulární struktury. Tato technika je výhodná, jelikož nabízí chemicky specifický pohled na distribuci sloučenin v kůži, aniž by vyžadovala invazivní postupy (Lunter et al., 2022). CRS prokázala užitečnost při hodnocení kožních stavů, jako je citlivá kůže a atopická dermatitida, což umožňuje vědcům identifikovat molekulární

variací ve stratum corneum (SC), jako jsou změny v organizaci lipidů a proteinů (Richters et al., 2017). Kromě toho CRS podporuje neinvazivní měření penetrace topického produktu, což z něj činí cennou alternativu ke konvenčním technikám, jako je tape stripping (Bielfeldt et al., 2022).

Při výzkumu kůže poskytuje CRS podrobné molekulární profily zachycením vibračních spekter, které korelují s chemickými vazbami a molekulárními strukturami. To umožňuje analýzu organizace lipidů, obsahu proteinů a úrovní hydratace, které jsou důležité pro udržení kožní bariéry. CRS byl například použit k posouzení pořadí laterálního balení mezibuněčných lipidů, což odhaluje, jak mohou lokální látky, jako jsou oleje získané z rostlin, ovlivnit propustnost a hydrataci SC (Choe et al., 2017). Schopnost CRS analyzovat látky až do hloubky 100 mikrometrů v pokožce zlepšuje jeho použití při studiu povrchových i hlubších vrstev, což jej činí neocenitelným pro dermatologickou diagnostiku a studie kosmetické účinnosti (Darvin et al., 2017).

Elektroporace, technika, která využívá elektrické impulsy k vytvoření přechodných pórů v buněčných membránách, doplňuje CRS tím, že usnadňuje lepší pronikání aktivních složek do pokožky. Tato metoda je zvláště účinná pro transdermální podávání léčiv, protože dočasně narušuje lipidovou dvojvrstvu SC, což umožňuje makromolekulám a hydrofilním látkám obejít primární bariérovou funkci kůže. Spojení elektroporace s CRS může nabídnout synergické výhody umožňující monitorování molekulární penetrace a distribuce po elektroporativních ošetřeních v reálném čase (Lunter et al., 2022). Kombinace těchto metod by například mohla ověřit účinnost nových formulací při dodávání terapeutických činidel nebo posoudit jejich dopad na fyziologii kůže.

Integrace CRS a elektroporace je zvláště důležitá v kosmetickém a farmaceutickém vývoji, kde regulační požadavky kladou důraz na neinvazivní, přesné a reprodukovatelné metody hodnocení. CRS nejen pomáhá při vizualizaci prostorové distribuce sloučenin dodávaných elektroporací, ale také poskytuje kvantitativní pohled na molekulární interakce a strukturální změny vyvolané tímto procesem (Barthe et al., 2021). Tyto poznatky jsou zásadní pro optimalizaci formulací, zvýšení účinnosti produktu a zajištění bezpečnosti spotřebitelů.

Kromě toho pokroky v technologii CRS, včetně začlenění algoritmů strojového učení pro spektrální analýzu, dláždí cestu pro přesnější a automatizované hodnocení stavu pokožky a účinků produktu. To je zvláště významné s ohledem na etické a regulační posuny směrem

k testování bez použití zvířat v kosmetice a dermatologii. CRS a elektroporace se totiž společně shodují s těmito moderními standardy tím, že poskytují spolehlivé a humánní alternativy pro hodnocení výsledků souvisejících s pokožkou (Mone et al., 2014).

Pokračující vývoj CRS a jeho integrace s technikami jako elektroporace je příslibem pro rozšíření našeho chápání biologie kůže a zlepšení terapeutických a kosmetických aplikací. Využitím neinvazivní povahy CRS a schopností elektroporace zlepšující propustnost mohou vědci prozkoumat nové hranice v personalizované péči o pleť a transdermálních systémech podávání aktivních látek. To zajistí účinnost i bezpečnost v klinických a komerčních kontextech.

1.2.4 Iontoforéza a elektroporace

Iontoforéza je široce studovaná metoda transdermálního podávání aktivních látek zahrnující aplikaci elektrického proudu ke zvýšení pohybu nabitých nebo neutrálních molekul kůže. Tento proces využívá principu, že se podobné náboje odpuzují, čímž se usnadňuje transport léčiv přes kůži. Tato technologie se ukázala jako slibná při dodávání hydrofilních a makromolekulárních aktivních látek, které nemohou proniknout přes kožní bariéru pasivní difúzí. Jeden z jeho klíčových mechanismů, elektroosmóza, doplňuje elektromigraci nabitých aktivních látek pohybem neutrálních molekul kůže spolu s proudem vody (Bakshi et al., 2020).

Tato technika se opírá o nízké intenzity proudu, typicky pod $0,5 \text{ mA/cm}^2$, aby byla zajištěna bezpečnost při dosažení lepšího pronikání léčiva. Použitím elektrod se stejnou polaritou jako molekuly léčiva je iontoforéza poháněna přes stratum corneum, což je primární bariéra pro transdermální podávání léčiva. Role stratum corneum je kritická, protože je hustě naplněna keratinizovanými buňkami v lipidové matici, což představuje významnou bariéru pro hydrofilní molekuly. Iontoforéza tedy poskytuje prostředek k překonání tohoto omezení, takže je zvláště užitečná pro aktivní látky s vysokou molekulovou hmotností, jako jsou peptidy (Wang et al., 2005).

Iontoforetický transport ovlivňuje několik faktorů včetně proudové hustoty, fyzikálně-chemických vlastností léčiva a iontového složení formulace. Úprava těchto parametrů umožňuje kontrolu nad rychlostí a rozsahem podávání léčiva. Například zvýšení proudové hustoty zvyšuje tok léčiva, zatímco použití vhodných hydrogelových formulací pomáhá

udržovat vodné prostředí, které podporuje tok proudu a stabilizuje léčivo (Bakshi et al., 2020).

Praktické aplikace iontoforézy přesahují pouhé dodávání aktivních látek. Byla dále zkoumána pro neinvazivní monitorování a diagnostické účely (například monitorování glukózy), a to za pomoci reverzní iontoforézy. V tomto procesu jsou molekuly extrahovány z těla elektrickým proudem, což nabízí metodu pro monitorování zdraví v reálném čase (Schoellhammer et al., 2014).

Elektroporace, další technika fyzikálního vylepšení, zahrnuje aplikaci krátkých, vysokonapěťových elektrických pulzů k dočasnému rozrušení lipidových dvojvrstev stratum corneum, čímž se vytvoří vodné cesty pro molekuly léčiva. Tato metoda se zásadně liší od iontoforézy v tom, že fyzicky mění strukturu kůže, na rozdíl od spoléhání se na elektrické odpuzování nebo elektroosmózu. Vytvořením přechodných pórů usnadňuje elektroporace vstup makromolekul a hydrofilních sloučenin, které jsou jinak nepropustné (Prausnitz et al., 2004).

Mezi iontoforézou a elektroporací byla prozkoumána synergie, aby se dále zlepšila transdermální aplikace. Kombinace využívá výhody obou technik: iontoforéza zajišťuje nepřetržité dodávání léčiva poháněné proudem, zatímco elektroporace zvyšuje propustnost kůže narušením její struktury. Tento duální přístup ukázal potenciál při dodávání velkých molekul, jako jsou proteiny a nukleové kyseliny, jejichž podávání tradičními metodami je náročné (Wang et al., 2005).

Navzdory těmto pokrokům stále čelí iontoforéza i elektroporace některým výzvám, včetně variability individuálních vlastností pokožky a potenciálního podráždění kůže způsobeného dlouhodobou nebo nadměrnou elektrickou stimulací. Výzkum pokračuje v optimalizaci těchto technologií, aby bylo možné vyvážit jejich účinnost, bezpečnost a pohodlí. (Schoellhammer et al., 2014).

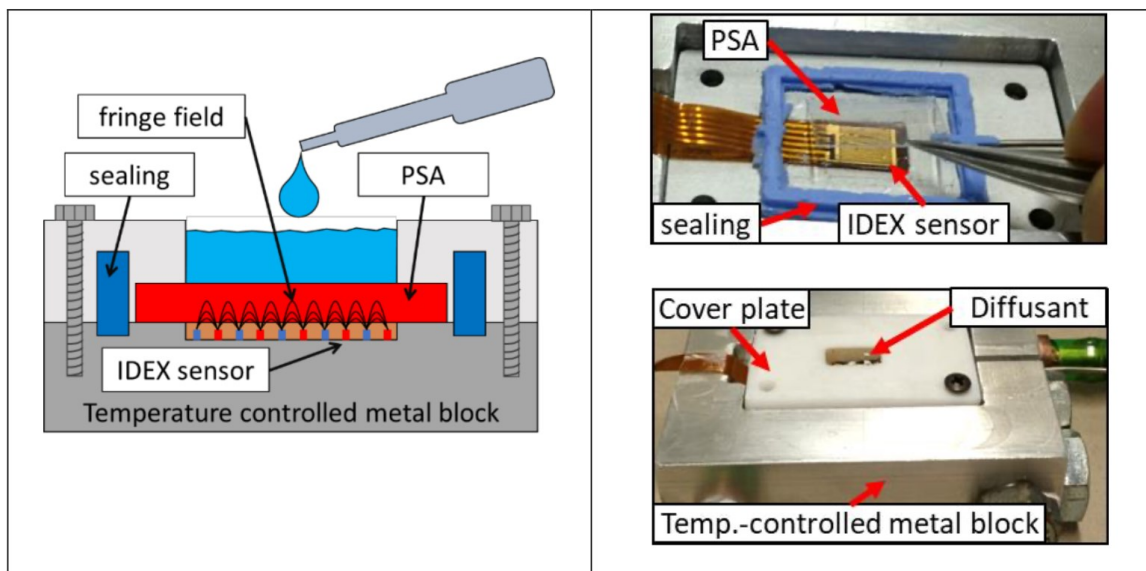
Iontoforéza a elektroporace představují transformativní přístupy k transdermální aplikaci aktivních látek. Řeší omezení přirozené kožní bariéry a umožňují dodávání širšího spektra terapeutických činidel při zachování neinvazivního způsobu podávání. Tyto techniky se neustále zdokonalují díky pokrokům ve vědě o materiálech a biomedicinském inženýrství, a mají značný potenciál pro inovace a v konečném důsledku zlepšení péče o pacienty v široké škále lékařských a kosmetických aplikacích (Schoellhammer et al., 2014).

2 DIELEKTRICKÁ ANALÝZA

2.1 Princip dielektrické analýzy

Dielektrická analýza (DEA) slouží jako robustní analytická technika pro zkoumání dielektrických vlastností materiálů za různých podmínek. Je široce používána v různých oblastech díky své citlivosti a všestrannosti při studiu vlastností molekulárních a objemových materiálů. Základní princip DEA zahrnuje měření odezvy materiálu na aplikované střídavé elektrické pole, které poskytuje pohled na molekulární dynamiku, elektrickou vodivost a fázové přechody. Její klíčová aplikace je v oblasti polymerů, kde DEA vyhodnocuje procesy vytvrzování a fázové chování, a nabízí kritická data pro optimalizaci průmyslových procesů a vlastností materiálů (Vassilikou-Dova a Kalogeras, 2009).

Na Obrázku 1 je znázorněno schéma uspořádání senzoru a měřící aparatury využívané při DEA analýze. Tento model umožňuje přesnou detekci změn iontové viskozity ve vzorku v průběhu difuze. Díky své schopnosti měřit dynamiku polymerů a molekulární interakce umožňuje DEA hodnotit stabilitu, pronikání i dielektrické vlastnosti produktů s vysokou přesností (Meurer et al., 2025).



Obrázek 1 – (Meurer et al., 2025)

Proces měření dielektrické analýzy zahrnuje několik kritických fází: přípravu vzorku, nastavení měření, sběr dat a analýzu dat. Tyto kroky společně umožňují komplexní hodnocení formulací, jako jsou krémy, gely a emulze, které se vyznačují dynamickými molekulárními interakcemi.

Efektivní příprava vzorku je základem spolehlivé dielektrické analýzy. Vybrané vzorky musí být reprezentativní pro zkoumané kosmetické přípravky, od emulzí voda v oleji (V/O) a olej ve vodě (O/V) až po hydratační gely a krémy. Například emulze často vyžadují speciální manipulaci, aby se zabránilo oddělení fází během analýzy. To je zvláště důležité, protože jejich dielektrické vlastnosti jsou vysoce citlivé na strukturální stabilitu a interakce složek (Popescu et al., 2014). Podobně gely a krémy na vodní bázi jsou ideálními kandidáty pro DEA kvůli jejich vysokému obsahu vody, který přímo ovlivňuje molekulární mobilitu a dielektrické chování (Itolika et al., 2024).

Rovnoměrnost velikosti a tloušťky vzorku je rozhodující pro dosažení přesných měření. Typicky se vzorky připravují v tenkých vrstvách, obvykle o tloušťce mezi 0,5 a 1 mm, aby byla zajištěna konzistentní interakce s elektrickým polem. K udržení jednotnosti vzorku se používají přesné nástroje, jako jsou formy nebo frézy. Jakmile jsou vzorky připraveny, musí být kondicionovány, aby se stabilizovaly jejich vlastnosti. Například přípravky na bázi vody jsou skladovány v uzavřených nádobách, aby se zabránilo absorpci vlhkosti nebo odpařování, protože kolísání obsahu vody může významně ovlivnit výsledky (Thakor et al., 2021). Kromě toho se vzorky před analýzou kondicionují na pokojovou teplotu – obvykle 25 °C – aby se zajistily konzistentní tepelné podmínky, zejména v materiálech obsahujících těkavé složky (Meurer et al., 2025). Prevence kontaminace je stejně důležitá, protože i stopová množství prachu nebo zbytků mohou rušit dielektrické vlastnosti. Přísné protokoly čistoty zajišťují čistotu vzorků, zejména v citlivých formulacích, jako jsou produkty proti stárnutí nebo hydratační produkty (Zhang et al., 2022).

Jakmile jsou vzorky připraveny, následuje nastavení dielektrického měření, které při transformaci fyzikálních vlastností na kvantifikovatelná data hraje klíčovou roli. Jádrem tohoto nastavení je dielektrický analyzátor, přístroj určený k měření dielektrické konstanty (ϵ') a dielektrické ztráty (ϵ''). Tyto parametry odhalují schopnost materiálu ukládat a odvádět elektrickou energii. Moderní dielektrické analyzátory pracují v širokém frekvenčním rozsahu, typicky od 1 kHz do 10 MHz, což umožňuje výzkumníkům zachytit široké spektrum molekulárních jevů, od iontového vedení po relaxaci dipólu (Itolika et al., 2024).

Vysokofrekvenční měření jsou zvláště užitečná při studiu polárních materiálů, jako je kosmetika bohatá na vodu, kde hraje významnou roli molekulární reorientace (Meurer et al., 2025). Pokročilé analyzátory také poskytují vysoké rozlišení, což umožňuje detekci jemných změn v dielektrických vlastnostech, které mohou vzniknout z interakcí složek nebo strukturálních posunů.

Senzory tvoří kritické rozhraní mezi vzorkem a analyzátorem. V závislosti na povaze vzorku se používají různé typy senzorů. Interdigitální elektrodové senzory jsou ideální pro tenkovrstvé vzorky, protože přesně měří rozložení elektrického pole po povrchu (Thakor et al., 2021). Pro objemnější vzorky, jako jsou hutné krémy nebo tělová másla, jsou preferovány paralelní deskové kondenzátory, které poskytují stejnoměrná elektrická pole a zajišťují přesná měření objemových vlastností (Itolikar et al., 2024). Regulace teploty je dalším základním prvkem nastavení, protože dielektrické vlastnosti jsou vysoce citlivé na tepelné změny. Většina kosmetických přípravků je analyzována při teplotě 25 °C, což odráží typické podmínky použití. Využívá se nicméně i analýzy při zvýšené teplotě, někdy až 100 °C, a to k posouzení tepelné stability nebo interakcí složek při stresu (Popescu et al., 2014). Nezbytným předpokladem pro zajištění přesnosti je kalibrace, která zahrnuje použití standardních materiálů se známými dielektrickými vlastnostmi k ověření zařízení před zahájením měření (Thakor et al., 2021).

Sběr dat označuje fázi, kdy dielektrický analyzátor zaznamenává elektrické chování vzorku. Dielektrická konstanta, jeden z primárních měřených parametrů, odráží schopnost materiálu ukládat elektrickou energii. Tato vlastnost je silně ovlivněna molekulární polarizací a obsahem vody, což z ní činí cennou metriku pro pochopení hydratačního potenciálu a kompatibility přísad kosmetických přípravků (Thakor et al., 2021; Itolikar et al., 2024). Kromě dielektrické konstanty analyzátor měří dielektrické ztráty, které kvantifikují ztrátu energie jako teplo. Vysoké hodnoty dielektrických ztrát jsou často pozorovány v emulzích a gelech, což ukazuje na významnou molekulární aktivitu nebo iontovou mobilitu, které jsou pro posouzení výkonnosti produktu kritické (Meurer et al., 2025).

Dalším klíčovým parametrem je iontová vodivost, která odhaluje mobilitu nabitých látek ve vzorku. To je zvláště důležité pro formulace obsahující iontové složky, jako jsou soli nebo iontové emulgátory, kde by vysoká vodivost mohla signalizovat nekompatibilitu přísad nebo potenciální problémy se stabilitou (Zhang et al., 2022). Chování vzorku závislé na frekvenci poskytuje další pohled na jeho molekulární dynamiku. Při nižších frekvencích

dominuje iontové vedení, zatímco při vyšších frekvencích se stává výraznější dipolární relaxace. Tato frekvenčně závislá analýza je nápomocná při identifikaci toho, jak polární a nepolární složky interagují v rámci formulace (Itolikar et al., 2024).

Časově závislá měření nabízejí další vrstvu informací a umožňují výzkumníkům sledovat změny dielektrických vlastností v průběhu času. Například postupné snižování dielektrické konstanty emulze V/O může naznačovat migraci vody, což signalizuje potenciální nestabilitu (Popescu et al., 2014). Takové časové poznatky jsou neocenitelné pro předpovídání trvanlivosti přípravku a pochopení dynamiky interakcí složek.

Poslední fáze, analýza dat, zahrnuje interpretaci získaných měření za účelem získání smysluplných závěrů. Analýza frekvenční odezvy je klíčovou technikou, která zahrnuje vynesení závislosti dielektrické konstanty a dielektrické ztráty na frekvenci. Vrcholy na křivce dielektrických ztrát odpovídají molekulárním relaxačním procesům, jako je reorientace polárních molekul pod střídavým elektrickým polem (Itolikar et al., 2024; Thakor et al., 2021). Zároveň lineární trend v nízkofrekvenční oblasti naznačuje dominanci iontové vodivosti, což poskytuje vodítko o mobilitě a kompatibilitě složek.

Analýza závislá na teplotě zkoumá, jak se dielektrické vlastnosti vyvíjejí s měnícími se teplotami. Ostré přechody dielektrické konstanty nebo ztráty často indikují fázové změny, jako je tání nebo krystalizace, zatímco postupné změny naznačují tepelnou stabilitu. Tento přístup je kritický pro hodnocení robustnosti kosmetických přípravků za podmínek skladování a použití (Popescu et al., 2014). Cole-Cole diagramy jsou dalším cenným analytickým nástrojem, který vykresluje dielektrické ztráty proti dielektrické konstantě pro vizualizaci relaxačních mechanismů. Symetrické oblouky v těchto grafech ukazují jednotné relaxační procesy, zatímco asymetrické nebo překrývající se oblouky naznačují více relaxačních chování, typické pro komplexní emulze s různými interakcemi složek (Thakor et al., 2021; Zhang et al., 2022).

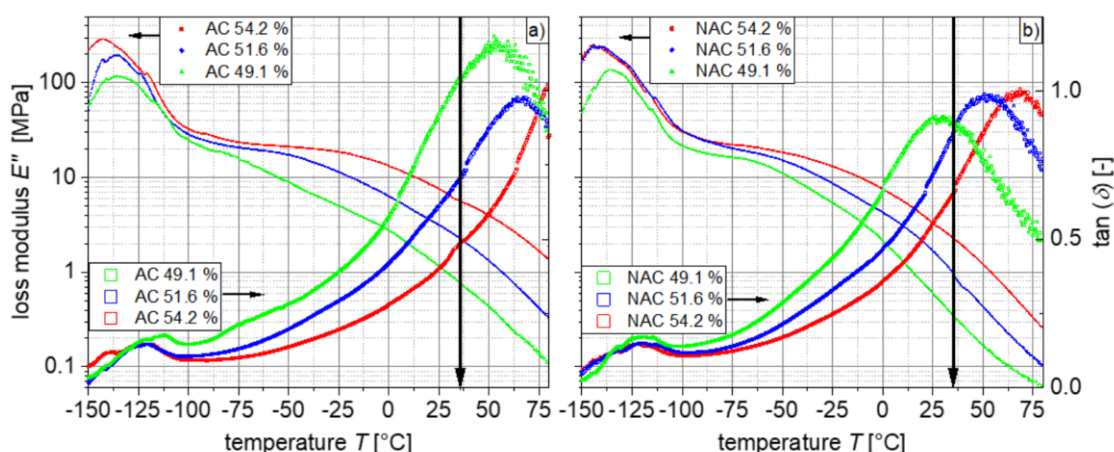
Kvantitativní metriky, jako je relaxační čas a aktivační energie, dále zvyšují porozumění molekulárnímu chování. Relaxační doba odráží rychlost, s jakou se molekulární dipóly znovu vyrovnají s elektrickým polem, zatímco aktivační energie kvantifikuje energii potřebnou pro tuto reorientaci. Tyto metriky poskytují hlubší pochopení molekulární dynamiky ve formulaci a řídí optimalizaci kombinací složek (Meurer et al., 2025).

Poznatky získané od DEA jsou přímo použitelné pro kosmetickou vědu a vývoj formulací. Vysoké hodnoty dielektrické konstanty například indikují významný obsah vody, který je nezbytný pro produkty zaměřené na hydrataci a obnovu kožní bariéry. Analýzy závislé na frekvenci mohou odhalit kompatibilitu emulgátorů s jinými složkami, což umožňuje cílené úpravy pro zlepšení stability a výkonu (Zhang et al., 2022). Časově závislá měření mohou pomoci předpovídat životnost a identifikovat potenciální problémy se stabilitou během vývojové fáze, což umožňuje výrobcům řešit problémy proaktivně (Popescu et al., 2014).

Dielektrická analýza (DEA) je neocenitelná v kosmetickém výzkumu pro studium klíčových parametrů, které určují stabilitu, výkon a kvalitu formulací. Tyto parametry, včetně dielektrické konstanty, ztrátového faktoru a vodivosti, poskytují pohled na molekulární dynamiku, interakce složek a celkovou strukturální integritu kosmetiky. Využitím DEA mohou vědci optimalizovat kosmetické formulace tak, aby splňovaly požadavky spotřebitelů na funkčnost a trvanlivost (Thakor et al., 2021).

Dielektrická konstanta je základní parametr měřený v DEA, který odráží schopnost materiálu ukládat elektrickou energii v elektrickém poli. V kosmetických přípravcích poskytuje kritické informace o polaritě a molekulárních interakcích v emulzích, gelech a krémech. Například Thakor et al. (2021) prokázali, že dielektrická konstanta by mohla účinně rozlišovat mezi stabilními a nestabilními nanoepoxidovými kompozity, což je přímo použitelné pro kosmetiku obsahující nanoplniva.

Dielektrickou konstantu dále ovlivňují teplota a složení. Meurer et al. (2025) pozorovali, že dielektrická konstanta lepidel pro transdermální náplasti na bázi silikonu klesala s rostoucí teplotou, což ukazuje na změny v molekulární pohyblivosti a volném objemu. Obrázek 2 níže znázorňuje vliv teploty na absorpční vlastnosti kosmetických formulací, což je klíčové pro hodnocení jejich stability. Taková zjištění jsou zásadní pro navrhování lepidel, která spolehlivě fungují za různých podmínek prostředí, jako jsou transdermální náplasti nebo kosmetické aplikace.



Obrázek 2 – (Meurer et al., 2025)

Ztrátový faktor, další kritický parametr DEA, měří energii rozptýlenou jako teplo v materiálu, když je vystaven elektrickému poli. Poskytuje pohled na procesy vnitřního tření a molekulární relaxace, ke kterým dochází v kosmetických přípravcích. Vysoký ztrátový faktor často indikuje zvýšenou molekulární mobilitu nebo strukturální nestabilitu, což může ohrozit účinnost produktu (Thakor et al., 2021).

Ztrátový faktor je také cenným ukazatelem účinnosti lepidla. Meurer et al. (2025) zdůraznili, že lepidla s nižšími ztrátovými faktory vykazovala sníženou difúzi vody a lepší mechanickou stabilitu. Tyto vlastnosti jsou klíčové pro aplikace, kde si lepidla musí zachovat svou funkčnost ve vlhkých nebo proměnlivých podmínkách, jako jsou voděodolné kosmetické přípravky nebo transdermální náplasti.

Vodivost, tedy míra schopnosti materiálu vést elektrický proud, úzce souvisí s iontovou mobilitou v rámci formulace. DEA poskytuje přesnou metodu pro hodnocení vodivosti a nabízí pohled na distribuci a mobilitu nabitých částic v kosmetických produktech. Vysoká vodivost často koreluje se zvýšenou iontovou mobilitou, která může ovlivnit chování a účinnost aktivních složek (Thakor et al., 2021).

Vodivost také hraje roli při hodnocení účinnosti konzervačních látek. Sledováním změn v iontové mobilitě může DEA detekovat mikrobiální aktivitu a degradaci konzervačních látek, což zajišťuje, že produkty zůstanou bezpečné a účinné po celou dobu jejich skladovatelnosti. Tato aplikace je zvláště relevantní pro přírodní konzervační látky, které mohou vykazovat variabilitu ve výkonu za různých podmínek (Meurer et al., 2025).

U lepidel používaných v kosmetických aplikacích poskytují vodivost a ztrátový faktor cenné informace o jejich účinku v reálných podmínkách. Meurer et al. (2025) prokázali, že přizpůsobením těchto parametrů by mohly být adhezivní systémy optimalizovány pro specifické aplikace, jako je voděodolný make-up nebo transdermální podávání aktivních látek. Tato schopnost podtrhuje všestrannost DEA při řešení různých problémů s formulací.

Kromě toho DEA podporuje vývoj inovativních kosmetických produktů tím, že umožňuje přesnou charakterizaci interakcí aktivních složek. Například Thakor et al. (2021) zdůraznili, jak dielektrické vlastnosti nanoplniv ovlivňují celkové chování formulace. Po pochopení těchto interakcí mohou vědci navrhnout produkty, které maximalizují účinnost a stabilitu aktivních složek, jako jsou činidla proti stárnutí nebo UV filtry.

2.2 Obecné využití DEA

Dielektrická analýza (DEA) hraje klíčovou roli ve vědě o materiálech tím, že umožňuje přesná měření odezvy materiálu na střídavé elektrické pole, čímž odhaluje pohledy na molekulární dynamiku, elektrické vlastnosti a strukturální chování. Citlivost a přizpůsobivost této techniky ji činí neocenitelnou pro studium různých materiálů, od polymerů po keramiku a pokročilé kompozity. DEA slouží jako kritický nástroj při charakterizaci molekulárních relaxací, fázových přechodů a elektrické vodivosti, které jsou zásadní pro pochopení a optimalizaci materiálových vlastností pro technologické aplikace (Vassilikou-Dova a Kalogeras, 2009).

Jednou z primárních rolí DEA v materiálové vědě je její aplikace při studiu polymerů a polymerních kompozitů. DEA poskytuje podrobné informace o molekulární mobilitě a fázovém chování, včetně skelného přechodu, krystalizace a procesů tání. Tyto informace jsou nezbytné pro přizpůsobení materiálů pro konkrétní průmyslové použití. Například při výrobě pokročilých polymerních systémů se DEA používá k monitorování kinetiky vytvrzování a optimalizaci podmínek zpracování, čímž je zajištěna stabilita materiálu a výkon při provozní zátěži. Studie prokázaly účinnost DEA při monitorování polymerace v reálném čase, což nabízí jasnou výhodu v odvětvích, jako je 3D tisk a letecký průmysl, kde je přesnost a integrita materiálu kritická (Möginger et al., 2016).

V oblasti keramiky se DEA široce používá ke zkoumání dielektrických vlastností, jako je permitivita a dielektrické ztráty, což jsou klíčové parametry pro aplikace v elektronice a telekomunikacích. Analýzou těchto vlastností mohou vědci vyvinout materiály se

zlepšenými schopnostmi akumulace energie a tepelnou stabilitou. Například feroelektrická a piezoelektrická keramika byly optimalizovány pro použití v kondenzátorech a senzorech, kde jsou využity jejich jedinečné elektrické a mechanické vazebné vlastnosti. Schopnost DEA detekovat jemné změny v molekulární orientaci a polarizaci pod elektrickými poli poskytuje možnost hlubšího pochopení funkčnosti těchto materiálů (Patri, 2009).

Kromě toho DEA významně přispívá ke studiu kompozitních materiálů, včetně těch vyztužených vlákny nebo nanočásticemi. Tyto kompozity jsou navrženy tak, aby vykazovaly vynikající mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti, které lze doladit přesným řízením jejich dielektrických charakteristik. DEA usnadňuje tuto optimalizaci měřením parametrů, jako je frekvenčně závislá dielektrická konstanta a relaxační časy, čímž pomáhá předpovídat a zlepšovat výkon kompozitů v reálných aplikacích, včetně automobilového průmyslu a sektoru obnovitelné energie (Kremer a Schönhals, 2003).

Úloha DEA přesahuje strukturální materiály k funkčním materiálům, jako jsou tekuté krystaly a vodivé polymery. DEA poskytuje vhled do jejich molekulární dynamiky, což umožňuje vývoj pokročilých zobrazovacích technologií, senzorů a systémů pro ukládání energie. Například u displejů z tekutých krystalů pomáhá DEA pochopit dielektrickou anizotropii, která řídí spínací chování těchto materiálů, což je zásadní pro optimalizaci rozlišení displeje a energetické účinnosti (Lvovich, 2012).

DEA široce používána v potravinářské vědě pro hodnocení dielektrických vlastností potravinářských materiálů za různých podmínek. Tato aplikace zahrnuje monitorování obsahu vody, což je klíčové pro zachování kvality a trvanlivosti. Studie na pšeničném těstě prokázaly schopnost DEA detekovat změny v sorpci vody a relaxačních jevech, což poskytuje kritický pohled na texturu a stabilitu potravin (Laaksonen a Roos, 2003). Podobně byly analyzovány zemědělské produkty, jako jsou obilí a semena, na obsah vlhkosti a vlastnosti dielektrického ohřevu, což odhalilo potenciál DEA pro zvýšení zemědělské produktivity a bezpečnosti potravin (Nelson, 2008).

2.3 Využití DEA při analýze živých tkání

Dielektrická analýza se stala důležitým nástrojem pro pochopení elektrických vlastností živých tkání a jejich fyziologických stavů. Nabízí neinvazivní, časově nenáročnou a citlivou metodu pro hodnocení strukturálních a biochemických změn v tkáních, přičemž její využití v diagnostice, monitorování terapie a hodnocení životaschopnosti stále roste. Základem

dielektrické analýzy je měření permitivity a vodivosti tkání v širokém spektru frekvencí. Tyto parametry odrážejí schopnost tkání uchovávat a rozptylovat elektrickou energii a jsou ovlivněny buněčným složením, integritou membrán a obsahem vody.

Dielektrické vlastnosti úzce souvisejí s mikroskopickou strukturou tkání, včetně buněčných membrán, organel a intra- a extracelulárních tekutin. Při frekvencích pod 10 kHz (α -disperze) dominuje dielektrickému chování iontová migrace, která odráží pohyb iontů a polarizaci membrán. Mezi 10 kHz a 100 MHz (β -disperze) hraje významnou roli interfaciální polarizace na buněčné membráně. Při vyšších frekvencích (γ -disperze) se hlavním přispěvatelem k dielektrické odezvě stává orientace molekul vody (Sasaki et al., 2022). Toto frekvenčně závislé chování umožňuje výzkumníkům zkoumat různé biologické jevy výběrem vhodného frekvenčního rozsahu.

Rozsáhlý přehled od Sasakiho et al. (2022) ukazuje, že dielektrické vlastnosti jsou zásadní pro elektromagnetické modelování lidského těla. Tyto vlastnosti ovlivňují chování tkání v elektromagnetickém poli a představují klíčové parametry při návrhu biomedicínských zařízení. Důležitým aspektem je využití rozdílů v dielektrických vlastnostech mezi zdravou a nemocnou tkání v lékařském zobrazování, jako je mikrovlnné zobrazování nebo elektrická impedanční tomografie. Rozdíly v dielektrických vlastnostech často souvisejí s variacemi v obsahu vody, koncentraci iontů a integritě membrán.

Zásadní přínos přinesla práce Schwana (1985), který podal hluboký vhled do mechanismů stojících za dielektrickým chováním biologických materiálů. Popsal složitou interakci mezi relaxačními jevy Maxwell-Wagnerova typu a přítomností buněčných membrán, organel a makromolekul. Jeho studie ukázaly, že biologické tkáně vykazují odlišné relaxační procesy – každý je přiřítatelný jiným strukturálním složkám. Například dielektrické chování erytrocytů na rádiových frekvencích lze vysvětlit jednou relaxační časovou konstantou, zatímco svalová tkáň vykazovala složitější odezvy v důsledku překrývajících se disperzních jevů.

Schwan (1985) rovněž poznamenal, že dielektrické efekty lze využít k manipulaci s biologickými buňkami. Nízká intenzita elektrického pole stačila k vyvolání zarovnání, pohybu nebo dokonce fúzi buněk díky jejich velkým dipólovým momentům. Tato zjištění potvrzují nejen diagnostický, ale také terapeutický potenciál dielektrických interakcí, například při cíleném podávání léčiv nebo elektrofúzi v biotechnologiích.

Jednou z hlavních výhod dielektrické analýzy u živých tkání je schopnost monitorovat fyziologické změny v reálném čase. Tradiční metody hodnocení životaschopnosti tkání, jako je histologie nebo biochemické testy, jsou časově náročné a často destruktivní. Naproti tomu dielektrická analýza umožňuje kontinuální, nedestruktivní sledování. Navíc díky citlivosti dielektrických vlastností jak na strukturální integritu, tak na metabolickou aktivitu, poskytuje komplexní pohled na zdraví tkáně.

Přesto existují určité výzvy. Dielektrická měření u tkání jsou ovlivňována mnoha faktory, včetně teploty, geometrie měření a polarizace elektrod. Složitost složení tkání – zejména u heterogenních nebo anizotropních tkání, jako jsou svaly nebo mozek – vyžaduje pečlivou kalibraci a modelování. K řešení těchto problémů byly vyvinuty různé měřicí techniky, včetně koaxiálních sond, čtyřelektrodových metod a časově doménové spektroskopie. Každá má své výhody a omezení v závislosti na požadovaném frekvenčním rozsahu a rozlišení (Sasaki et al., 2022).

3 APLIKACE DEA V KOSMETICE

3.1 Role DEA při hodnocení kosmetických produktů

V kosmetice vyvstává význam DEA z její schopnosti měřit dielektrické vlastnosti emulzí, krémů a pleťových vod, což poskytuje pohled na jejich molekulární chování, stabilitu a výkon. DEA se zaměřuje na parametry, jako je dielektrická konstanta, vodivost a ztrátový faktor, které jsou klíčové pro stanovení interakcí mezi složkami ve formulaci (Meurer et al., 2025).

Jednou z významných aplikací DEA v kosmetice je její použití při sledování stability emulzí. Mnoho kosmetických produktů, jako jsou krémy a pleťové vody, jsou emulze, které vyžadují jemnou rovnováhu mezi olejovou a vodnou fází, aby byla zachována jejich funkčnost a trvanlivost. DEA pomáhá vyhodnotit tyto rovnováhy studiem molekulárních interakcí v emulzi, zejména mobility nabitých částic a dipólů (Popescu et al., 2014). Například emulze „polyoil-in oil“, známé svou vysokou stabilitou, mohou být účinně charakterizovány pomocí DEA, aby byla zajištěna homogenita a odolnost vůči separaci fází (Shen et al., 2022).

Kromě toho hraje DEA klíčovou roli při studiu změn viskozity za různých podmínek skladování, což pomáhá při vývoji formulací, které si zachovávají svou konzistenci v průběhu času. Studie například ukázaly, že dielektrické vlastnosti lepidel na bázi pryskyřic používaných v kosmetických aplikacích lze monitorovat za účelem vyhodnocení jejich výkonu za různých podmínek prostředí, jako je vlhkost a teplota (Meurer et al., 2025). Tyto poznatky umožňují výrobcům upravit složení tak, aby zlepšili odolnost produktu a splnili tak očekávání spotřebitelů.

DEA může účinně hodnotit difúzi molekul vody v adhezivních systémech, což pomáhá výrobcům porozumět tomu, jak jejich produkty fungují při aplikaci na lidskou pokožku (Meurer et al., 2025). Vysoká citlivost DEA na změny v pohyblivosti iontů a obsahu pryskyřice zajišťuje přesná měření, což z ní dělá nepostradatelný nástroj pro zajištění kvality kosmetiky.

DEA je zvláště užitečná při analýze interakce aktivních složek v kosmetice. Například mnoho produktů proti stárnutí spoléhá na bioaktivní sloučeniny, jako jsou flavonoidy, polyfenoly a peptidy. Tyto sloučeniny interagují s dalšími složkami formulace a ovlivňují jejich stabilitu a účinnost. Měřením změn dielektrických vlastností může DEA poskytnout

pohled na to, jak se tyto aktivní složky chovají v reálných podmínkách, jako je vystavení světlu a měnící se hladiny pH (Popescu et al., 2014). Tyto informace podporují optimalizaci formulací pro maximalizaci přínosů těchto složek.

Kosmetika podléhá přísným bezpečnostním a kvalitativním standardům, zejména pokud jde o přítomnost těžkých kovů a mikrobiální kontaminaci. DEA se používá k detekci stop nebezpečných kovů, jako je olovo a rtuť, ve formulacích, což poskytuje rychlé a spolehlivé posouzení souladu se zdravotními a bezpečnostními předpisy (Popescu et al., 2014). Pro mikrobiální bezpečnost může DEA posoudit změny dielektrických vlastností způsobené bakteriální nebo plísňovou aktivitou a zajistit, aby produkty zůstaly bezpečné po celou dobu jejich skladovatelnosti.

Nedávné studie prokázaly potenciál DEA vyhodnotit parfemační alergeny, které jsou významným problémem v moderní kosmetice. Pomocí pokročilých technik, jako je hmotnostní spektrometrie s ionizací dielektrickým bariérovým výbojem (DBDI), umožňuje DEA identifikaci alergenních sloučenin ve stopových hladinách. Tato schopnost je zásadní pro produkty, jako jsou například parfémy a pleťové vody, které dle studie vyžadují přesné složení, aby se zabránilo nežádoucím reakcím (Liu a Zenobi, 2021). Integrace DEA v tomto kontextu zdůrazňuje její rostoucí význam jak v oblasti inovací, tak v zajišťování bezpečnosti v kosmetice.

Jak se průmysl posouvá směrem k ekologickým formulacím, DEA poskytuje prostředky pro hodnocení biologicky odbouratelných emulgátorů a konzervačních látek. Studium dielektrického chování těchto složek mohou výrobci vyvinout formulace, které jsou účinné a zároveň šetrné k životnímu prostředí (Shen et al., 2022). To je v souladu s poptávkou spotřebitelů po udržitelných produktech při zachování vysokého účinku.

3.2 Příklady reálného využití DEA v kosmetice

3.2.1 Aplikace DEA ve studiích stability emulzí

Jednou z klíčových aplikací DEA v kosmetických emulzích je hodnocení dlouhodobé stability. Mnoho kosmetických přípravků, zejména těch, které jsou založeny na emulzích V/O, čelí problémům při zachování své struktury a účinnosti po delší dobu skladování. DEA umožňuje studium mezifázového napětí a dynamiky kapiček, které jsou rozhodující pro zabránění separaci fází a koalescenci (Popescu et al., 2014).

Další kritickou výhodou je schopnost DEA detekovat jemné změny stability emulze za různých podmínek prostředí. Kosmetické emulze často zažívají kolísání teploty, vystavení světlu a fyzickému pohybu během přepravy a skladování. DEA umožňuje vědcům simulovat tyto podmínky a studovat jejich vliv na dielektrické vlastnosti emulzí. Například studie Popescu et al. (2014) zdůrazňuje použití DEA k hodnocení teplotně indukovaných fázových změn v emulzích, přičemž identifikuje formulace, které si zachovávají svou stabilitu v širokém teplotním rozsahu.

DEA také pomáhá pochopit interakce mezi emulgátory a dalšími složkami v kosmetických přípravcích. Emulgátory hrají klíčovou roli při stabilizaci olejové a vodní fáze a jejich účinnost závisí na jejich schopnosti vytvářet silné mezifázové filmy. DEA poskytuje pohled na to, jak emulgátory interagují s polárními a nepolárními molekulami, a pomáhá formulátorům vybrat nejvhodnější emulgátory pro jejich produkty.

Kromě stability se DEA používá ke studiu viskozity emulzí, což je kritický faktor při určování jejich senzorických vlastností a aplikačního výkonu. Kosmetické výrobky musí najít rovnováhu mezi snadnou aplikací a zachováním jejich strukturální integrity během používání. DEA umožňuje vědcům sledovat změny viskozity v průběhu času a za různých podmínek a poskytuje data pro optimalizaci textury. Například Popescu et al. (2014) prokázali, jak lze měření DEA použít k zajištění toho, že si kosmetické krémy udrží požadovanou viskozitu a roztíratelnost po celou dobu své trvanlivosti.

DEA se používá i pro emulze, které obsahují funkční složky, jako jsou antioxidanty, činidla proti stárnutí a UV filtry. Tyto složky mohou ovlivnit dielektrické vlastnosti emulze a ovlivnit její stabilitu. DEA umožňuje vědcům studovat tyto interakce a upravovat formulace pro zlepšení kompatibility a výkonu.

Příspěvek DEA k hodnocení stability také podporuje cíle udržitelnosti kosmetického průmyslu. Vzhledem k tomu, že poptávka po ekologických formulacích roste, poskytuje DEA spolehlivou metodu pro hodnocení účinnosti přírodních a biologicky odbouratelných emulgátorů. Studium jejich dielektrického chování mohou vědci vyvinout formulace, které jsou jak ekologicky odpovědné, tak vysoce stabilní (Popescu et al., 2014). To je v souladu s preferencemi spotřebitelů pro udržitelné produkty, aniž by došlo ke snížení kvality.

Studie od Vlad et al. (2023) využívá kombinaci reologie a dielektrické spektroskopie k analýze stability emulzí vystavených různým podmínkám stárnutí. Reologická

charakterizace se provádí pomocí rotačního reometru ke stanovení viskozity a viskoelastických parametrů, zatímco DEA se provádí pomocí širokopásmového dielektrického spektrometru ke sledování změn dielektrické permitivity a vodivosti (Vlad et al., 2023). Vzorky jsou podrobeny řízenému tepelnému a mechanickému stárnutí, které simuluje reálné podmínky a urychluje destabilizační jevy. Korelací dielektrických parametrů s reologickými vlastnostmi se studie snaží vytvořit prediktivní model pro hodnocení stability emulze.

Výsledky ukazují silný vztah mezi dielektrickými vlastnostmi a reologickým chováním, přičemž byly pozorovány významné změny permitivity a vodivosti v závislosti na stárnutí emulzí. Zejména se posouvají doby dielektrické relaxace v důsledku strukturního rozpadu, koalescence a separace fází, což se shoduje s poklesem viskozity měřeným reometrií (Vlad et al., 2023). Studie zdůrazňuje, že DEA je vysoce citlivá na destabilizační procesy v raných fázích, které není snadné odhalit tradičními reologickými metodami. Tato citlivost je zvláště užitečná při sledování emulzí obsahujících polární a nepolární složky, protože DEA dokáže rozlišit mezi molekulárními interakcemi a makroskopickou nestabilitou.

Zjištění dále zdůrazňují úlohu iontové pohyblivosti v dielektrické odezvě emulzí. S postupujícím stárnutím se mění iontová vodivost v důsledku uvolňování povrchově aktivních látek a elektrolytů z disperzní fáze, což poskytuje další ukazatel nestability (Vlad et al., 2023). Studie naznačuje, že DEA nabízí komplexnější pochopení chování emulze než samotná reologie, zejména při odhalování jemných fyzikálně-chemických přeměn, které předcházejí viditelnému oddělení fází.

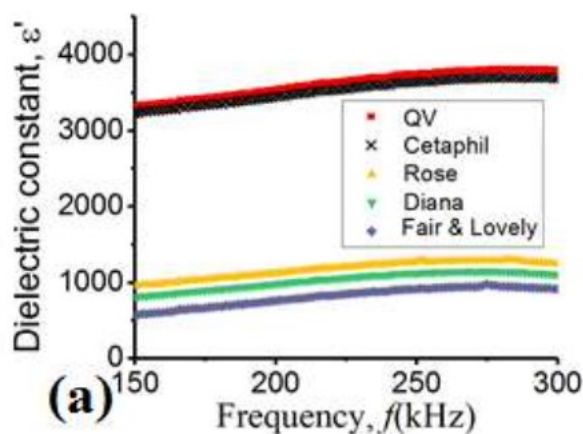
Studie přispívá k rostoucímu počtu výzkumů neinvazivních analytických technik v reálném čase pro hodnocení kosmetických přípravků. Stanovením spolehlivé korelace mezi DEA a reologickými parametry výzkum podporuje začlenění dielektrické spektroskopie do rutinní kontroly kvality a testování stability v kosmetickém průmyslu (Vlad et al., 2023). Schopnost metody včas odhalit strukturální změny umožňuje proaktivně upravit složení, snížit riziko nestability a zlepšit trvanlivost výrobku.

Jedním z významných důsledků této studie je možnost, že DEA doplní nebo dokonce nahradí některé tradiční metody testování stability, jako je centrifugace a testy zrychleného stárnutí, které jsou často časově náročné a nemusí plně zachytit interakce na molekulární úrovni.

Schopnost DEA poskytnout rychlý pohled na dynamiku emulze v reálném čase ji činí zvláště výhodnou pro vysoce výkonný vývoj formulací a průmyslové aplikace (Vlad et al., 2023).

3.2.2 Aplikace DEA ve studiích kosmetiky a její interakce s vodou

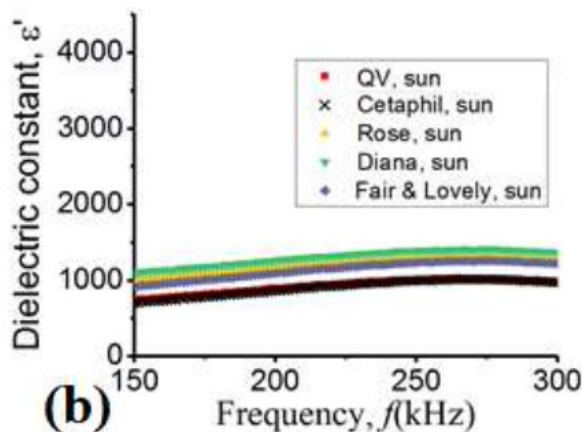
Studie Saada a kol. (2020) zkoumá dielektrické vlastnosti různých kosmetických krémů se zaměřením na jejich interakce s vodou, která simuluje lidskou kožní tkáň. Dielektrická konstanta pěti vybraných krémů - QV, Cetaphil, Fair & Lovely, Diana a Rose byla měřena za různých podmínek, včetně vystavení slunečnímu záření a rentgenovému záření. Autoři použili sestavu, v níž byly vzorky krémů kombinovány s destilovanou vodou, aby se napodobilo dielektrické chování kůže. Výsledky ukázaly, že krémy jako QV a Cetaphil vykazovaly nejvyšší dielektrické konstanty, přibližně 3500, ve srovnání s ostatními krémy, které měly dielektrické konstanty přibližně 1000 (Obrázek 3 níže). To naznačuje, že krémy QV a Cetaphil mohou mít silnější iontové interakce s kožní tkání, což může mít vliv na jejich účinnost a míru absorpce (Saad et al., 2020).



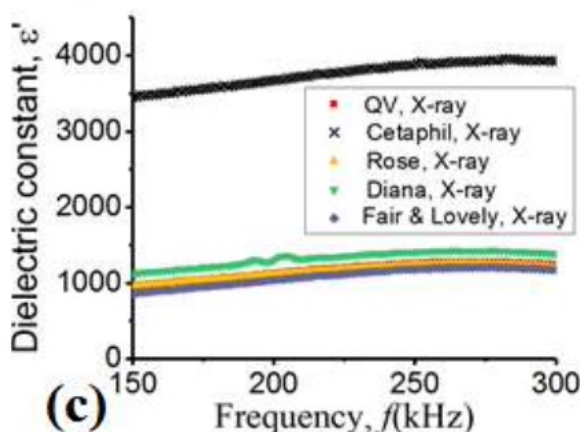
Obrázek 3 - (Saad et al., 2020)

Aby autoři posoudili vliv faktorů prostředí na dielektrické vlastnosti krémů, vystavili krémy slunečnímu záření a rentgenovému záření. Po třech hodinách vystavení slunečnímu záření se dielektrická konstanta všech krémů včetně krémů Cetaphil a QV výrazně snížila, a to přibližně z 3500 na 1000, což svědčí o snížení iontových interakcí mezi krémem a pokožkou (Obrázek 4 níže). Po vystavení rentgenovému záření se dielektrická konstanta krému Cetaphil zvýšila na 4000, zatímco u ostatních krémů došlo k mírnému zvýšení na 1200 (Obrázek 5 níže). To naznačuje, že vystavení záření mohlo změnit iontové reakce mezi

krémy a pokožkou, což může ovlivnit jejich funkčnost, zejména pokud jde o absorpci a hydrataci pokožky (Saad et al., 2020).



Obrázek 4 - (Saad et al., 2020)



Obrázek 5 - (Saad et al., 2020)

Experimentální uspořádání zahrnovalo rozdělení vzorků krému do tří skupin. Jedna skupina byla vystavena rentgenovému záření o dávce 35 Kv po dobu tří minut, druhá byla vystavena přímému slunečnímu záření po dobu tří hodin (od 7 do 10 hodin dopoledne) a třetí byla zakryta černou látkou, která simulovala účinek clony. Tyto expozice byly navrženy tak, aby simulovaly reálné podmínky, za kterých by se tyto krémy mohly používat. Výsledky ukázaly, že sluneční světlo i expozice rentgenovému záření významně ovlivnily dielektrické konstanty krémů, přičemž nejvýznamnější výkyvy při různých faktorech byly pozorovány u krému Cetaphil (Saad et al., 2020).

Výsledky studie naznačují, že dielektrické vlastnosti kosmetických krémů mohou být významně změněny faktory prostředí, což může mít vliv na jejich působení na pokožku. Dielektrická konstanta slouží jako ukazatel schopnosti krému interagovat s kožní tkání, což ovlivňuje procesy přenosu a absorpce iontů. Tyto výsledky mají zásadní význam pro pochopení základních mechanismů, jak mohou krémy interagovat s pokožkou, zejména pokud jsou vystaveny slunečnímu záření nebo jiným stresovým faktorům prostředí. Studie zdůrazňuje potenciál dielektrické analýzy jako nástroje pro hodnocení účinnosti a bezpečnosti kosmetických výrobků a zdůrazňuje důležitost zohlednění dopadů na životní prostředí při formulaci a používání těchto výrobků (Saad et al., 2020).

3.2.3 Kontrola bezpečnosti a kvality pomocí DEA

Zajištění bezpečnosti a kvality je prvořadé při vývoji kosmetických přípravků, kde se dielektrická analýza (DEA) ukázala jako spolehlivý nástroj pro hodnocení fyzikálních, chemických a mikrobiologických parametrů. Schopnost DEA monitorovat dielektrické vlastnosti, jako je vodivost, ztrátový faktor a permitivita, umožňuje výrobcům efektivně posuzovat bezpečnost a kvalitu kosmetických přípravků (Popescu et al., 2014). Tato hodnocení pomáhají splnit regulační normy a očekávání spotřebitelů ohledně vysoce kvalitních a bezpečných kosmetických produktů.

Jedním z kritických aspektů kontroly bezpečnosti v kosmetice je detekce nebezpečných těžkých kovů, jako je olovo (Pb) a rtuť (Hg), které mohou představovat významná zdravotní rizika i ve stopových množstvích. K identifikaci těchto kontaminantů bylo použito DEA měřením změn dielektrických vlastností ovlivněných kovovými ionty. Například Popescu et al. (2014) prokázali možnost použití DEA k detekci a kvantifikaci stop těžkých kovů v kosmetických přípravcích, čímž potvrdili nepřítomnost škodlivých hladin Pb a Hg v plet'ových krémech a mlékách. Tato aplikace nejen zajišťuje shodu s přísnými bezpečnostními předpisy, ale také ujistňuje spotřebitele o bezpečnosti výrobků.

Těžké kovy jsou zvláště znepokojivé v dekorativní kosmetice, kde mohou pigmenty vnášet kontaminanty. Vysoká citlivost DEA k iontovým látkám umožňuje efektivně identifikovat tyto kontaminanty a poskytuje rychlou a nedestruktivní alternativu k tradičním analytickým metodám. Integrací DEA do protokolů kontroly kvality mohou výrobci udržovat konzistentní bezpečnostní standardy napříč výrobními šaržemi, čímž se snižuje riziko, že se kontaminované produkty dostanou na trh (Popescu et al., 2014).

Kosmetické výrobky jsou náchylné k mikrobiální kontaminaci, která může ohrozit jejich bezpečnost a účinnost. DEA poskytuje nový přístup k detekci mikrobiální aktivity analýzou změn dielektrických vlastností způsobených mikrobiálním růstem. Tato technika umožňuje monitorování kontaminace v reálném čase během výroby a skladování a zajišťuje, že produkty zůstanou bezpečné pro spotřebitelské použití (Shen et al., 2022).

Popescu et al. (2014) zkoumali aplikaci DEA při hodnocení mikrobiální bezpečnosti v kosmetických přípravcích. Sledováním dielektrických parametrů by mohli v testovaných vzorcích detekovat nepřítomnost běžných patogenů, včetně *Staphylococcus aureus* a *Escherichia coli*. Toto zjištění demonstruje potenciál DEA jako rychlého screeningového nástroje pro mikrobiologickou kontrolu kvality, který snižuje závislost na časově náročných tradičních metodách, jako je kultivace.

DEA je také cenná při hodnocení účinnosti konzervačních látek, které hrají zásadní roli v prevenci mikrobiálního růstu v kosmetice. Studium interakce mezi konzervačními látkami a dalšími složkami formulace pomáhá DEA optimalizovat koncentrace konzervačních látek, aby vyvážila účinnost a bezpečnost pro spotřebitele (Shen et al., 2022). To zajišťuje, že produkty zůstanou stabilní a bezpečné po celou dobu jejich skladovatelnosti, a to i za různých podmínek skladování.

Účinné látky v kosmetice, jako jsou antioxidanty, peptidy a UV filtry, často určují účinnost produktu. Jejich stabilita však může být ohrožena faktory, jako je pH, teplota a vystavení světlu. DEA nabízí spolehlivou metodu pro sledování těchto změn, která zajišťuje, že si účinné látky v průběhu času udrží své zamýšlené vlastnosti (Popescu et al., 2014).

Aplikace DEA se rozšiřuje i na opalovací přípravky, kde UV filtry musí zůstat stabilní, aby poskytovaly adekvátní ochranu. Analýzou dielektrických změn může DEA detekovat degradaci těchto filtrů při dlouhodobé expozici UV záření, což vede k výběru stabilizátorů a obalových materiálů ke zvýšení trvanlivosti produktu (Popescu et al., 2014). To zajišťuje, že výrobky na ochranu proti slunečnímu záření splňují regulační požadavky a poskytují spotřebitelům slibované výhody.

Vůně jsou běžným zdrojem alergenů v kosmetice, a vyžadují tedy přísné testování, aby se předešlo nežádoucím reakcím. DEA, zejména prostřednictvím ionizace dielektrickým bariérovým výbojem (DBDI), poskytuje citlivou metodu pro detekci alergenních sloučenin ve stopových hladinách. Liu a Zenobi (2021) prokázali účinnost DBDI-DEA při analýze

vonných alergenů v parfémtech, čímž dosáhli rychlé a přesné detekce sloučenin, jako je benzylnbenzoát a limonen. Tato schopnost je zásadní pro zajištění souladu s předpisy, které nařizují označování alergenních složek.

Aplikace DEA při analýze vůně přesahuje detekci a zahrnuje kontrolu kvality. Monitorováním stability vonných látek za různých podmínek skladování pomáhá DEA udržovat požadovaný profil vůně a zajišťuje spokojenost spotřebitelů. Tato dvojí role DEA při detekci alergenu a zajištění kvality podtrhuje jeho všestrannost v řízení bezpečnosti kosmetiky (Liu a Zenobi, 2021).

Díky DEA je navíc možné zvyšovat důvěru spotřebitelů, jelikož její využití umožňuje výrobcům poskytovat objektivní údaje o bezpečnosti a účinnosti produktů. Transparentním řešením problémů souvisejících s kontaminanty, mikrobiální bezpečností a stabilitou účinných látek pomáhá DEA budovat důvěru v kosmetické značky. To je zvláště cenné v době, kdy informovaní spotřebitelé požadují od výrobců větší odpovědnost.

ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že dielektrická analýza (DEA) představuje cenný a všestranný nástroj pro rozvoj kosmetických věd, zejména v oblasti hodnocení účinnosti, stability a penetrace kosmetických přípravků do pokožky. Vzhledem k tomu, že požadavky spotřebitelů na vysoce kvalitní, účinné a bezpečné výrobky stále rostou, je potřeba pokročilých testovacích metod, které mohou poskytovat přesné, neinvazivní a reprodukovatelné výsledky, stále důležitější. DEA nabízí oproti tradičním testovacím metodám několik výhod, zejména díky své schopnosti studovat dielektrické vlastnosti materiálů, což umožňuje nahlédnout do molekulární dynamiky a interakcí v kosmetických přípravcích. Tato schopnost má zásadní význam pro zajištění toho, aby výrobky nejen splňovaly regulační normy, ale také očekávání spotřebitelů ohledně účinnosti a bezpečnosti.

S tím, jak průmysl stále více přijímá etické protokoly testování, se DEA stává účinnou technikou pro hodnocení různých aspektů kosmetických přípravků, včetně jejich stability, textury a účinnosti. Možnost sledovat a analyzovat dielektrické vlastnosti kosmetických přípravků v průběhu času poskytuje jedinečný pohled na jejich molekulární chování a stabilitu. Díky této schopnosti studovat formulace, aniž by se změnila jejich celistvost, je DEA zvláště přínosná při testování dlouhodobé stability a optimalizaci výrobků.

Jak bylo zdůrazněno v předchozích částech této práce, DEA lze použít k hodnocení účinnosti široké škály kosmetických přípravků, včetně emulzí, krémů, gelů a sér. Její použití je zvláště důležité pro studium chování emulzí, které jsou velmi citlivé na faktory prostředí, jako je teplota, vlhkost a koncentrace účinných látek. Kromě toho lze DEA použít ke sledování účinků stárnutí na kosmetické přípravky, což výrobcům umožňuje identifikovat potenciální problémy, jako je oddělování fází nebo degradace dříve, než se výrobek dostane ke spotřebiteli.

Další významnou výhodou DEA je její nedestruktivní povaha. Měřením změn dielektrických vlastností přípravku při jeho interakci s pokožkou může DEA poskytnout cenné informace o jeho schopnosti pronikat kožní bariérou, což je klíčový faktor určující účinnost výrobku. Kromě toho lze DEA kombinovat s dalšími technikami, jako je iontoforéza nebo elektrochemie, aby se zvýšila přesnost studií penetrace do kůže a poskytly se podrobnější informace o biologické dostupnosti účinných látek.

S rostoucí poptávkou po přírodních a ekologických výrobcích bude DEA hrát klíčovou roli při zajišťování bezpečnosti, účinnosti a stability těchto přípravků, což z ní činí základní nástroj pro budoucí vývoj kosmetických výrobků. Potenciál DEA v kosmetickém výzkumu přesahuje jeho využití při testování složení a vývoji výrobků. Díky své schopnosti měřit dielektrické vlastnosti je také cenným nástrojem při hodnocení interakcí mezi účinnými látkami a pokožkou.

Kromě toho má DEA významný potenciál v oblasti personalizované péče o pleť.

Vzhledem k tomu, že spotřebitelé stále častěji vyhledávají výrobky přizpůsobené jejich specifickým typům pleti a problémům, bude mít schopnost měřit a sledovat individuální reakce pleti na kosmetické přípravky zásadní význam. To by mohlo vést k vývoji výrobků, které by byly nejen účinnější, ale také bezpečnější a pro spotřebitele pohodlnější, protože by byly speciálně vyvinuty s ohledem na jedinečné vlastnosti jejich pokožky.

Nepřesná měření nebo špatná kalibrace zařízení mohou vést k chybným výsledkům, které by mohly ovlivnit účinnost testovaného výrobku. Výzkumní pracovníci proto musí být dobře vyškoleni v teoretických i praktických aspektech DEA, aby bylo zajištěno, že výsledky budou smysluplné a spolehlivé. Je to proto, že dielektrické vlastnosti pevných materiálů jsou často méně citlivé na změny molekulární dynamiky než u kapalných formulací, což ztěžuje odhalení jemných změn ve stabilitě nebo účinnosti formulace. V takových případech se výzkumníci mohou muset spolehnout na jiné testovací metody, jako je termická analýza nebo reologické testování, aby získali úplné pochopení chování výrobku.

