

Využití ozonu v potravinářském průmyslu

Tomáš Gryger

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav technologie potravin

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Tomáš Gryger
Osobní číslo: T19102
Studijní program: B0721A210002 Technologie a hodnocení potravin
Specializace: Technologie potravin
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Využití ozonu v potravinářském průmyslu

Zásady pro vypracování

Teoretická část

1. Vliv ozonu na potraviny a jejich skladování.
2. Princip účinku ozonu.
3. Možnosti využití ozonu při nakládání s potravinami.

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

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pandiselvam, R., Subhashini, S., Priya, E. P., Banuu et al. (2019) Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety. *Ozone-Science & Engineering*, 41, 17-34
- [2] Brodowska, A.J., Nowak, A. & