



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM VLIVU PLAZMATEM AKTIVOVANÉ VODY NA KLÍČIVOST SEMEN

STUDY ON THE INFLUENCE OF PLASMA ACTIVATED WATER ON SEED GERMINATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Vozár

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1645/2021 Akademický rok: 2021/22
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Student: **Tomáš Vozár**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Studium vlivu plazmatem aktivované vody na klíčivost semen

Zadání bakalářské práce:

- Seznamte se s problematikou generace plazmatu v interakci s kapalinami.
- Provedte odbornou rešerši zaměřenou na přípravu plazmatem aktivované vody, její charakterizaci a využití.
- Připravte plazmatem aktivovanou vodu v různých plazmových systémech využívajících přímou i nepřímou interakci plazmatu v kapalině nebo s povrchem kapaliny.
- Aplikujte plazmatem aktivovanou vodu na semena vybrané plodiny (pšenice) a vyhodnoťte její vliv na klíčivost semen a kvalitu plodiny.

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2022:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Tomáš Vozár
student

doc. Ing. Zdenka Kozáková,
Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2022

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Bakalárska práca študuje vplyv plazmaticky aktivovanej vody na klíčivosť semien pšenice. Po interakcii s plazmou voda zmení chemické zloženie, a získa tak nové vlastnosti, ktoré sú využiteľné v poľnohospodárstve.

Teoretická časť práce sa delí na dve časti. V prvej časti sa práca venuje základným poznatkom o plazme, vlastnostiam plazmy a možnostiam generácie v laboratórnych podmienkach. V druhej sa zaoberá plazmaticky aktivovanou vodou – PAW. Podrobne je rozobratá príprava plazmaticky aktivovanej vody, jej fyzikálno-chemické vlastnosti a zloženie. Na záver sú v teoretickej časti spomenuté možnosti využitia.

Experimentálnou časťou tejto práce bolo pripraviť tromi spôsobmi aktivácie aktivovanú vodu, ktorá bola aplikovaná na semená pšenice. Tieto tri spôsoby aktivácie využívali priamu a nepriamu interakciu plazmy s povrchom vody. Po vyklíčení semien bol pozorovaný vplyv PAW na klíčivosť semien a kvalitu plodiny oproti kontrolnej vzorke, a taktiež aj vplyv jednotlivých druhov PAW.

Zistené výsledky naznačujú pozitívny vplyv plazmou aktivovanej vody na klíčivosť semien a kvalitu plodiny. Ďalším krokom v skúmaní by malo byť prevedenie pokusu z laboratórnej misky do nádobových pokusov v pôde.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Plazma, plazmou aktivovaná voda, klíčivosť, pšenica

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with study on the influence of plasma activated water on wheat seed germination. After interaction with the plasma, the water changes its composition and obtain new properties that are useful in agriculture.

The theoretical part is divided into two parts. The first part of the theory is dealing with basic knowledge about plasma, its properties, and possibilities of plasma generation in laboratory conditions. In the second part, the work deals with plasma activated water – PAW. The preparation of plasma activated water is described in details as well as its physical-chemical properties and composition with respect to the PAW possible applications.

The aim of the experimental part of this work was to prepare plasma activated water in three different plasma systems and apply it on wheat seeds. These three ways of activation used direct and indirect interaction of plasma with water surface. After the seeds were germinated, the influence of plasma activated water on seed germination and quality of crops was observed and compared to control samples. The influence of different ways of water activation was also evaluated.

Results show positive effects of plasma activated water on the seed germination and it also increased the quality of crops. Next steps in this research should be the transfer of this experiment from the laboratory scale on the Petri dish to the pot experiments in soil.

KEY WORDS

Plasma, plasma activated water, seed germination, wheat

VOZÁR, Tomáš. *Studium vlivu plazmatem aktivované vody na klíčivost semen*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138935>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce doc. Ing. Zdenka Kozáková, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne, a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citoval. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a komerčné účely môže byť použitá iba so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FCH VUT.

.....
podpis študenta

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcej mojej práce doc. Ing. Zdenke Kozákovéj Ph.D. za jej čas, odborné vedenie a cenné rady pri spracovávaní bakalárskej práce. Ďalej by som sa chcel taktiež poďakovať mojej konzultantke Ing. Ludmile Čechovej za jej čas a pomoc pri prácach v laboratóriu, a pomoc pri vyhodnocovaní výsledkov.

OBSAH

1 Úvod	8
2 Teoretická časť	9
2.1 Plazma	9
2.1.1 Vznik plazmy	10
2.1.2 Možnosti generácie plazmy.....	10
2.1.3 Vlastnosti plazmy	10
2.2 Plazmaticky aktivovaná voda (PAW)	11
2.2.1 Príprava PAW	12
2.3 RONS	14
2.3.1 H ₂ O ₂	14
2.3.2 NO ₂ ⁻ a NO ₃ ⁻	15
2.4 Fyzikálne a chemické vlastnosti PAW	15
2.4.1 pH.....	15
2.4.2 Redoxný potenciál.....	16
2.4.3 Konduktivita.....	16
2.5 Použitie PAW	17
3 Experimentálna časť	18
3.1 Použité chemikálie, materiál a prístroje	18
3.2 Príprava PAW.....	19
3.3 Príprava misiek s pšenickou	21
3.4 Vyhodnocovanie.....	21
3.4.1 Vyhodnotenie inhibície a stimulácie korenkov	22
3.4.2 Vyhodnotenie vplyvu na klíčivosť semien.....	22
3.4.3 Vyhodnotenie vplyvu na rast klíčkov.....	23
4 Výsledky a diskusia	24
4.1 Zloženie použitej PAW	24
4.2 Vplyv PAW na klíčivosť pšenice	25
4.3 Vplyv PAW na rast klíčkov pšenice.....	30
4.4 Vplyv PAW na inhibíciu korenkov pšenice	31

5 Záver.....	33
6 Zoznam použitých zdrojov	35
7 Zoznam použitých skratiek a symbolov	38

1 ÚVOD

Plazma je považovaná za ďalšie skupenstvo. Je to ionizovaný plyn, zložený z iónov, elektrónov a neutrálnych častíc. V súčasnosti je už vytvorených množstvo systémov generujúcich plazmu. A práve pôsobením plazmy na vodu vzniká plazmaticky aktivovaná voda – PAW. Počas pôsobenia plazmy na vodu prechádzajú do vody rôzne produkty (RONS – reaktívne častice dusíka a kyslíka), ktoré pozmenia chemické zloženie vody. Takýmto spôsobom upravená voda postupne nachádza svoje využitie v ekologickom poľnohospodárstve alebo medicíne.

Vzhľadom na neustále zväčšujúci sa problém globálneho otepľovania, narastá celková teplota atmosféry planéty. Oteplením planéty dochádza k problému, ktorým je sucho. V suchom prostredí sa čím ďalej ťažšie pestujú plodiny, a ľuďstvu to spôsobuje hlad. Preto sa nové výskumy zaberajú zvyšovaním klíčivosti, ale hlavne zvýšením rýchlosti klíčenia, pretože aby bolo možné plodinu pestovať, je dôležité, aby správne a dostatočne rýchlo vyklíčila a zakorenila do pôdy. Ďalej je potrebné, aby v takto vyschnutej pôde nedochádzalo ku zasolovaniu zemí syntetickými hnojivami, preto sa vo výskumoch hľadajú alternatívy hnojív, ktoré by rastliny ľahko a rýchlo prijali. Výskumy z posledných rokov naznačujú, že pôsobením látok obsiahnutých v plazmou aktivovanej vode sa zvýši klíčivosť, ale aj rýchlosť vyklíčenia. Dusík je jeden z najdôležitejších prvkov vo výžive rastlín. Pri skúmaní zloženia plazmaticky aktivovanej vody sa zistilo, že obsahuje dusík vo forme NO_2^- a NO_3^- . Tým, že tieto dve formy dusíku sú už v opracovanej vode rozpustené, stávajú sa ľahko prijateľné pre rastliny cez korene. Zlepšením príjmu dusíkatých látok sa zvýši kvalita plodiny a jej úrodnosť.

Obilniny sú najpestovanejšími plodinami, a práve preto bolo cieľom tejto bakalárskej práce posúdiť pôsobenie plazmaticky upravenej vody na semená pšenice. Študovaný vplyv bol na klíčivosť a kvalitu plodiny. Kvalita plodiny bola študovaná ako vplyv na rast klíčkov a korenkov v porovnaní s kontrolnou vzorkou. Voda bola aktivovaná postupne tromi spôsobmi a potom bola aplikovaná na semená pšenice. Následne bol v porovnaní s kontrolnou vzorkou, kde bola použitá neopracovaná voda, vyhodnotený pozitívny alebo negatívny účinok vody na klíčivosť a kvalitu plodiny.

2 TEORETICKÁ ČASŤ

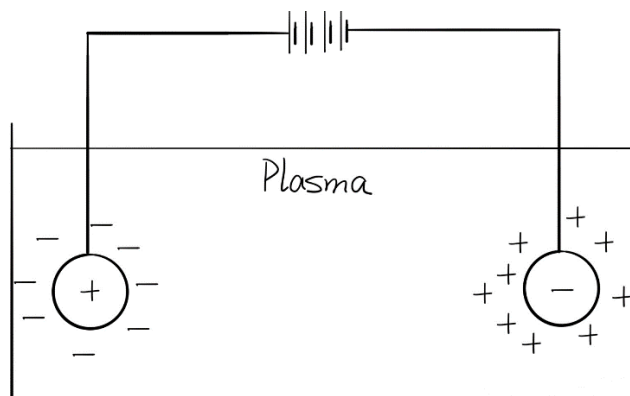
2.1 Plazma

Plazma je hmota, ktorej bolo dodané veľké množstvo energie (tepelná, elektrická...). Dodaná energia je väčšia ako ionizačná energia daného plynu, čím dôjde k odtrhnutiu elektrónu z valenčnej vrstvy atómu. Tým vzniknú kladné ióny v mori voľných elektrónov. Napriek tomu, že v plazme sú záporne nabité častice (elektróny a niektoré ióny) a aj kladne nabité ióny, je plazma neutrálna. Je to spôsobené tým, že koncentrácia kladných a záporných častíc je približne rovnaká. Tento stav sa označuje ako kvazineutralita, najdôležitejšia charakteristika plazmy[1][2].

Ďalším dôležitým javom, ktorý je možné pozorovať v plazme, je Debeyove tienenie. Keď vložíme do plazmy elektrické pole vložení dvoch nabitých guľôčok (jednu kladne a druhú záporne) pripojených k batérii, tak náboj vlozenej guľôčky bude odtienený Debeyovým tienením vďaka kvazineutralite (obrázok 1). Vzďialenosť, do ktorej častice pociťujú elektrické pole vlozenej guľôčky, sa nazýva Debeyova dĺžka (λ_D). Guľôčky budú k sebe priťahovať častice opačného náboja, ktoré vytvoria oblak opačných nábojov v okolí vlozenej guľôčky. Plazma sa polarizuje, a tým pádom dôjde k odtieneniu náboja vlozenej guľôčky. Tým klesne potenciál elektrického poľa v plazme oproti elektrickému poľu vákuua na $1/e$ vo vzdialenosti Debeyovej dĺžky. Pre výpočet vzdialenosti tienenia alebo hrúbky plášťa a teda Debeyovej dĺžky použijeme vzťah (1)[1][2][3].

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k_B \cdot T_e}{n \cdot q_e^2}} \quad (1)$$

ϵ_0 je permitivita vákuua, k_B je Boltzmannova konštanta, n je koncentrácia nabitých častíc, q_e je náboj elektrónu a T_e je teplota elektrónov.



Obrázok 1. Debeyove tienenie[3]

V okolí vlozenej guľôčky vznikne oblak tvorený z opačne nabitých častíc guľovitého tvaru o polomere, ktorý bude daný Debeyovou dĺžkou. Tento oblak budeme nazývať Debeyova sféra. Počet častíc v sfére (N_D) počítame pomocou vzťahu (2)[1][2][3].

$$N_D = \frac{4\pi}{3} \cdot n \cdot \lambda_D^3 \quad (2)$$

λ_D je Debeyova dĺžka, n je koncentrácia nabitých častíc.

Aby sme mohli ionizovaný plyn považovať za ideálnu plazmu, musíme splňovať určité kritéria. V prvom rade musí platiť, že v Debeyovej sfére (N_D) je výrazne vyšší počet nabitých častíc než 1 ($N_D \gg 1$), inak by nedával zmysel ani koncept Debeyovho tienenia. Ďalej musia byť rozmery celého systému (L) oveľa väčšie ako je Debeyova dĺžka ($L \gg \lambda_D$). Posledné kritérium je $\omega\tau > 1$, kde ω je frekvencia oscilácie plazmy a τ je stredná doba medzi kolíziami s neutrálnymi atómami. Toto kritérium je možné tiež vyjadriť aj ako $\omega > \nu_{eN}$, kde ν_{eN} je zrážková frekvencia, ktorá je nepriamo úmerná dobe medzi zrážkami $\nu_{eN} = 1/\tau$. Súčin frekvencie a času musí byť väčší než 1, inak by sme nemohli považovať tento ionizovaný plyn za plazmu, pretože pohyb častíc by nebol ovplyvňovaný elektromagnetickými silami ale skôr hydrodynamickými[1][2][3].

2.1.1 Vznik plazmy

Bežne nie je možné plazmu vyrobiť obyčajným zahriatím nádoby s plynom. Dôvod je jednoduchý, neexistuje materiál nádoby, ktorý by bolo možné zahriať na takú teplotu, aby plyn ionizoval, a je možné, že nádoba by sa vyparila a ionizovala na plazmu tiež. Preto v laboratóriu zahrievame a ionizujeme plyn pomocou elektrického prúdu, ktorý púšťame cez plyn. Pri formácii plazmy ide o to, aby bola dodaná energia voľným elektrónom, tie sa potom zrážajú s atómami, uvoľnia viac elektrónov a nasledujú ďalšie procesy kým sa nedosiahne potrebný stupeň ionizácie, aby sme mohli považovať ionizovaný plyn za plazmu[1].

2.1.2 Možnosti generácie plazmy

Generovať plazma v laboratórnych podmienkach môžeme pomocou rôznych druhov elektrického výboja. Jednosmerným nepulzným alebo tzv. kontinuálnym výbojom môžeme vytvoriť plazmu v uzavretej výbojovej nádobe pomocou vnútorných elektród. V závislosti na priloženom napätí a prúde je možné získať rôzne typy výbojov. Na výboj plazmy je možné použiť aj pulzný jednosmerný výboj, ktorý oproti nepulznému pracuje pri vyššom výkone s možnosťou kontroly výkonu[4].

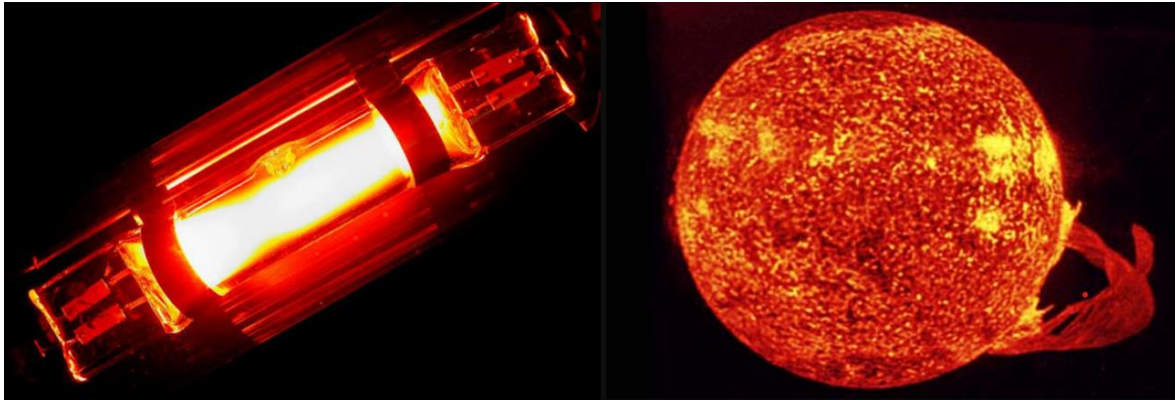
Ďalšou možnosťou je aplikácia striedavého prúdu s rôznou frekvenciou. Používať môžeme klasickú frekvenciu 50 Hz z elektrickej siete, tak cez vysokofrekvenčné zdroje (kHz), ďalej rádiové výboje, ktoré pracujú vo frekvencii 1–100 MHz, až po mikrovlnné zdroje pracujúce spravidla pri frekvencii 2,45 GHz[4].

Každý zo zdrojov sa hodí pre rôzne konfigurácie plazmového systému. Plazmový systém je navolený podľa výsledku, ktorý chceme dosiahnuť a líšiť sa môže v tvare a materiáli elektródy alebo plynom použitým na generáciu plazmy[4].

2.1.3 Vlastnosti plazmy

Vďaka nabitým časticiam, ktoré plazma obsahuje, je elektricky vodivá. Vodivosť plazmy závisí na stupni ionizácie. Stupeň ionizácie je pomer nabitých (ionizovaných) častíc ku celkovému počtu častíc v systéme. Na základe stupňa ionizácie rozdelíme plazmu na slabú a silnú

ionizovanú. Vo vysoko ionizovanej plazme je veľa nabitých častíc, preto dominujú zrážky nabitých častíc medzi sebou. V plazme s nízkym stupňom ionizácie dochádza prevažne ku zrážkam medzi neutrálnymi molekulami plynu a nabitými časticami, ktorých koncentrácia je veľmi malá oproti koncentrácii molekúl plynu. Plne ionizovaná plazma má stupeň ionizácie blížiaci sa 1, napríklad jadro Slnka (obrázok 2 vpravo). Slabo ionizované plazma má stupeň ionizácie menší ako 1, spravidla 1–10 %, napríklad plynové výbojky (obrázok 2 vľavo)[5].



Obrázok 2. Neónová plynová výbojka vľavo a Slnko vpravo[10][11]

Ďalším parametrom plazmy je jej teplota. Rozlišujeme vysokoteplotné a nízokoteplotné (studené) plazma podľa strednej energie častíc. Vysokoteplotné má energiu častíc 100 eV a viac, to zodpovedá teplote 10^6 K. Vysokoteplotné plazma pozorujeme pri termonukleárných syntézach a je aj vo hviezdach. Nízokoteplotné plazma má na vysokú energiu excitované iba elektróny, ióny zostávajú rovnako teplé ako ich okolie. Preto používame práve túto plazmu na úpravu tepelne citlivých povrchov materiálov a kvapalín. Dnes sa s týmto druhom plazmy môžeme stretnúť napríklad v osvetľovacích výbojkách, používa sa na hojenie rán v medicíne alebo aj v poľnohospodárstve kedy je možné zvýšiť klíčivosť semien. Aplikujeme plazmu na vodu, kde žiarenie plazmy vyvoláva zmeny v zložení vody. Vo vode vznikne pôsobením žiarenia množstvo iónov, elektrónov a radikálov a vyrobí sa tzv. plazmaticky aktivovaná voda (PAW)[8][7][6].

Vďaka dostatočnému podielu ionizovaných častíc, je možné plazmu ovplyvniť magnetickým poľom. To sa využíva najmä pri výskume jadrovej fúzie, pretože žiaden materiál by plazmu neudržal na mieste, tak sa na to vyžívajú magnetické polia. Ďalším možným využitím je magnetronové rozprašovanie. Magnetickým poľom je zakrivená dráha priamočiareho pohybu elektrónov do špirály, tým sa predĺži trajektória elektrónu. V pomerne malom zariadení naberú elektróny predĺžením trajektórie dostatočnú energiu, tým sa zvýši zrážková frekvencia nasledovaná produkciou väčšieho množstva iónov potrebných na rozprášenie materiálu[7][8][9].

2.2 Plazmaticky aktivovaná voda (PAW)

Nízokoteplotnej plazme je v súčasnosti venovaná pozornosť, pretože túto plazmu je možné vygenerovať za atmosférických podmienok pomocou jednoduchých zdrojov plazmy, ako sú napríklad dielektrický bariérový výboj alebo korónový výboj. Generáciou plazmy vznikajú voľné radikály, ktoré interagujú s molekulami vody. Reaktívne častice kyslíka (ROS = reactive

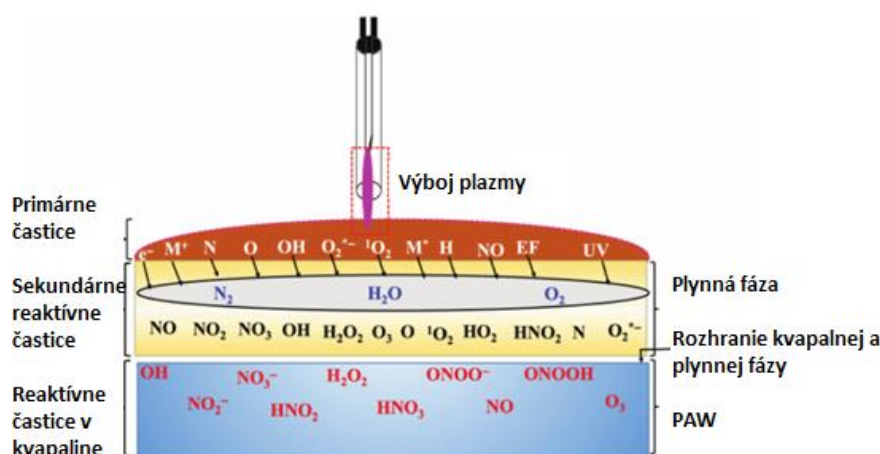
oxygen species) a dusíka (RNS = reactive nitrogen species) sú spoločne nazývané RONS a spôsobujú vo vodnom roztoku chemické zmeny, ktorými sa voda tzv. aktivuje a nazýva sa plazmou aktivovaná. Tieto častice potom môžu vstupovať do následných fyzikálno-chemických procesov, ktoré sú využiteľné pri rôznych aplikáciách PAW[12].

2.2.1 Príprava PAW

PAW pripravujeme aktiváciou vody plazmou. Rozlišujeme tri spôsoby aktivácie, a to vytvorením plazmy priamo v kvapaline, vygenerovaním plazmy nad hladinou vody v plynnej fáze a prebublanie produktov výboja vodou. Koncentrácia vznikajúcich RONS sa bude meniť v závislosti na chemickom prostredí, veľkosti napätia, spôsobe aktivácie a času pôsobenia plazmy. Zo zmenou koncentrácie produkovaných reaktívnych častíc sa menia aj fyzikálno-chemické vlastnosti PAW. To znamená, že rôznymi druhmi aktivácie môžeme dostať PAW s rôznymi vlastnosťami. Spôsob aktivácie môže ovplyvniť stabilitu, a teda vplýva na krátkodobú a dlhodobú kvalitu zloženia PAW.[12][13][17].

Príprava PAW pomocou výboja generovaného nad hladinou kvapaliny

Pri tejto príprave dôjde k vygenerovaniu plazmy v plynnej fáze nad hladinou vody. Ako prekursor na prípravu PAW budeme uvažovať vzduch (zložený z 78 % z dusíka a z 21 % z kyslíka) a vodu. Molekuly kyslíka, dusíka a vody v kontakte s plazmou formujú už spomínané vysoko reaktívne častice RONS čo sú napríklad radikály ($\text{OH}\cdot$, $\text{NO}\cdot$, $\text{O}\cdot$, $\text{N}\cdot$), ióny (H^+) alebo aj ozón. Tieto častice sú unášané v zóne medzi elektródami, kde vytvárajú sekundárne molekuly vo vzájomných reakciách alebo s pôvodnými molekulami kyslíka, dusíka a vody. Povrch kvapaliny je teda bombardovaný pôvodnými molekulami, RONS a sekundárnymi molekulami. Pri bombardovaní povrchu vody prejdú priamo pod povrch kvapaliny iba častice, ktoré sú rozpustné vo vode (H_2O_2 , NO_3^- , NO_2^- , O_3), ostatné nerozpustné alebo málo rozpustné zostanú na povrchu, kde môže dochádzať k reakciám s molekulami, ktoré sú prítomné na povrchu kvapaliny (obrázok 3)[13][14][17].

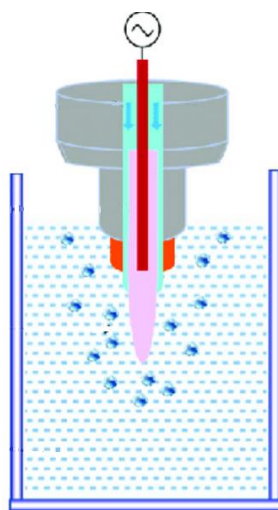


Obrázok 3. Aktivácia vody nad povrchom kvapaliny[13]

Legenda: e^- sú elektróny, EF je elektrické pole, M^+ a $M\cdot$ je ión a radikál neutrálneho plynu a UV je ultrafialové žiarenie

Príprava PAW pomocou výboja generovaného priamo v kvapaline

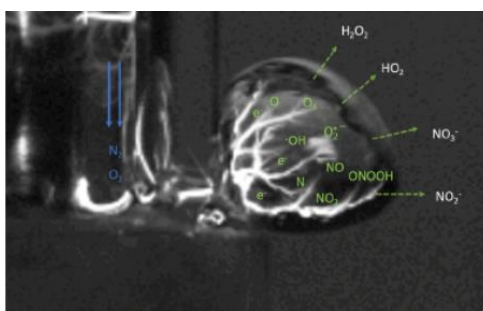
Pri tejto príprave je plazma priamo v kontakte s kvapalinou alebo je vytvorená v kvapaline (obrázok 4). Kvapalina bude v tomto systéme vystupovať ako prídavná elektróda, tým pádom je kvapalina v dostatočnom kontakte s kvapalnou fázou na to, aby vznikali reaktívne látky s krátkou životnosťou (O a $OH\bullet$) v roztoku. Šírením elektrického výboja v kvapaline sa rozpožybované elektróny, ktoré sa následne zrážajú, čo spôsobuje disociáciu molekúl vody. Disociáciou molekúl vznikajú chemicky aktívne častice, ako sú napr. radikály $OH\bullet$, $O\bullet$. Tieto častice reagujú v kvapaline navzájom medzi sebou, môže dochádzať k reakciám s inými molekulami prítomnými v aktivovanom roztoku alebo s molekulami, ktoré sú prítomné pri povrchu hladiny[15][16][17].



Obrázok 4. Výboj generovaný priamo v kvapaline[17]

Príprava PAW preublávaním produktov výboja do vody

Pri tomto spôsobe prípravy sa systém skladá z generátora plazmy, ktorý je buď ponorený priamo vo vode alebo je mimo vodu a produkty do vody vnikajú cez hadičku. Pomocou spojovacej rúrky je k plazme privádzaný stlačený vzduch. Výboj je vytvorený v bublinách, ktoré opúšťajú systém do vody. Bublíny, ktoré obsahujú reaktívne častice v podobe plynnej zmesi, reagujú s molekulami vody. V závislosti na veľkosti bublín budú jednotlivé molekuly reagovať s bublinami, čím menšie bubliny tým viacej reakcií (menšie bubliny = väčší špecifický povrch) (obrázok 5)[17][18].



Obrázok 5. Prechod RONS z bubliny do vody[18]

2.3 RONS

Porovnaním oboch spôsobov aktivácie sa zistilo, že vyššie spomínanými druhmi aktivácie vznikli rôzne PAW s rozdielnymi koncentráciami RONS. Prvým spôsobom aktiváciou nad hladinou sa v kvapaline nachádza viacej dusičnanov a dusitanov, naopak pri druhom spôsobe aktivácie ich bolo prítomných málo. Druhý spôsob aktivácie obsahuje oveľa väčšie množstvo H_2O_2 naproti aktivácii nad hladinou. Tu sú pozorovateľné možnosti použitia PAW po rôznych spôsoboch aktivácie[19].

2.3.1 H_2O_2

Peroxid vodíka je jedným zo vznikajúcich ROS pri výrobe PAW. Pri výrobe sa peroxid do vody dostáva dvoma spôsobmi. Generáciou plazmy nad hladinou a následným vznikom ROS a ich rozpustením vo vodnom roztoku. Pri druhom spôsobe, keď je plazma generovaná priamo v roztoku, vzniká H_2O_2 prevažne rekombináciou rozpustených $OH\cdot$ v roztoku[19][20].



Prítomnosť H_2O_2 predurčuje široký rozsah použitia v medicíne ale aj v poľnohospodárstve. V medicíne je využitá schopnosť peroxidu hojiť rany a jeho antibakteriálny a protirakovinový efekt. V poľnohospodárstve sa využíva pri klíčení semien. Semeno nachádzajúce sa v dormancii nebude klíčiť. Znamená to, že nemá vhodné podmienky na klíčenie ako sú chlad, nedostatok vody alebo svetla (tzv. stresové podmienky). Takéto semeno čaká na vhodné podmienky na klíčenie. Sledovanie podmienok vykonáva kyselina abscisová (ABA), ktorá má v rastlinách účinok inhibítora. Zmenou stresových podmienok sa zníži koncentrácia ABA a semeno následne začne klíčiť. Peroxid vodíka potlačuje účinok kyseliny abscisovej nachádzajúcej sa v zárodkoch semien. Tým môže semeno klíčiť aj v podmienkach bežne nevhodných pre semeno. Redukciou ABA peroxid reguluje ďalšie významné procesy ovplyvňujúce rast a vývoj rastlín po klíčení, rastliny sú schopné odolávať stresovým podmienkam ako sú extrémne sucho alebo chlad. Ďalej, podobne ako v medicíne, redukuje patogény a choroby pri klíčení, ktoré by mohli brániť klíčeniu alebo v následnom vývoji rastliny[19][20].

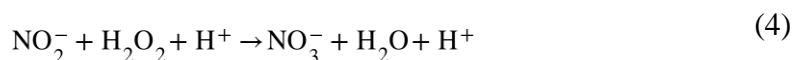
Stanovenie H_2O_2

Na stanovenie H_2O_2 sa najčastejšie používajú kolorimetrické reakcie s $Ti(SO_4)_2$ alebo $TiOSO_4$, reakciou vzniká žltý sfarbený komplex, ktorého koncentrácia sa potom stanovuje spektrofotometricky UV-Vis pri $\lambda=407$ nm[19].

Ďalšou možnosťou je jodometrická titrácia, kedy H_2O_2 reaguje s KI v kyslom prostredí a za prítomnosti katalyzátora na jód. Roztok jódu má v závislosti na koncentrácii žltú až hnedú farbu. Pri titracii sa však pridáva škrobový roztok, aby sa vzniknutý jód sfarbil na modro. Následne sa titruje thiosíranom ($Na_2S_2O_3$), bod ekvivalencie je detekovaný prechodom z modrej na bezfarebný roztok[19].

2.3.2 NO₂⁻ a NO₃⁻

Dusitany v PAW vznikajú rozpúšťaním oxidov dusíku (NO_x). Pri výboji v plynnej fáze spolu reagujú O₂ a N₂ a vzniká zmes NO_x, ktoré sa rozpustia vo vodnom roztoku za vzniku NO₂⁻. Vo vodnom roztoku dôjde NO₂⁻ anióny do styku s oxidačnými činidlami (napríklad H₂O₂), ktoré ich premenia na NO₃⁻. Prítomnosť RONS a rozpúšťanie NO_x prispievajú k nízkemu pH PAW. Koncentrácia RNS v PAW veľmi závisí od spôsobu prípravy. Pri generácii plazmy nad hladinou v prítomnosti vzduchu je koncentrácia RNS o mnoho väčšia ako pri výboji priamo v kvapaline[19][20].



Prítomnosť dusitanov a dusičnanov v PAW má veľký význam pre poľnohospodárstvo. Vďaka nim má PAW predpoklad stať sa alternatívou k súčasným organickým hnojivám, ktoré podporujú rast rastlín. RNS sú absorbované koreňmi rastlín, kde vstúpia do rastlinných buniek. Po vstupe do bunky sú RNS redukované enzýmami nitrátreduktázou a nitritreduktázou na amónne ióny. Amónne ióny následne vstupujú do aminokyselín, ktoré vytvárajú živiny pre rast rastlín[19][20].

V kyslom prostredí zabezpečuje NO₂⁻ aj antibakteriálny účinok. V podmienkach s nízkym pH sa protonuje a následne degraduje na NO a NO₂, ktoré sú toxické pre bunky[19][20].

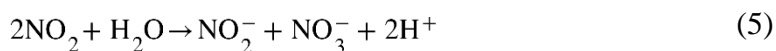
Stanovenie NO₂⁻ a NO₃⁻

Stanovenie RNS prebieha taktiež primárne pomocou kolorimetrických metód. Stanovenie NO₂⁻ prebieha pomocou tzv. Griessovho testu, ktorý obsahuje 2 zložky (N-(1-naphtyl)ethylendiamin a sulfanilamid). Obe zložky reagujú s NO₂⁻ za vzniku ružovo sfarbeného azo-farbiva. Koncentrácia je následne stanovená spektrofotometricky UV-Vis pri λ=540 nm. Stanovenie NO₃⁻ prebieha rovnako na Griessov test, ale pred tým je potrebné zoxidovať NO₃⁻ na NO₂⁻ napr. pomocou VCl₃. Po zoxidovaní reagujú zložky Griessovho testu za vzniku hnedého sfarbenia a koncentrácia sa následne stanovuje pri λ=526 nm. Na stanovenie dusičnanov a dusitanov je taktiež možné využiť chromatografické metódy, ako sú napr. plynová chromatografia alebo HPLC [19].

2.4 Fyzikálne a chemické vlastnosti PAW

2.4.1 pH

pH vyjadruje mieru koncentrácie vodíkových iónov v roztoku. Vznikajúce RONS pri výrobe PAW majú acidobázické vlastnosti, sú teda schopné uvoľňovať vodíkové ióny do prostredia vodného roztoku. Vodou absorbované RONS (NO₃⁻ a NO₂⁻) a ďalšie vo vode vznikajúce látky sú v PAW pri aplikovaní plazmy na vodu zodpovedné za znižujúce sa pH vyrábanej PAW. Znížené pH môže byť zodpovedné za antibakteriálne vlastnosti[14][21].



pH PAW sa výrazne znižuje so zvyšujúcim sa časom, ktorý pôsobí plazma na ošetrovanú vodu, ale po istom čase sa pH ustáli a už sa jeho hodnota nemení, je konštantné (pH=2,01–2,07). Ďalej

pH závisí od použitého systému na výrobu PAW, a od plynu, v ktorom je plazma generovaná, pretože vznikajúce reaktívne častice môžu byť iné, ako keď je plazma generovaná vo vzduchu. Taktiež bola objavená závislosť pH na polarite použitého napätia. Polarita napätia závisí od orientácie zdroja v obvode. Ak bolo použité negatívne napätie na hlavnej elektróde, výsledné pH bolo výrazne nižšie než v prípade pozitívneho napätia. Pri dlhodobom skladovaní PAW nedochádza ku zmene pH[14][21].

2.4.2 Redoxný potenciál

Redoxný potenciál je schopnosť roztoku redukovať alebo oxidovať látky. Miera redoxného potenciálu roztoku je daná koncentráciou a silou prítomných oxidačných činidiel v roztoku. Po ošetroení vody plazmou sa jej redoxný potenciál zvýši. Zvýšený redoxný potenciál je zodpovedný taktiež za dezinfekčné účinky PAW. Zo všetkých generovaných látok pri ošetroení vody plazmou je H_2O_2 najviac zodpovedné za zvyšujúci sa redoxný potenciál, pretože v roztoku sa môže chovať ako oxidačné ale aj redukčné činidlo[14][21].

Redoxný potenciál PAW sa zväčšuje s časom, ktorým pôsobí plazma na ošetrovanú vodu. V prípade pôsobenia plazmovej trysky na destilovanú vodu, ktorej redoxný potenciál je $E = 286$ mV, po dobu 90 sekúnd sa výsledný redoxný potenciál zvýšil na $E = 581$ mV. Redoxný potenciál ale závisí aj od použitého systému aktivácie vody. Vzhľadom nato, že redoxný potenciál roztoku závisí od koncentrácie oxidačných činidiel, tak pri aktivácii vody nad povrchom nevzniká také množstvo peroxidov ako pri generácii plazmy priamo v roztoku, preto je redoxný potenciál roztoku aktivovaného priamo vo vode väčší[14][21].

2.4.3 Konduktivita

Konduktivita vyjadruje schopnosť látok viesť elektrický prúd. Prítomnosť cudzích iónov vo vode veľmi ovplyvňuje konduktivitu alebo inak špecifickú vodivosť (meriame v $\mu S/cm$). Pri úprave vody plazmou sa vzniknuté RONS rozpúšťajú vo vode a tým menia konduktivitu vznikajúcej PAW, ktorá sa zvyšuje so vznikom NO_x . Medzi pH a konduktivitou je inverzná korelácia, teda klesnutím hodnoty pH sa zvýši konduktivita roztoku. Spôsobené to je vyššou mobilitou H^+ v závislosti ku OH^- . V kyslom pH sa formujú ióny NO_3^- a NO_2^- čo je sprevádzané zvýšením konduktivity[14][21].

So zvyšujúcim sa časom, ktorým plazma pôsobí na vodu, sa zvyšuje aj konduktivita vznikajúcej PAW. Zvýšenie konduktivity roztoku sa mení aj v závislosti od použitého plynu, v ktorom bola vygenerovaná plazma pri aktivácii vody nad hladinou. Napríklad pri použití plynu bez N_2 sa v PAW nebudú vyskytovať oxidy dusíka, tým pádom konduktivitu roztoku tvoria H_3O^+ ióny. Vo všeobecnosti bude konduktivita roztoku vyrobeného aktiváciou priamo v kvapaline väčšia ako aktiváciou nad hladinou[14][21].

2.5 Použitie PAW

PAW má široké možnosti použitia v poľnohospodárstve vďaka obsiahnutým RONS. Aplikáciou PAW na semená je možné dosiahnuť zvýšenie klíčivosti semien (obrázok 6 vpravo), pretože zvyšuje odolnosť voči extrémnym podmienkam, v súčasnosti je skúmaná odolnosť najmä voči suchu. ROS v PAW spôsobujú zmäkčenie obalu semena, čo dopomôže ľahšej distribúcii vody do semena. RNS následne slúžia ako živiny potrebné pre rast klíčku [20].

Obsahom RNS v PAW je taktiež možné zrýchliť rast rastlín (obrázok 6 vľavo). Väčšina dusíka obsiahnutého v pôde je v podobe dusičnanov, teda podobne ako v PAW. Oproti dusíku obsiahnutému v pôde je ten v PAW pre rastlinu ľahšie prijateľný, tým že je obsiahnutý vo vode. Rastlina dusík absorbuje koreňmi, odkiaľ je ďalej transportovaný do buniek [20].

Ďalej sa skúma využitie ROS v PAW ako náhrada pesticídov. V študovaných prípadoch došlo po aplikácii PAW na listy rastlín k inhibícii micélií hubových chorôb, tým pádom sa zamedzilo ďalšiemu rozširovaniu choroby [20].

V medicíne je PAW použiteľná vďaka svojim antimikrobiálnym účinkom. Produkciou RONS v PAW sa zvýši oxidačne redukčný potenciál a zníži pH. Kombinácia nízkeho pH a zvýšeného oxidačne redukčného potenciálu je z väčšiny zodpovedná za antimikrobiálne účinky [14].



Obrázok 6. Rast rastlín vľavo a klíčenie semena vpravo [22][23]

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Cieľom práce bolo pripraviť plazmou aktivovanú vodu (PAW) pomocou rôznych systémov, a následne ju aplikovať na semená pšenice a preštudovať jej vplyv na klíčivosť. V experimentoch bola na pšenicu postupne aplikovaná voda aktivovaná tromi rôznymi plazmovými systémami produkujúcimi PAW o rôznom zložení. PAW bola pripravovaná ako z destilovanej, tak aj z kohútikovej vody. Výsledky boli porovnávané s kontrolnou vzorkou čistej neopracovanej vody, pričom vždy bola použitá neopracovaná voda, z ktorej bola pripravená PAW. Po vyklíčení semien bol študovaný vplyv PAW na klíčivosť. Štúdia klíčivosti prebiehala zmeraním dĺžky klíčkov a koreňkov, spočítaním vyklíčených a nevyklíčených semien. Experiment prebiehal v dvoch súboroch, najprv bol skúmaný vplyv na súbore 100 semien v 1 miske, následne bol skúmaný vplyv pri súbore 25 semien v jednej miske. Pre súbor 100 semien bola stanovená doba klíčenia 5 dní (založenie pokusu je v 0. deň), a pre súbor 25 semien bola doba 6 dní, s tým že na 3. deň bolo doliate po 10 ml vody do každej misky.

3.1 Použité chemikálie, materiál a prístroje

Chemikálie a materiál:

- Destilovaná voda (FCH)
- Kohútiková voda (BVK = Brnenské vodárny a kanalizace a.s.)
- Činidlo oxysulfát titaničitý (TiOSO_4) – roztok kyseliny sírovej na detekciu H_2O_2 od firmy Sigma Aldrich
- Kolorimetrický test dusitanov v sladkej a morskej vode od firmy Sigma Aldrich
- Kolorimetrický test dusičnanov v sladkej vode od firmy Sigma Aldrich
- Pšenica (*Triticum*)

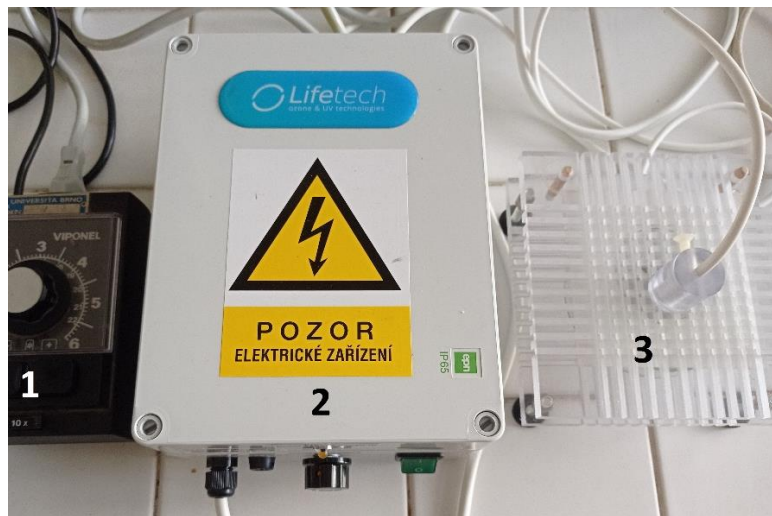
Prístroje:

- Plazmový DBD reaktor s tekutou elektródou (Laboratór plazmových procesů, Fakulta chemická, vlastná výroba)
- Zdroj vysokofrekvenčného vysokého napätia (Lifetech)
- Ozonizátor (Lifetech)
- Hmotnostné prietokomery (Omega)
- Plazmová tryska na generáciu plazmy v kvapaline (Laboratór plazmových procesů, Fakulta chemická, vlastná výroba – patent [27][28])
- Jednosmerný zdroj vysokého napätia (Laboratór plazmových procesů, FCH, vlastná výroba)

3.2 Príprava PAW

Príprava PAW pomocou dielektrického bariérového výboja (DBD) s tekutou elektródou

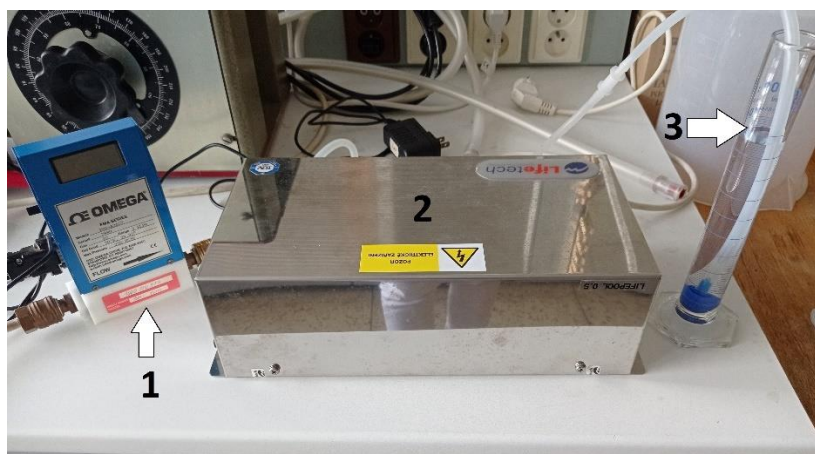
Tento systém pre prípravu PAW pozostáva zo spínacích hodín (č.1), ktorými je regulovaný prívod napätia, ďalej z vysokofrekvenčného zdroja (č.2) a DBD reaktora s Petriho miskou (č.3) (obrázok 7). Príprava prebiehala naliatím 75 ml vody do Petriho misky, a po zapnutí vysokofrekvenčného zdroja (výkon 36 W) v priestore nad Petriho miskou horel plazmový výboj, ktorého produkty (RONS) difundovali do vody. Celková doba aktivácie vody činila 2 minúty (8-krát po 15 sekúnd). Takýmto spôsobom boli pripravené vzorky z destilovanej aj z kohútikovej vody.



Obrázok 7. Systém dielektrického bariérového výboja (DBD) s tekutou elektródou, kde č.1 sú spínacie hodiny, č.2 je vysokofrekvenčný zdroj a č.3 je DBD reaktor s Petriho miskou

Príprava PAW prebubláním produktov dielektrického bariérového výboja (DBD) do vody

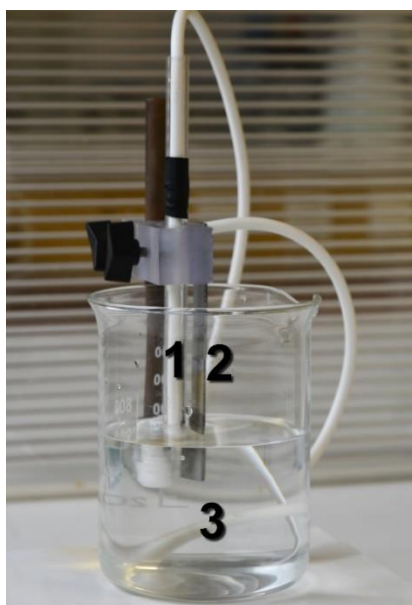
Tento systém pre prípravu PAW pozostáva z prietokomerov (č.1), pomocou ktorých bol regulovaný prítok syntetického vzduchu (dusík a kyslík v pomere 4:1, celkový prítok vzduchu 0,5 l/min) do ozonizátora (č.2), v ktorom na princípe DBD horel plazmový výboj (maximálny výkon 30 W). Produkty výboja sa presúvali z ozonizátora teflónovou hadicou do prebublávacieho nástavca, ktorý bol ponorený do 150 ml vody v pripravenom odmernom valci (č.3) (obrázok 8). Produkty tzv. prebublali do vody, tým pádom sa vzniknuté RONS z plazmového výboja dostávali do vody difúziou z bublín. Prebublávanie produktov prebiehalo po dobu dvoch minút. Aplikovaná PAW bola pripravená z kohútikovej aj destilovanej vody.



Obrázok 8. Systém pre bubľanie produktov dielektrického bariérového výboja (DBD) do vody, kde č.1 sú prítokomery, č.2 je ozonizátor a č.3 je odmerný valec, v ktorom prebieha prebubľanie produktov do vody

Príprava PAW plazmovou tryskou vo vode

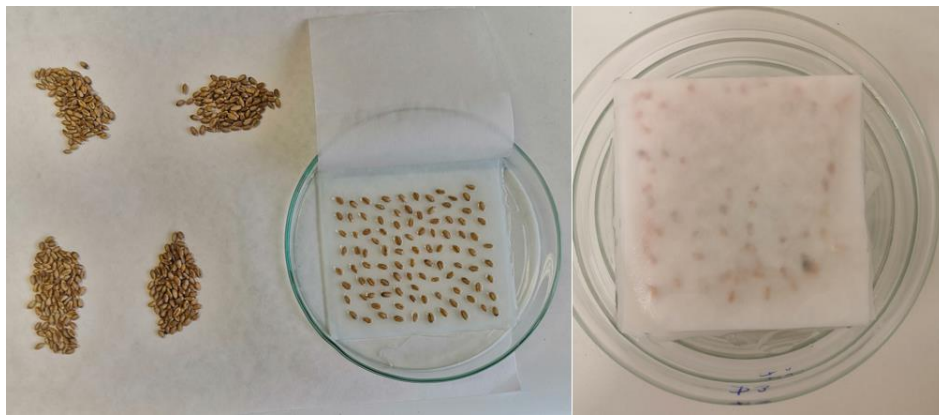
Systém je zostavený z plazmovej trysky (č.1), ktorá je spolu s hliníkovou protielektrodou (č.2) ponorená v kadičke s vodou (č.3)(obrázok 9)[26][27][28]. Plazmový výboj vzniká priamo v kvapaline po zapojení prúdu, a tým vznikali produkty výboja (RONS) priamo vo vode. Pomocou tohto systému bola vyrobená PAW jednosmerným prúdom pri výkone 50 W a 70 W (DC 50 W a 70 W). Doba prípravy činila 2 minúty. Pre oba výkony bola týmto systémom vyrobená PAW zo 150 ml kohútikovej vody. Kvôli nízkej vodivosti nebolo možné zapáliť plazmový výboj v destilovanej vode, a teda z nej nebola pripravená PAW.



Obrázok 9. Systém s plazmovou tryskou ponorenou vo vode kde č.1 je plazmová tryska, č.2 je hliníková protielektroda a č.3 je kadička s vodou[26]

3.3 Príprava misiek s pšenice

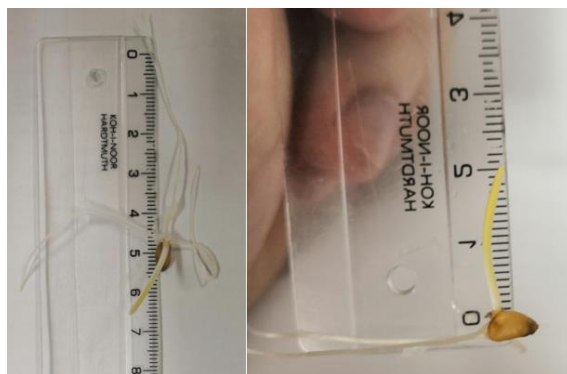
Pre potreby štúdia klíčivosti semien pšenice boli pripravené Petriho misky so vzorkami (obrázok 10). Do každej misky bol pripravený 12 cm široký a 50 cm dlhý pás filtračného papiera, ktorý bol preložený tak, aby bola vytvorená kapsa (obrázok 10 vpravo), v ktorej mohli semená klíčiť. Následne bolo napočítané po 100 alebo v druhom prípade po 25 kusov semien pšenice do každej misky. Semená boli na filtračnom papieri rovnomerne rozložené, tak aby sa navzájom nedotýkali (obrázok 10 vľavo). Pokus prebiehal vytvorením sady 4 misiek s PAW a 4 misiek s kontrolnou plazmou neaktivovanou vodou. Do štyroch misiek bolo odmerným valcom odmerané po 30 ml vody a do ďalších štyroch po 30 ml nezriedenej PAW. Následne boli misky naskladané na seba, tak že aj vrchná miska bola prikrytá opačne otočenou Petriho miskou. Misky boli umiestnené pod krabicu na tmavé miesto, kde semená klíčili pri teplote 22 °C po dobu 5 dní.



Obrázok 10. Petriho miska so semenami pšenice a vytvorená kapsa na klíčenie

3.4 Vyhodnocovanie

V prvej fáze skúmania vplyvu na klíčivosť semien bolo stanovené skúmanie na súbore 100 semien v jednej miske kvôli veľkosti štatistického súboru a stanovení metodiky. Vyhodnocovanie prebiehalo na 3. deň a na 5. deň po založení pokusu. Na 3. deň bolo pravítkom zmeraných (obrázok 11) 10 klíčkov a 10 korenkov z každej misky a spočítali sa nevyklíčené semená. Na 5. deň boli opäť prepočítané nevyklíčené semená kvôli porovnaniu, koľko doklíčilo. Po preskúmaní vplyvu na klíčivosť bol ďalej skúmaný vplyv na rast klíčkov a inhibíciu korenkov na súbore 25 semien. Založenie pokusu prebiehalo rovnakým spôsobom ako pre súbor 100 semien. Meralo sa ale všetkých 25 semien z dôvodu veľkosti štatistického súboru.



Obrázok 11. Vyhodnocovanie dĺžky korieňkov (vľavo) a klíčkov (vpravo)

3.4.1 Vyhodnotenie inhibície a stimulácie korieňkov

Pre vyhodnotenie inhibície alebo stimulácie rastu koreňa bol využitý skríningový test klíčivosti. Meraním boli zistené dĺžky koreňov vyklíčených semien pri kontrole (L_c) a pri PAW (L_v), a z nich boli spočítané priemerné dĺžky koreňov oboch variantov. Výsledok testu bol daný podľa vzťahu (6) [24]:

$$I = \frac{L_c - L_v}{L_c} \cdot 100 \quad (6)$$

kde L_c je priemerná dĺžka koreňa v kontrole, L_v je priemerná dĺžka koreňa v PAW, I je inhibícia alebo stimulácia. Ak je $I > 0$, ide o inhibíciu, ak $I < 0$, ide o stimuláciu [24].

3.4.2 Vyhodnotenie vplyvu na klíčivosť semien

Vyhodnotenie prebiehalo na 3. a na 5. deň od založenia pokusu. Nevyklíčené semená boli prepočítané a následne vyhodnotené podľa nasledujúcich vzťahov. Ako prvý parameter bol vyhodnocovaný vplyv na celkové zvýšenie klíčivosti semien. Klíčivosť semien (G) je daná ako percento semien, ktoré vyklíčia v danom súbore v optimálnych podmienkach za určený čas klíčenia, v našom prípade 5 dní. Výpočet prebiehal podľa vzťahu (7)[25]:

$$G = \frac{G_f}{S} \cdot 100 \quad (7)$$

kde G_f je počet vyklíčených semien na konci pokusu, S je celkový počet semien na začiatku pokusu[25].

Ďalším vyhodnocovaným parametrom bola energia klíčenia (GE), ktorý vyjadruje percentuálne množstvo vyklíčených semien v určenom čase v období pred ukončením pokusu. Vyjadruje vyrovnanosť klíčenia, čo znamená, že semená klíčia zároveň s ostatnými v jednej časovej vlne. Pre výpočet tohto parametra boli vyklíčené semená prepočítané na 3. deň pokusu. Získané dáta boli vyhodnotené podľa vzťahu (8)[25]:

$$GE = \frac{G_t}{S} \cdot 100 \quad (8)$$

kde G_t je počet vyklíčených semien v priebehu pokusu na 3. deň, S je celkový počet semien na začiatku pokusu[25].

Na parameter energie klíčenia nadväzuje parameter rýchlosti klíčenia. Rýchlosť klíčenia (GR) vyjadruje percentuálny pomer vyklíčených semien na začiatku a na konci stanovenej doby. Stanovená doba na pozorovanie rýchlosti klíčenia bola na obdobie medzi 3. a 5. dňom pokusu. V oba dni boli spočítané vyklíčené semená, tieto dáta boli vyhodnotené vzťahom (9)[25]

$$GR = \frac{G_t}{G_f} \cdot 100 \quad (9)$$

kde G_t je počet vyklíčených semien v priebehu pokusu na 3. deň, G_f je počet vyklíčených semien na konci pokusu na 5. deň[25].

Porovnanie rýchlostí klíčenia u vzoriek ošetrovaných PAW a kontrolným neošetrovaným vzorkom bolo prevedené pomocou relatívnej rýchlosti klíčenia (RGR). Relatívna rýchlosť klíčenia je percentuálny pomer rýchlosti klíčenia vzorku ošetrovaného PAW a vzorku neošetrovaného, daná je vzťahom (10)[25]:

$$RGR = \frac{GR_{tr}}{GR_{co}} \cdot 100 \quad (10)$$

kde GR_{tr} je rýchlosť klíčenia ošetrovaného vzorku, GR_{co} je rýchlosť kontrolného vzorku[25].

3.4.3 Vyhodnotenie vplyvu na rast klíčkov

Pre porovnanie vplyvu na rast klíčkov medzi PAW a neopracovanou vodou bol využitý vzťah pre výpočet aritmetického priemeru (11). Klíčky boli zmerané v súbore 25 semien u všetkých vyklíčených semien na 6. deň klíčenia, v súbore 100 semien bolo zmeraných vždy 10 klíčkov na 5. deň klíčenia.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (11)$$

$\sum x_i$ je súčet zmeraných klíčkov, n je počet meraných hodnôt

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Experimentálnou časťou bakalárskej práce bolo pripraviť plazmaticky aktivovanú vodu (PAW) tromi rôznymi systémami a aplikovať ju na semená pšenice. Vyhodnocovaný bol rozdielny vplyv PAW na klíčivosť semien a kvalitu plodiny. Rôzne druhy aktivovanej vody boli porovnávané s kontrolnou vzorkou destilovanej alebo kohútikovej vody v závislosti na tom, z akej vody bola PAW pripravovaná. Zistené výsledky by mohli mať význam pre budúcu aplikáciu v poľnohospodárstve.

4.1 Zloženie použitej PAW

Charakterizácia pripravených PAW prebiehala v súbežne vypracováanej diplomovej práci[29].

Tabuľka 1. Zloženie PAW pripravených tromi plazmovými systémami[29]

Typ PAW	Zloženie [mg/l]		
	H ₂ O ₂	NO ₃ ⁻ (*)	NO ₂ ⁻
Destilovaná voda aktivovaná DBD	0,17	3,4	0,010
Kohoutková voda aktivovaná DBD	1,02	8,1	1,440
Kohoutková voda aktivovaná plazmovou tryskou	34,30	1,7	0,050
Destilovaná voda aktivovaná prebubláním produktov DBD	0,34	3,2	pod limitom detekcie
Kohoutková voda aktivovaná prebubláním produktov DBD	0,34	5,7	0,002
Typ kontroly			
Destilovaná voda	0,00	0,0	0,000
Kohútiková voda	0,00	33,7	pod limitom detekcie

(*) prírastok koncentrácie NO₃⁻ (pri kohútikovej vode bola odčítaná aktuálna počiatočná koncentrácia podľa BVK a.s.)

V tabuľke 1 je zobrazené množstvo látok obsiahnutých pred aktiváciou (kontrola) a následne po aktivácii vody (PAW). Je vidno že, v PAW pripravenej plazmovou tryskou pribudlo 34,3 mg/l peroxidu vodíka, čo je výrazne najväčšie množstvo spomedzi všetkých systémov. Dusičnanov a dusitanov pribudlo najviac v kohútikovej vode pripravenej pomocou DBD ale taktiež aj v kohútikovej vode pripravenej prebubláním je prítomných dosť dusičnanov.

4.2 Vplyv PAW na klíčivost' pšenice

Voda aktivovaná dielektrickým bariérovým výbojom s tekutou elektródou

Tabuľka 2. Výsledky experimentu klíčivosti v destilovanej vode aktivovanej DBD

3. deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	94	6	1.	84	16
2.	96	4	2.	88	12
3.	91	9	3.	92	8
4.	92	8	4.	89	11
Priemer	93,3 ± 1,9	6,8 ± 1,9	Priemer	88,3 ± 2,9	11,8 ± 2,9
G_t	373		G_t	353	
5. deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	98	2	1.	96	4
2.	100	0	2.	95	5
3.	96	4	3.	94	6
4.	96	4	4.	98	2
Priemer	97,5 ± 1,7	2,5 ± 1,7	Priemer	95,8 ± 1,5	4,3 ± 1,5
G_f	390		G_f	383	

Z výsledkov zaznamenaných v tabuľke 2 je vidno, že na 3. deň bolo v priemere v miskách ošetrených PAW vyklíčených o 5 semien viac ako v kontrole. Výsledky z 5. dňa experimentu zaznamenali v priemere o 1,8 semien viac vyklíčených v ošetrených miskách ako v kontrole.

Tabuľka 3. Vypočítané parametre klíčivosti v destilovanej vode aktivovanej DBD

Vzorka	G [%]	GE [%]	GR [%]	RGR [%]
PAW	97,5	93,3	95,6	103,8
Kontrola	95,8	88,3	92,2	

Vypočítané hodnoty v tabuľke 3 naznačujú, že ošetrením vzorky aktivovanou vodou sa oproti kontrole zvýšila celková klíčivost' (G) o 1,8 %, energia klíčenia (GE) o 5,0 % a rýchlost' klíčenia (GR) o 3,5 %. Hodnota relatívnej rýchlosti klíčenia (RGR) je 103,8 %, čo znamená že v oštrenej vzorke klíčili semená rýchlejšie.

Tabuľka 4. Výsledky experimentu klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej DBD

3. deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	88	12	1.	82	18
2.	89	11	2.	84	16
3.	91	9	3.	92	8
4.	86	14	4.	83	17
Priemer	88,5 ± 1,8	11,5 ± 1,8	Priemer	85,3 ± 4,0	14,8 ± 4,0
G_t	354		G_t	341	
5. deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	99	1	1.	91	9
2.	96	4	2.	95	5
3.	95	5	3.	98	2
4.	99	1	4.	94	6
Priemer	97,3 ± 1,8	2,8 ± 1,8	Priemer	94,5 ± 2,5	5,5 ± 2,5
G_f	389		G_f	378	

Výsledky zaznamenané v tabuľke 4 ukazujú, že na 3. deň bolo v priemere v miskách ošetrovaných PAW vyklíčených o 3,3 semien viac ako v kontrole. V prípade PAW pripravenej z kohútikovej vody bolo v priemere na 3. deň vyklíčených o 4,8 menej semien ako v PAW pripravenej z destilovanej vody. Výsledky z 5. dňa experimentu zaznamenali v priemere o 2,8 semien viac vyklíčených v ošetrovaných miskách ako v kontrole, oproti PAW pripravenej z destilovanej vody vyklíčiilo celkovo v priemere o 0,3 menej semien v PAW z kohútikovej vody.

Tabuľka 5. Vypočítané parametre klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej DBD

Vzorka	G [%]	GE [%]	GR [%]	RGR [%]
PAW	97,3	88,5	91,0	100,9
Kontrola	94,5	85,3	90,2	

Vypočítané hodnoty v tabuľke 5 naznačujú tak ako v prípade destilovanej vody, že ošetrovaním vzorky aktivovanou kohútikovou vodou sa zvýšila celková klíčivosť (G) o 2,3 %, energia klíčenia (GE) o 3,3 % a rýchlosť klíčenia (GR) o 0,8 %. Hodnota relatívnej rýchlosti klíčenia (RGR) je 100,9 %, čo tak ako v prípade PAW z destilovanej vody znamená, že v ošetrovej vzorke klíčili semená o niečo rýchlejšie.

Medzi PAW pripravenou z destilovanej a kohútikovej vody bol rozdiel v celkovej klíčivosti (G) 0,3 %, energii klíčenia (GE) o 4,8 % a rýchlosti klíčenia (GR) o 4,6 %. Hodnota relatívnej klíčivosti (RGR) sa zmenšila vo vzorke ošetrovej PAW pripravenej z kohútikovej vody o 2,9 % oproti PAW pripravenej z destilovanej vody.

Voda aktivovaná plazmovou tryskou vo vode

Tabuľka 6. Výsledky experimentu klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej plazmovou tryskou

3.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	91	9	1.	88	12
2.	89	11	2.	86	14
3.	93	7	3.	84	16
4.	87	13	4.	85	15
Priemer	90,0 ± 2,2	10,0 ± 2,2	Priemer	85,8 ± 1,5	14,3 ± 1,5
G_t	360		G_t	343	
5.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	97	3	1.	95	5
2.	97	3	2.	92	8
3.	98	2	3.	96	4
4.	98	2	4.	94	6
Priemer	97,5 ± 0,5	2,5 ± 0,5	Priemer	94,3 ± 1,5	5,8 ± 1,5
G_f	390		G_f	377	

V prípade vody aktivovanej plazmovou tryskou nebol pokus prevedený pre destilovanú vodu, preto bola porovnávaná kontrola z kohútikovej vody a PAW pripravenej taktiež z kohútikovej vody. Aj napriek tomu je vidno z tabuľky 6 že na 3. deň bolo vyklíčených o 4,3 semien v priemere viacej ako v prípade kontroly. Na záver pokusu v 5. deň bol rozdiel medzi kontrolou a PAW v priemere 3,3 semien.

Tabuľka 7. Vypočítané parametre klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej plazmovou tryskou

Vzorka	G [%]	GE [%]	GR [%]	RGR [%]
PAW	97,5	90,0	92,3	101,5
Kontrola	94,3	85,8	91,0	

Vypočítané parametre klíčivosti v tabuľke 7 ukazujú zvýšenie klíčivosti (G) v ošetrenej vzorke o 3,3 % a rýchlosti klíčenia (GR) o 1,1 %. Pomerne veľký rozdiel vyklíčených semien na 3. deň spôsobil nárast energie klíčenia v ošetrenej vzorke o 4,3 %. Relatívna rýchlosť klíčenia (RGR) je 101,5 %. Táto hodnota je približne rovnaká ako v prípade kohútikovej vody aktivovanej DBD.

Voda aktivovaná prebublaním produktov dielektrického bariérového výboja

Tabuľka 8. Výsledky experimentu klíčivosti v destilovanej vode aktivovanej prebublaním produktov dielektrického bariérového výboja

3.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	88	12	1.	87	13
2.	86	14	2.	89	11
3.	94	6	3.	93	7
4.	96	4	4.	94	6
Priemer	91,0 ± 4,1	9,0 ± 4,1	Priemer	90,8 ± 2,9	9,3 ± 2,9
G_t	364		G_t	363	
5.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	95	5	1.	94	6
2.	98	2	2.	95	5
3.	98	2	3.	98	2
4.	99	1	4.	96	4
Priemer	97,5 ± 1,5	2,5 ± 1,5	Priemer	95,8 ± 1,5	4,3 ± 1,5
G_f	390		G_f	383	

Výsledky v tabuľke 8 pre destilovanú vodu aktivovanú prebublaním produktov DBD ukazujú, že na 3. deň bol rozdiel vyklíčených semien medzi kontrolou a PAW takmer zanedbateľný, keď v priemere v kontrole vyklíčilo len o 0,3 semien menej. Taktiež na 5. deň bol pozorovaný rozdiel vyklíčených semien v priemere 1,8, čo je v porovnaní s prechádzajúcimi systémami menej.

Tabuľka 9. Vypočítané parametre klíčivosti v destilovanej vode aktivovanej prebublaním produktov dielektrického bariérového výboja

Vzorka	G [%]	GE [%]	GR [%]	RGR [%]
PAW	97,5	91,0	93,3	98,5
Kontrola	95,8	90,8	94,8	

Hodnoty vypočítané v tabuľke 8 ukazujú zvýšenie celkovej klíčivosti (G) o 1,8 %, ale v prípade hodnoty energie klíčivosti (GE) je tento rozdiel 0,3 % čo je takmer zanedbateľné v porovnaní s kontrolou. Parameter rýchlosti klíčenia (GR) bol v kontrolnej vzorke o 1,5 % väčší ako v PAW, a teda sa zmenila aj hodnota relatívnej rýchlosti klíčenia (RGR) na hodnotu 98,5 % čo naznačuje že v kontrolnej vzorke klíčili semená rýchlejšie.

Tabuľka 10. Výsledky experimentu klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej prebublaním produktov dielektrického bariérového výboja

3.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	95	5	1.	89	11
2.	93	7	2.	91	9
3.	93	7	3.	96	4
4.	94	6	4.	90	10
Priemer	93,8 ± 0,8	6,3 ± 0,8	Priemer	91,5 ± 2,7	8,5 ± 2,7
G_t	375		G_t	366	
5.deň					
PAW			Kontrola		
č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené	č. misky	Vyklíčené	Nevyklíčené
1.	97	3	1.	91	9
2.	96	4	2.	97	3
3.	99	1	3.	97	3
4.	100	0	4.	93	7
Priemer	98,0 ± 1,6	2,0 ± 1,6	Priemer	94,5 ± 2,6	5,5 ± 2,6
G_f	392		G_f	378	

Použitím kohútikovej vody na prípravu PAW prebublaním produktov DBD, sa rozdiely medzi PAW a kontrolou v priemere vyklíčených semien zväčšili. Ako ukazujú hodnoty v tabuľke 10 na 3. deň bolo v priemere v PAW vyklíčených o 2,3 semien viac. V porovnaní s PAW pripravenej z destilovanej vody bolo na 3. deň v PAW pripravenej z kohútikovej vode o 2,8 vyklíčených semien viac.

Tabuľka 11. Vypočítané parametre klíčivosti v kohútikovej vode aktivovanej prebublaním produktov dielektrického bariérového výboja

Vzorka	G [%]	GE [%]	GR [%]	RGR [%]
PAW	98,0	93,8	95,7	98,8
Kontrola	94,5	91,5	96,8	

Hodnoty v tabuľke 11 ukazujú, že po aplikácii PAW na vzorku sa celková klíčivosť semien (G) zvýšila o 3,5 % a taktiež hodnota energie klíčivosti (GE) sa zvýšila o 2,3 %. Naopak podobne ako v prípade použitia destilovanej vody na prípravu PAW, bola v kontrolnej vzorke väčšia rýchlosť klíčenia (GR) o 1,8 %. Z toho vyplýva, že semená rýchlejšie klíčili v kontrolnej vzorke, čo potvrdzuje aj hodnota relatívnej rýchlosti klíčenia (RGR) 98,8 %.

Značný rozdiel bol pri porovnaní PAW pripravenej z destilovanej a kohútikovej vody. V kohútikovej PAW sa zvýšila energia klíčenia (GE) o 2,8 % a rýchlosť klíčenia (GR) o 2,3 %. Hodnota relatívnej klíčivosti (RGR) sa zväčšila vo vzorke ošetrenej PAW pripravenej z kohútikovej vody o 0,3 % oproti PAW pripravenej z destilovanej vody. Hodnota celkovej klíčivosti (G) sa v PAW zvýšila o 0,6 %, čo nie je až taký veľký rozdiel.

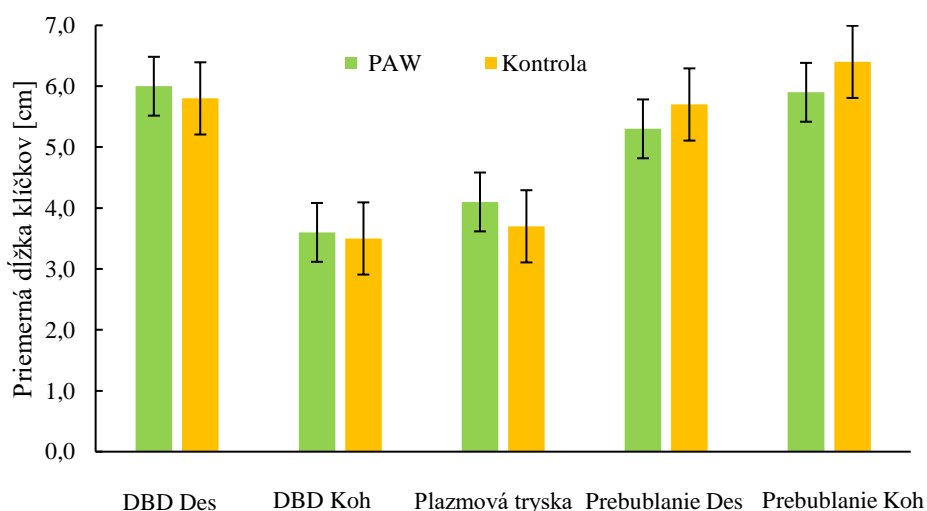
4.3 Vplyv PAW na rast klíčkov pšenice

Vyhodnocovanie vplyvu na rast klíčkov prebiehalo na súbore 25 semien v deň ukončenia pokusu, teda na 6. deň, kde boli pravítkom odmerané všetky vyklíčené klíčky, z nich bol následne pre porovnanie vytvorený priemer.

Tabuľka 12. Priemerné hodnoty dĺžky klíčkov pre rôzne druhy PAW

Typ PAW	Dĺžka klíčkov [cm]		PAW/Kontrola [%]
	PAW	Kontrola	
Destilovaná voda aktivovaná DBD	6,0 ± 2,1	5,8 ± 2,0	103,4
Kohútiková voda aktivovaná DBD	3,6 ± 1,5	3,5 ± 1,4	102,9
Kohútiková voda aktivovaná plazmovou tryskou	4,1 ± 1,1	3,7 ± 1,3	110,1
Destilovaná voda aktivovaná prebublaním produktov DBD	5,3 ± 1,8	5,7 ± 1,8	93,0
Kohútiková voda aktivovaná prebublaním produktov DBD	5,9 ± 2,1	6,4 ± 1,4	92,2

Z tabuľky 12 je možné vidieť, že najväčší vplyv na rast klíčkov oproti kontrole mala voda aktivovaná pomocou plazmovej trysky, kde je pozorovaný rozdiel v dĺžke v priemere na úrovni 0,4 cm. Zároveň je však taktiež možné vidieť v percentuálnom porovnaní, že oba prípady použitia vody aktivovanej prebublaním produktov DBD nemali pozitívny vplyv na rast klíčkov, pretože v kontrole v oboch prípadoch ako u destilovanej tak u kohútikovej vody boli v priemere dlhšie klíčky. V kontrolnej kohútikovej vode sú v priemere o 0,5 cm dlhšie klíčky v porovnaní s vodou aktivovanou prebublaním produktov a v kontrolnej destilovanej vode sú v priemere dlhšie o 0,4 cm. Pri porovnaní jednotlivých PAW má najväčší vplyv systém DBD, kde bola použitá destilovaná voda, tu klíčky dosiahli v priemere dĺžku 6,0 cm. Pozorovaný vplyv na rast klíčkov bol pre väčšiu prehľadnosť v rozdieloch medzi kontrolou a PAW vyneseny aj do grafu (obrázok 12).



Obrázok 12. Porovnanie priemernej dĺžky klíčkov medzi kontrolou a PAW (Des – destilovaná voda; Koh – kohútiková voda)

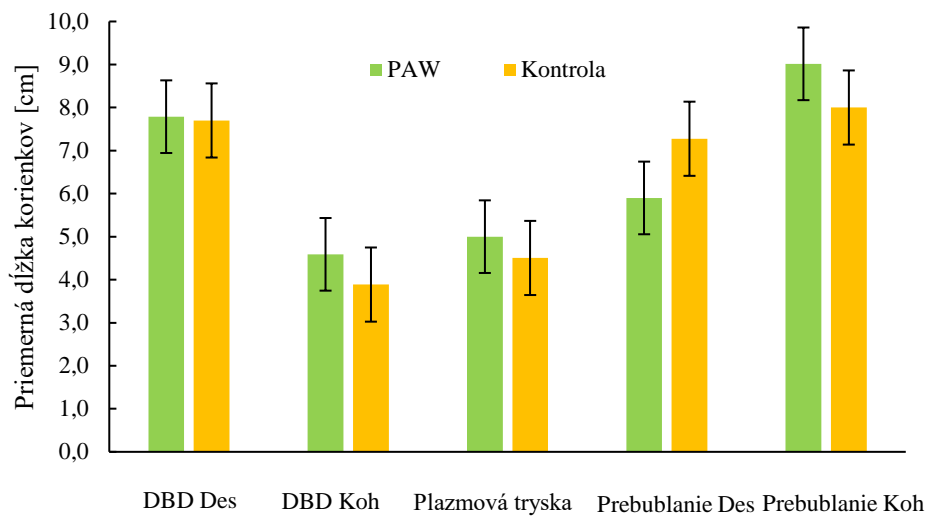
4.4 Vplyv PAW na inhibíciu korenkov pšenice

Sledovanie vplyvu PAW na inhibíciu korenkov bolo prevedené taktiež na súbore 25 vyklíčených semien. Vzhľadom na to, že študovaná plodina (pšenica) mala v deň ukončenia pokusu (6. deň) 3 korenky, tak boli zmerané všetky 3, a z nich bol následne vyhodnotený priemer. Tieto priemerné hodnoty boli použité na vyhodnotenie inhibície alebo stimulácie.

Tabuľka 13. Priemerné hodnoty dĺžky korenkov a vypočítané hodnoty stimulácie alebo inhibície pre rôzne druhy PAW

Typ PAW	Dĺžka korenku [cm]		I [%]	I	
	PAW	Kontrola			
Destilovaná voda aktivovaná DBD	7,8 ± 3,3	7,7 ± 3,2	-1,1	I < 0	Stimulácia
Kohútiková voda aktivovaná DBD	4,6 ± 2,0	3,9 ± 1,9	-18,1	I < 0	Stimulácia
Kohútiková voda aktivovaná plazmovou tryskou	5,0 ± 1,4	4,5 ± 1,9	-11,0	I < 0	Stimulácia
Destilovaná voda aktivovaná prebubláním produktov DBD	5,9 ± 2,9	7,3 ± 2,2	18,9	I > 0	Inhibícia
Kohútiková voda aktivovaná prebubláním produktov DBD	9,0 ± 3,3	8,0 ± 2,2	-12,7	I < 0	Stimulácia

Zaznamenané hodnoty v tabuľke 13 ukazujú najväčší vplyv vody aktivovanej prebubláním produktov do kohútikovej vody, kde je rozdiel medzi kontrolou a PAW na úrovni 1,0 cm v priemere. Z tejto hodnoty následne vyplýva aj vypočítaná hodnota $I = -12,7\%$, čo znamená stimuláciu korenkov v ošetrenej vzorke, a teda rast korenkov tu bol podporený. Najväčšia hodnota $I = -18,1\%$, kde išlo taktiež o výraznú stimuláciu rastu korenkov, bola zaznamenaná vo vzorke ošetrenej PAW pripravenej z kohútikovej vody pomocou DBD. Vo vzorke ošetrenej PAW pripravenou prebubláním produktov DBD do destilovanej vody bola zaznamenaná dlhšia priemerná hodnota v kontrole ako v PAW. Následná vypočítaná pozitívna hodnota $I = 18,9\%$, značila že v tejto vzorke ide o inhibíciu. Išlo o jedinú vzorku s inhibíciou, v ostatných vzorkách boli pozorované celkom vysoké hodnoty stimulácie rastu korenkov, tam kde bola použitá PAW. Priemerné hodnoty dĺžok korenkov boli pre väčšiu prehľadnosť v rozdieloch medzi PAW a kontrolou vynesené do grafu (obrázok 13).



Obrázok 13. Porovnanie priemernej dĺžky korenkov medzi kontrolou a PAW (Des – destilovaná voda; Koh – kohútiková voda)

5 ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo pripraviť plazmaticky aktivovanú vodu a následne preskúmať jej vplyv na klíčivosť semien a kvalitu vybranej plodiny. Obecne sa už takéto pokusy s PAW robili, ale jednak každý používa iný typ PAW, a taktiež voľba rastlinného materiálu je rôzna. Pozitívny vplyv PAW bol už potvrdený napríklad na šaláte, hrachu alebo rajčiaku[30][31][32].

