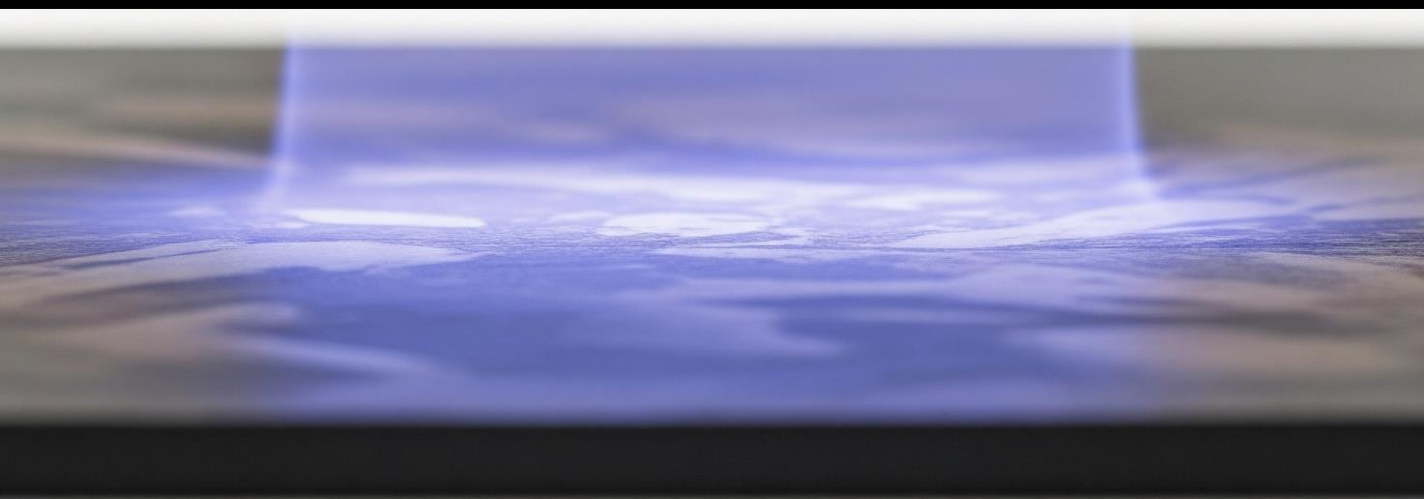


2024

Výstup z riešenia projektu aplikovaného
výskumu APVV-20-0410 PolArt
Overená technológia



Radko Tiňo, Dominka Smatanová,
Katarína Vizárová
FCHPT STU V BRATISLAVE

Výstup z riešenia projektu aplikovaného výskumu APVV-20-0410

PolArt Overená technológia

Mikrobiálna dekontaminácia objektov dedičstva z plastov účinkom nízko-teplotnej ADRE plazmy

Názov projektu : Ochrana a konzervovanie novodobých objektov kultúrneho dedičstva s obsahom plastov PolArt