Dielektrická analýza je výkonná a všestranná technika, která nabízí kosmetickému průmyslu významné výhody. Vzhledem k tomu, že se kosmetický průmysl nadále vyvíjí a zavádí nové technologie, bude DEA hrát stále důležitější roli při optimalizaci složení výrobků a zajišťovat, aby splňovaly očekávání spotřebitelů i požadavky právních předpisů. Vzhledem k tomu, že výzkum v této oblasti nadále pokračuje, DEA se nepochybně stane nepostradatelným nástrojem při vývoji kosmetických výrobků nové generace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Bakshi, P., Vora, D., Hemmady, K., & Banga, A.K. (2020). Iontophoretic skin delivery systems: Success and failures. *International Journal of Pharmaceutics*.

Barthe, M., Bavoux, C., Finot, F., Mouche, I., Cuceu-Petrenci, C., et al. (2021). Safety Testing of Cosmetic Products: Overview of Established Methods and New Approach Methodologies (NAMs). *Cosmetics*, 8, 50.

Baumann, D., Talary, M., & Fröhlich, J. (2011). Sensitivity and specificity analysis of fringing-field dielectric spectroscopy applied to a multi-layer system modelling the human skin. *Physics in Medicine & Biology*. DOI: 10.1088/0031-9155/56/24/007.

Bielfeldt, S., Bonnier, F., Byrne, H. J., et al. (2022). Monitoring dermal penetration and permeation kinetics of topical products; the role of Raman microspectroscopy. *Trends in Analytical Chemistry*, 156, 116709.

Bosman, I. J., et al. (1998). Evaluation of a novel diffusion cell for in vitro transdermal permeation. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*.

Choe, C. S., Schleusener, J., Lademann, J., & Darvin, M. E. (2017). In vivo confocal Raman microscopic determination of depth profiles of the stratum corneum lipid organization influenced by application of various oils. *Journal of Dermatological Science*, 87, 183–191.

Dong, P., Nikolaev, V., Kröger, M., Zoschke, C., Darvin, M.E., Witzel, C., Lademann, J., Patzelt, A., Schäfer-Korting, M., & Meinke, M.C. (2020). Barrier-disrupted skin: Quantitative analysis of tape and cyanoacrylate stripping efficiency by multiphoton tomography. *International Journal of Pharmaceutics*.

Escobar-Chávez, J.J., Merino-Sanjuán, V., López-Cervantes, M., Urbán-Morlan, Z., Piñón-Segundo, E., Quintanar-Guerrero, D., & Ganem-Quintanar, A. (2008). The tape-stripping technique as a method for drug quantification in skin. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*.

Hanai, T. (1960). Dielectric properties of emulsions. *Kolloid-Zeitschrift*, 177(1), 57-61. <https://doi.org/10.1007/BF01521332>

Itolikar, A.B., Joshi, A.S., Deshmukh, A.R., & Kumbharkhane, A.C. (2024). Frequency and temperature-dependent dielectric behaviour of fresh Aloe vera. *Plant Science Today*. Available at: <https://doi.org/10.14719/pst.3927>.

Kremer, F., & Schönhals, A. (2003). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Laaksonen, T. J., & Roos, Y. H. (2003). Water sorption and dielectric relaxations of wheat dough (containing sucrose, NaCl, and their mixtures). *Journal of Cereal Science*, 37(3), 319–326. DOI: 10.1006/jcrs.2002.0506.

Lademann, J., Jacobi, U., Surber, C., Weigmann, H.-J., & Fluhr, J.W. (2009). The tape stripping procedure – evaluation of some critical parameters. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*.

Lee, J.-C., Yoo, D.-H., & Lee, I.-C. (2024). Estimating hardness of cosmetic cream using electro-mechanical impedance sensing technique. *Applied Sciences*, 14(1110). DOI: 10.3390/app14031110.

Lunter, D., Klang, V., Kocsis, D., Varga-Medveczky, Z., Berkó, S., & Erdő, F. (2022). Novel aspects of Raman spectroscopy in skin research. *Experimental Dermatology*, 31, 1311–1329.

Lvovich, V. F. (2012). *Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*. Wiley.

Meurer, M., Retterath, L., Möglinger, B., & Hausnerova, B. (2025). Pressure sensitive adhesives for transdermal therapeutic systems: Water diffusion examined with dielectric analysis. *Journal of Materials Science*. – to be published

Möglinger, B., Kehret, L., Hausnerova, B., & Steinhaus, J. (2016). Curing behavior and reaction kinetics of binder resins for 3D-printing investigated by dielectric analysis (DEA). *AIP Conference Proceedings*, 1736, 020074. DOI: 10.1063/1.4949649.

Monteagudo Honrubia, M., Matanza Domingo, J., Herraiz-Martínez, F. J., & Giannetti, R. (2023). Low-cost electronics for automatic classification and permittivity estimation of glycerin solutions using a dielectric resonator sensor and machine learning techniques. *Sensors*, 23(3940). DOI: 10.3390/s23083940.

Mone, G. (2014). New models in cosmetics replacing animal testing. *Communications of the ACM*, 57(4), 20–21.

Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54, 104–112.

Oldörp, K. (2019). Stability of cosmetic emulsions quantified with rheology and simultaneous DEA. Thermo Fisher Scientific, V289, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1515/tsd-2019-0129>

Patri, S. K. (2009). *Dielectric Materials: Introduction, Research and Applications*. Nova Science Publishers.

Popescu, V., Soceanu, A., & Dobrină, S. (2014). The quality control of some dermo-cosmetic products. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 25(2), pp.85-90.

Prausnitz, M. R., Mitragotri, S., & Langer, R. (2004). Current status and future potential of transdermal drug delivery. *Nature Reviews Drug Discovery*.

Raj, R. A., Samikannu, R., Yahya, A., & Mosalaosi, M. (2020). Performance evaluation of natural esters and dielectric correlation assessment using artificial neural networks (ANN). *Journal of Advanced Dielectrics*, 10(5). DOI: 10.1142/S2010135X20500253.

Richters, R. J. H., Falcone, D., Uzunbajakava, N. E., et al. (2017). Sensitive skin: Assessment of the skin barrier using confocal Raman microspectroscopy. *Skin Pharmacology and Physiology*, 30, 1–12.

Saad, M. H., Khalafalla, M. A. H., & Abu-Azmah, S. Z. (2020). Dielectric properties of selected cosmetic cream. *SSRG International Journal of Applied Physics (SSRG-IJAP)*, 7(1), pp. 1-6. <https://doi.org/10.14419/ijap.v7i1.27477>

Salamanca, C. H., et al. (2018). Franz diffusion cell approach for pre-formulation characterisation of ketoprofen semi-solid dosage forms. *Pharmaceutics*.

Sasaki, K., Porter, E., Rashed, E. A., Farrugia, L., & Schmid, G. (2022). Measurement and image-based estimation of dielectric properties of biological tissues — past, present, and future. *Physics in Medicine and Biology*, 67(14), 14TR01. DOI: 10.1088/1361-6560/ac7b64.

Schwan, H. P. (1985). Analysis of dielectric data: Experience gained with biological materials. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-20(6), 913–922. DOI: 10.1109/TEI.1985.349024.

Schoellhammer, C. M., Blankschtein, D., & Langer, R. (2014). Skin permeabilization for transdermal drug delivery: Recent advances and future prospects. *Expert Opinion on Drug Delivery*.

Steinhaus, J., Hausnerova, B., Haenel, T., Großgarten, M., & Möglinger, B. (2014). Curing kinetics of visible light curing dental resin composites investigated by dielectric analysis (DEA). *Dental Materials*, 30(372–380). DOI: 10.1016/j.dental.2013.12.013.

Thakor, S.G., Rana, V.A., Vankar, H.P., & Pandit, T.R. (2021). Dielectric spectroscopy and structural characterization of nano-filler-loaded epoxy resin. *Journal of Advanced Dielectrics*, 11(2), pp.1-12. Available at: <https://doi.org/10.1142/S2010135X21500119>.

Vassilikou-Dova, A., & Kalogeras, I. M. (2009). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. Wiley.

Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*.

Wang, Y., Thakur, R., Fan, Q., & Michniak, B. (2005). Transdermal iontophoresis: Combination strategies to improve transdermal iontophoretic drug delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*.

Wang, H., Wang, L., Yang, L., Shi, X., Wen, Z., & Dong, X. (2021). Exploring the relationship between the dielectric properties and viability of human normal hepatic tissues from 10 Hz to 100 MHz based on grey relational analysis and BP neural network. *Computers in Biology and Medicine*, 134, 104494. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2021.104494.

Williams, A. C., & Barry, B. W. (2004). Penetration enhancers. *Advanced Drug Delivery Reviews*.

Zhang, Q., Shen, X., Wang, Y., Fang, X., & Chen, L. (2022). Study on the formation and stability of polyol-in-oil emulsion. *Tenside Surfactants Detergents*, 59(4), pp.331-338. Available at: <https://doi.org/10.1515/tsd-2021-241>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – (Meurer et al., 2025)</i>	19
<i>Obrázek 2 – (Meurer et al., 2025)</i>	24
<i>Obrázek 3 - (Saad et al., 2020)</i>	33
<i>Obrázek 4 - (Saad et al., 2020)</i>	34
<i>Obrázek 5 - (Saad et al., 2020)</i>	34