V mojom prípade boli na skúmanie tohto vplyvu využité semená jednej z najpestovanejších plodín rastliny pšenice (*Triticum*). Pomocou stanovených parametrov klíčivosti bol vyhodnocovaný vplyv na klíčivosť. Pre stanovenie vplyvu na kvalitu plodiny bol využitý test inhibície korienkov, kvalita klíčkov bola vyhodnotená aritmetickým priemerom zmeraných dĺžok klíčkov. Vďaka výsledkom týchto testov by PAW mohla mať veľký význam do budúcnosti pre poľnohospodárstvo, kde by sa PAW mohla začať využívať ako stimulátor klíčenia semien alebo náhrada syntetických hnojív a pesticídov. Prínosom mojej štúdie je porovnanie troch druhov PAW z odlišných plazmových systémov a pozorovanie ich rozdielneho vplyvu na jednej rastline.

Testy boli prevedené pre destilovanú aj kohútikovou vodu aktivovanú tromi rôznymi plazmovými systémami, ktoré poskytujú rôzne chemické zloženie. V prípade aktivácie vody plazmovou tryskou, ktorá generuje plazmu priamo vo vode, bola použitá iba kohútiková voda, a to z dôvodu nedostatočnej vodivosti destilovanej vody. Naproti PAW bola vždy vykonaná kontrolná vzorka s nepracovanou vodou kvôli porovnaniu. Z výsledkov vyplýva, že aplikáciou všetkých druhov PAW na semená sa zvýšila celková klíčivosť semien a taktiež bolo urýchlené naštartovanie klíčenia vyjadrené energiou klíčivosti. V prípade rýchlosti klíčenia došlo k navýšeniu oproti kontrole iba v prípade použitia vody aktivovanej DBD a plazmovej trysky. Vzhľadom na výrazne zvýšený obsah peroxidu vodíka v PAW pripravenej plazmovou tryskou sa nepotvrdilo, že by klíčili semená najrýchlejšie v porovnaní s ostatnými. Výsledky inhibície a stimulácie korienkov ukazujú predpokladaný stimulačný účinok PAW na rast korienkov. Napriek tomu sa v prípade použitia PAW pripravenej z destilovanej vody aktivovanej prebublávaním produktov DBD vyskytol inhibičný účinok. Vyhodnotenie vplyvu na rast klíčkov prinieslo opäť aj pozitívne aj negatívne výsledky. V oboch vzorkách ošetrených PAW pripravenou prebublávaním produktov DBD boli klíčky v kontrole menšie. Naopak v ostatných použitých PAW boli klíčky v priemere o niečo väčšie. Zvýšené množstvo dusičnanov, dusitanov ale aj peroxidu vodíka v PAW pripravenej pomocou DBD z kohútikovej vody viedlo k pozitívnemu vplyvu na kvalitu plodiny. Naopak v prípade PAW pripravenej prebublávaním produktov DBD bol pozorovaný skôr negatívny vplyv na kvalitu plodiny, a to znamená, že iba zvýšením obsahu dusičnanov nebol dosiahnutý pozitívny efekt, a je potrebná súhra všetkých troch častíc. Celkovo teda zistené výsledky naznačujú pozitívny vplyv na klíčivosť a ďalšie parametre spojené s klíčivosťou. Taktiež je pozorovaný pozitívny vplyv na kvalitu plodiny, ale nie pre všetky použité druhy PAW.

Keďže sa jedná o poľnohospodársku plodinu, tak pre ďalšie posúdenie vplyvu PAW na klíčivosť a na kvalitu plodiny by mal byť pokus zopakovaný ešte niekoľko krát, aby sa tento vplyv potvrdil. Po potvrdení pozitívneho vplyvu v laboratórnom merítku na Petriho miske by

mal nasledovať presun pokusu do nádobových experimentov v pôde, aby bol pozitívny vplyv overený aj v inom prostredí ako na filtračnom papieri, pretože PAW môže pôsobiť inak. Výsledky potvrdili pozitívny vplyv PAW, ale iba v malej miere. Pri zvolení náročnejšej plodiny (napr. repka olejná) by mohol byť vplyv PAW na sledované parametre výraznejší. Vzhľadom na elektrickú energiu využívanú pri generácii plazmy je taktiež otázka, či pre bežné komerčné použitie nebude zo začiatku príliš finančne náročné používanie PAW. Samotná prevádzka použitých systémov je však oproti obstarávacím nákladom výrazne nižšia.

Napriek tomu ak bude overený pozitívny vplyv, PAW má potenciál v budúcnosti ekologicky nahradiť stimulatory klíčivosti, pesticídy a synteticky používané hnojivá, čo by malo vyrovnať náklady na elektrickú energiu. Tieto vlastnosti aktivovanej vody môžu byť využité pri vízii tzv. hydroponického pestovania plodín.

6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] GOLDSTON, Robert J a Paul H RUTHERFORD, 1997. *Introduction to plasma physics*. 2. dopl. vyd. Bristol: Institute of Physics Publishing, 491 s. + 2 diskety. ISBN 0-7503-0183-X.
- [2] CHEN, Francis F a Jane P CHANG, 2002. *Lecture notes on principles of plasma processing*. 2nd ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 208 s. : + 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 0-306-47497-2.
- [3] *Introduction of Plasma* [online], 2020. Chengdu, Čína [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/150777238>
- [4] CONRADS, H.; SCHMIDT, M. Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, 2000, 9.4: 441.
- [5] INAN, Umran S. a Marek GOŁKOWSKI, 2011. *Principles of plasma physics for engineers and scientists*. 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, xiv, 270 s. : il. ISBN 978-0-521-19372-6.
- [6] *Plasmochemické reakce* [online]. IS MUNI [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/77987/prif_m/plasmochemie.pdf
- [7] *Nizkoteplotná plazma* [online]. Dostupné také z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_22_pla.php
- [8] MARTIŠOVITŠ, Viktor, 2006. *Základy fyziky plazmy: učebný text pre magisterské štúdium*. Bratislava: Univerzita Komenského, 189 s. : il. ISBN 80-223-1983-X.
- [9] *Princip magnetronového naprašování* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0040~~84sPC1FITcksAQA.pdf?redirected>
- [10] *What are stars made of?* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/space-environment/2-what-are-stars-made-of.html>
- [11] *Spectral Lamp - Noble Gas - Neon* [online]. [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <http://www.lamptech.co.uk/Spec%20Sheets/D%20SP%20Philips%20LL%20Ne.htm>
- [12] ZHOU, Renwu, et al. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53.30: 303001.
- [13] KAUSHIK, Nagendra Kumar, et al. Biological and medical applications of plasma-activated media, water and solutions. *Biological chemistry*, 2019, 400.1: 39-62.
- [14] THIRUMDAS, Rohit, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in food science & technology*, 2018, 77: 21-31.
- [15] LIANG, Jian-Ping, et al. Comparison of gas phase discharge and gas-liquid discharge for water activation and methylene blue degradation. *Vacuum*, 2020, 181: 109644.

- [16] BRISSET, Jean-Louis; PAWLAT, Joanna. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36.2: 355-381.
- [17] MAI-PROCHNOW, Anne, et al. Interactions of plasma-activated water with biofilms: Inactivation, dispersal effects and mechanisms of action. *NPJ biofilms and microbiomes*, 2021, 7.1: 1-12.
- [18] MAI-PROCHNOW, Anne, et al. Microbial decontamination of chicken using atmospheric plasma bubbles. *Plasma Processes and Polymers*, 2021, 18.1: 2000052.
- [19] ZHOU, Renwu, et al. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53.30: 303001.
- [20] GUO, Dingmeng, et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021.
- [21] ZHAO, Yi-Ming, et al. Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19.6: 3951-3979.
- [22] Seed germination. Shutterstock [online]. Shutterstock [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/search/wheat+seed+germination>
- [23] Holganix, 2017. Holganix [online]. USA: Holganix [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.holganix.com/blog/what-are-plant-growth-promoting-bacteria>
- [24] ISO 17126:2005. *Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Screening test for emergence of lettuce seedlings (Lactuca sativa)*.
- [25] ŠERÁ, Božena. KLÍČIVOST SEMEN JAKO BĚŽNÝ TEST V BOTANICKÉM POZOROVÁNÍ, ŠLECHTĚNÍ A EXPERIMENTECH.
- [26] KRČMA, F., et al. Characterization of novel pin-hole based plasma source for generation of discharge in liquids supplied by DC non-pulsing voltage. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, 27.6: 065001.
- [27] KRČMA, F.; Vysoké učení technické v Brně: Systém trysky pro generování plazmatu v kapalinách. 305304, patent. (2015)
- [28] KRČMA, F.; Vysoké učení technické v Brně: Method for plasma generation in liquids using jet system. EP3122161B1, patent. (2019)
- [29] ŠINDELKOVÁ, Kateřina. *Charakterizace plazmatem aktivované vody pro biomedicínské aplikace*. 2022. Diplomová práce, Fakulta chemická VUT v Brně
- [30] STOLERU, Vasile, et al. Plant growth promotion effect of plasma activated water on *Lactuca sativa* L. cultivated in two different volumes of substrate. *Scientific Reports*, 2020, 10.1: 1-13.

- [31] PUNITH, N., et al. Plasma activated water generation and its application in agriculture. *Advanced Materials Letters*, 2019, 10.10: 700-704.
- [32] RATHORE, Vikas; TIWARI, Budhi Sagar; NEMA, Sudhir Kumar. Treatment of Pea Seeds with Plasma Activated Water to Enhance Germination, Plant Growth, and Plant Composition. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2021, 1-21.

7 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

ABA – Kyselina abscisová (*Abscisic acid*)

BVK – Brnenské vodárny a kanalizace a.s

DBD – Dielektrický bariérový výboj (*Dielectric barrier discharge*)

DC – Jednosmerný prúd (*Direct current*)

e – Náboj elektrónu

E – Redoxný potenciál

ε_0 – Permittivita vakua

EF – Elektrické pole (*Electric field*)

G – Klíčivosť semien (*Germination*)

GE – Energia klíčivosti (*Germination energy*)

G_f – Počet vyklíčených semien na 5. deň

GR – Rýchlosť klíčenia (*Germination rate*)

GR_{co} – Rýchlosť klíčenia kontrolného vzorku

GR_r – Rýchlosť klíčenia ošetrovaného vzorku

G_t – Počet vyklíčených semien na 3. deň

I – Inhibícia rastu koreňa

k_B – Boltzmannova konštanta

L – Rozmer systému

λ – Vlnová dĺžka

λ_D – Debyeova dĺžka

L_c – Dĺžka koreňa kontroly

L_v – Dĺžka koreňa vzorku

$M^+, M\bullet$ – Ión a radikál neutrálneho plynu

n – Počet nabitých častíc

ν_{eN} – Zrážková frekvencia

N_D – Počet častíc v Debyeovej sfére

ω – Frekvencia oscilácii plazmy

PAW – Plazmaticky aktivovaná voda (*Plasmatic activated water*)

q_e – Náboj elektrónu

RGR – Relatívna rýchlosť klíčenia (*Relative germination rate*)

RNS – Reaktívne častice dusíka (*Reactive nitrogen species*)

RONS – Reaktívne častice kyslíka a dusíka (*Reactive nitrogen and oxygen species*)

ROS – Reaktívne častice kyslíka (*Reactive oxygen species*)

S – Celkový počet semien

τ – Stredná doba medzi zrážkami

T_e – Teplota elektrónov

UV-Vis – Ultrafialovo-viditeľná spektrometria (*Ultraviolet - Visible spectrometry*)