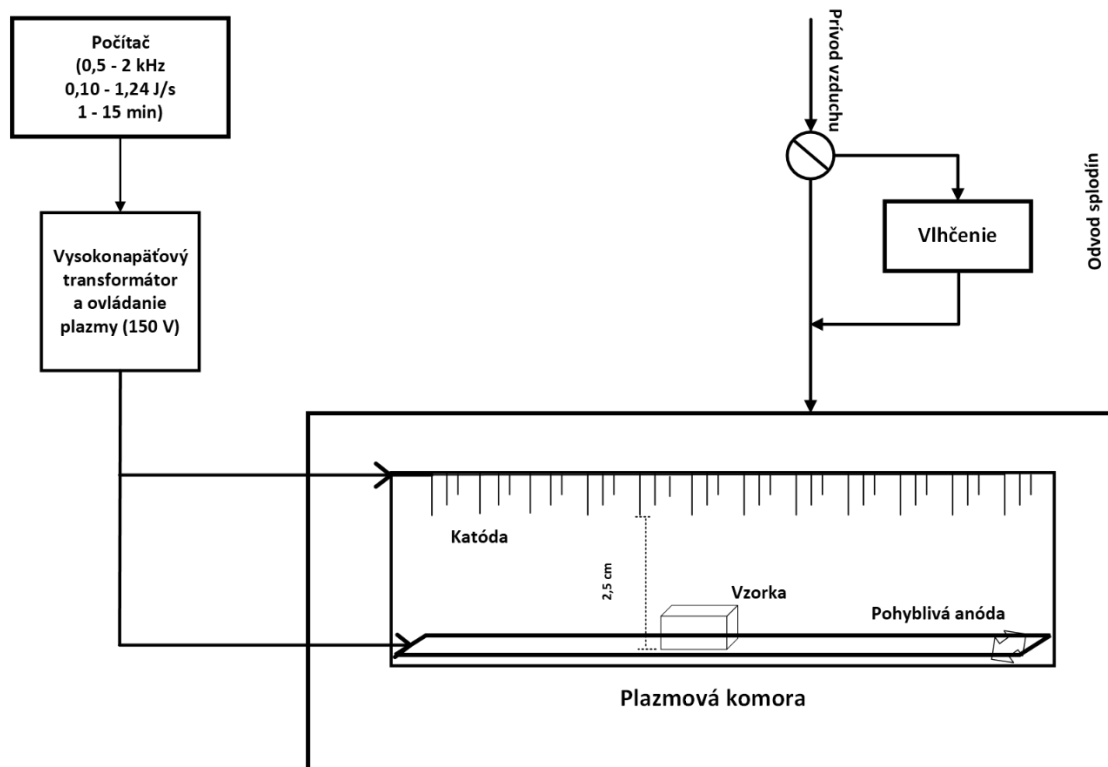
Kategória výstupu : Aplikované výsledky – 3.5 Overená technológia

Popis overenej technológie: Navrhnutý spôsob mikrobiálnej dekontaminácie objektov dedičstva využíva nízko-teplotnú plazmu s unikajúcimi elektrónmi (ADRE) generovanú pri atmosférickom tlaku vo vzduchu alebo inom bežnom pracovnom plyne bez nutnosti použitia dodatočných chemických látok. Technické riešenie je využiteľné aj pre plošné objekty dedičstva vyrobené zo syntetických polymérnych materiálov citlivých na pôsobenie chemikálií, vysokých teplôt alebo vákua.

Opis systému: Systém pre mikrobiálnu dekontamináciu objektov dedičstva sa skladá z:

- plazmovej aparatury generujúcej nízko-teplotnú plazmu s unikajúcimi elektrónmi pri atmosférickom tlaku a teplotám blízkym izbovej teplote. Aparatúra sa skladá z:
 - regulátora (notebook s ovládacím softvérom) + regulator napätia na vstupe do plazmovej aparatury
 - vysokonapäťového zdroja (max. 50kV),
 - pracovnej komory, v ktorej sú paralelne umiestnené 2 rovinné elektródy s rozmermi 20x60 cm vo vzájomnej vzdialenosti 2,5 cm; Vrchná elektróda (anóda) emituje elektróny, ktoré sa pohybujú smerom nadol ku katóde, ktorá je v tomto usporiadaní riešená ako pohyblivý stolček pohybujúci sa pomalým vratným pohybom pre zabezpečenie homogéneho opracovania ošetrovaných vzoriek. Vzorky sa ukladajú do výbojovej medzery, na povrch katódy.
 - systému pre prívod, reguláciu a miešanie pracovných plynov
 - systému pre odvod plyných splodín

Parametre :



Účinky aplikácie overenej technológie: Sterilizácia plastových zdravotníckych pomôcok a materiálov predstavuje výzvu, keďže mnohé plasty sú citlivé na vysoké teploty a vlhkosť, ktoré charakterizujú konvenčné metódy, ako je parná sterilizácia. Nízkotepelná plazmová sterilizácia sa v posledných rokoch ukazuje ako vysoko efektívna a šetrná alternatíva, ktorá prekonáva mnohé obmedzenia tradičných techník. Systém mikrobiálnej dekontaminácie objektov vyrobených z PVC-P pomocou nízkotepelnej atmosférickej ADRE plazmy ponúka celý rad výhod oproti konvenčným sterilizačným metódam, používaným pri ochrane objektov a materiálov kultúrneho dedičstva. Aplikácia navrhnutého systému pre mikrobiálnu dekontamináciu objektov dedičstva z plastov prináša nasledovné benefity :

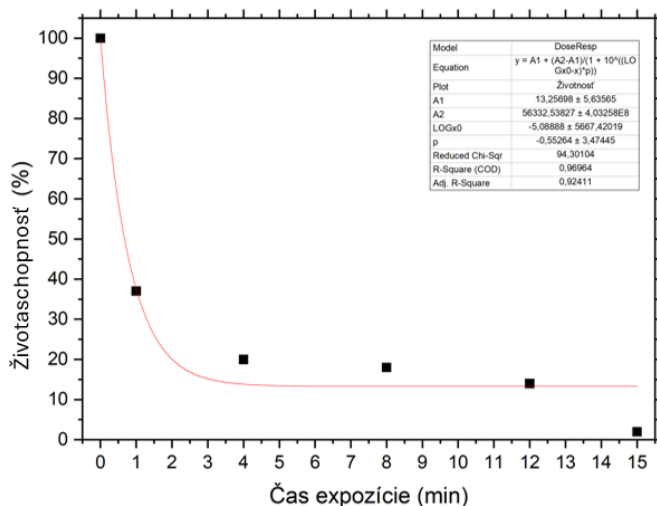
- Hlavnou výhodou nízkotepelnej sterilizácie ADRE plazmou je, ako už názov napovedá, jej nízka prevádzková teplota, ktorá sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí 35–50 °C. To umožňuje bezpečne sterilizovať širokú škálu polymérov a plastov, ktoré by sa pri vyšších teplotách v parnom autokláve (typicky 121–134 °C) alebo v horúcovzdušnom sterilizátore (160–180 °C) deformovali, roztavili alebo inak znehodnotili.
- V porovnaní s chemickou sterilizáciou, najmä s použitím etylénoxidu (EtO), ponúka plazmová sterilizácia významné bezpečnostné a environmentálne výhody. Etylénoxid je vysoko toxický, karcinogénny a horľavý plyn, ktorý si vyžaduje dlhé a zložité cykly odvetrávania na odstránenie zvyškov z materiálov. Navyše, v júni 2025 bolo na úrovni Európskej komisie zakázané jeho používanie v nemebicínskych aplikáciách. Naopak, pri plazmovej sterilizácii sú aktívnymi látkami vysoko reaktívne kyslíkové a dusíkové častice (voľné radikály). Tieto častice už v priebehu a po sterilizačnom cykle rekombinujú a tým z nich vznikajú neškodné látky, ako je voda a molekulárny kyslík, čím sa eliminuje potreba

dlhého odvetrávania a znižuje sa riziko pre konzervátorov, reštaurátorov a pre ďalší obslužný personál.

- Rýchlosť a efektivita sú ďalšími presvedčivými argumentmi. Sterilizačné cykly pri nízkotepelnej plazme sú podstatne kratšie v porovnaní s etylénoxidovou sterilizáciou, čo umožňuje rýchlejší obrat a opätovné použitie nástrojov a pomôcok.
- V neposlednom rade, plazmová sterilizácia je šetrná k samotným materiálom. Nepoškodzuje optické vlastnosti, farbu, elasticitu, ani pevnosť sterilizovaných predmetov, čo je kľúčové pre zachovanie funkčnosti a predĺženie životnosti materiálov a objektov dedičstva z plastov. Navyše, bolo dokázané, že pri dodržaní technologických podmienok pracovného režimu plazmovej sterilizácie nedochádza ku štrukturálnym, ani chemickým zmenám ošetrovaných materiálov, zatiaľ čo sterilizačné efekty dosahujú pri doposiaľ otestovaných mikroorganizmoch prítomných prirodzene v deponitárnych priestoroch vysokú účinnosť na úrovni 99% a viac.
- Nepochybnou výhodou plazmovej sterilizácie je možnosť eliminácie všetkých toxických chemikálií, doposiaľ používaných na účely sterilizácie a dekontaminácie, čo sa prejaví nielen v zlepšení pracovného prostredia, znížení rizika pre pracovníkov zodpovedných za čistotu zbierok, ale aj v znížení nákladov potrebných na nákup a zneškodňovanie takýchto chemikálií.

Pracovný postup:

1. Ošetrované plošné objekty z PVC-P sa vystavia účinku ADRE plazmy za predpísaných podmienok (expozičný čas 15 min, výkon aparatury 0,67J/s, frekvencia 1267Hz, pracovný plyn – technický vzduch vlhčený na 70%) .
2. Na začiatku sa plazmová komora samostatne vystaví účinku plazmy počas 20 minút bez prítomnosti ošetrovaných vzoriek s cieľom sterilizácie vnútorných povrchov komory.
3. Potom sa vzorky do komory plazmovej aparatury umiestnia pomocou sterilnej pinzety (sterilizovaná v plameni) vzorky na ošetrovanie a tieto sa vystavia ošetrovaniu ADRE plazmou, podľa podmienok uvedených v bode 1.
4. Tieto plazme vystavené vzorky sa následne prenesú do malej sterilnej PS Petriho misky s 1 ml roztoku sterilnej vody s Tweenom 80 na zmytie spór z povrchu PVC-P. Tieto vzorky sa pretrepávajú po dobu 1 h.
5. Po dokončení pretrepávania sa odpipetuje 100 µl pôvodnej zmytej suspenzie (100), 10x a 100 x zriedenej suspenzie a prenesú sa na Petriho misky s MAE agarom a rozotrujú sa sterilnou mikrobiologickou hokejkou po jeho ploche.
6. Po 5 dňoch sa spočítajú kolóniotvorné jednotky (tie, ktoré potenciálne prežili ošetrovanie plazmou a sú aj naďalej schopné rásť a vytvárať kolónie) a z vypočítaného priemeru sa hodnota doplní do devitalizačnej krivky / krivky viability (graf 1)
7. Pri úplnej sterilizácii nedochádza k rastu žiadnych kolóniotvorných jednotiek



$$y = A1 + \frac{A2 - A1}{1 + 10^{(LOGx0-x)p}}$$

Graf 1: Krivka viability pre *Aspergillus niger* zostrajená na základe počtu kolóniotvorných jednotiek v závislosti od času expozície nízkoteplotnou ADRE plazmou.

Z údajov uvedených v grafe. 1 vyplýva, že aplikáciou sterilizácie nízkoteplotnou ADRE plazmou sa dosahujú tieto účinky :

- už po jednej minúte ošetrenia ADRE plazmou klesá viabilita mikroorganizmu *Aspergillus niger* z pôvodných 100% na úroveň zhruba 35%
- do zhruba 12 minút postupne klesá viabilita na úroveň 10%
- po 15 minútach ošetrenia ADRE plazmou je sterilizačná účinnosť technológie zhruba na úrovni 98-99,5% v závislosti od porosity povrchu a pôvodného stupňa kontaminácie.
- tieto podmienky je možné doporučiť ako účinné z pohľadu dekontaminácie objektov dedičstva z plastov a súčasne ako bezpečné z pohľadu rizika ich poškodenia.

Aplikácia technológie :

Overovacie skúšky prebiehali od 1.6.2024 do 20.11.2024. Technológia bola overená na modelových vzorkách syntetických polymérov, zastúpených v zbierkach SNG. Prvotné testy boli vykonané na mäkkom polyvinylchloride, ktorý patrí medzi tzv. malígne plasty a podlieha rýchlej degradácii. Popri tom boli vykonané aj testy na polyuretáne a polyetyléne. V rámci skúšok boli otestované rôzne parametre pracovného režimu plazmovej aparatúry a to výkon, frekvencia plazmového zdroja, čas expozície (1-15 minút) a v neposlednom rade aj prítomnosť a hladina vlhkosti pracovného plynu. Bol vykonaný rotačný plánovaný trojfaktorový päťúrovňový experiment, ktorého výsledkom bolo stanovenie optimálnych parametrov generovania plazmy garantujúcich žiadne, alebo iba minimálne poškodenie materiálu pri súčasnej vysokej účinnosti sterilizácie nízkoteplotnou ADRE plazmou na úrovni 98% a viac. Technológia bola overená aj na reálnych objektoch z plastov, vyrobených v období 60tych a 70tych rokov 20.storočia s cieľom priblížiť sa reálne zostarutým zbierkovým predmetom. Výsledky laboratórnych experimentov na modelových vzorkách je možné korelovať s reálnymi prirodzene zostarutými objektami, je potrebné však zobrať do úvahy fakt, že nepoznáme históriu reálnych predmetov, podmienky, akým boli počas svojho života vystavené. To má za následok odlišnosť v stupni ich degradácie oproti modelovým vzorkám urýchlene starnutým v laboratórnych presne kontrolovaných podmienkach. Rovnako tak

stanovenie sterilizačnej účinnosti nan ich je pomerne obtiažne, lebo nie sú kolonizované iba jedným druhom organizmu, ale vo väčšine prípadov sa jedná o biofilm zložený z mikroorganizmov rôznych typov a druhov (vláknité huby, plesne a baktérie v rôznych štádiách rastu).

Predpokladaný prínos technológie :

Je veľmi náročné odhadnúť ekonomické prínosy predkladanej technológie, no je možné odraziť sa z údajov uverejnených na verejne dostupných zdrojoch. V roku 2021 bolo v slovenských múzeách vynaložených na odborné ošetrovanie zbierkových predmetov (čo zahŕňa aj reštaurovanie a konzerváciu, a teda aj prípadnú sterilizáciu/dekontamináciu) približne 717 464 EUR. Z toho značná časť bola zabezpečovaná dodávateľsky (569 644 EUR). Tieto údaje sú však za všetky múzeá na Slovensku, nie len národné galérie, a nezahŕňajú len sterilizáciu. V SNG sa doposiaľ na sterilizáciu využívala etylénoxidová komora, lokalizovaná na pracovisku vo Zvolene. Ročné náklady na jej prevádzku sa pohybujú na úrovni 34 000,-Euro. Podľa aktuálne schválenej európskej legislatívy sa však od roku 2025 použitie EtOx ako biocídneho prostriedku zakazuje.

Ošetrovanie nízkoteplotnou plazmou z pohľadu nákladovosti zahŕňa kapitálové náklady na obstaranie vhodnej technológie (aparatury s perifériami) generujúcej nízkoteplotnú plazmu za atmosférického tlaku, splňajúcej prísne požiadavky na bezpečnosť (vysokofrekvenčné vysokonapäťové elektrické zariadenia) a jednoduchosť obsluhy. Popri tom je z pohľadu nákladov potrebné zvažovať aj náklady na spotrebovanú elektrickú energiu, náklady na odvetrávanie, na kontrolu a monitoring ozónu v priestoroch a v neposlednom rade aj náklady na technický vzduch, ktorý je po procese vlhčenia vháňaný ako pracovný plyn do komory zariadenia počas generovania plazmy. Všetky tieto položky však budú s určitou mierou nižšie v porovnaní s existujúcimi sterilizačnými technológiami.

Navrhovateľ technológie : Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU,

Radlinského 9, 812 37 Bratislava

Odberateľ technológie : Slovenská národná galéria Bratislava, Riečna 1, 815 13 Bratislava

V Bratislave, 29.11.2024

zástupca navrhovateľa

doc.Ing. Katarína Vizárová, PhD.

zodpovedný riešiteľ projektu PolART

zástupca odberateľa

Akad. mal. Veronika Gabčová

manažérka pre odborné činnosti SNG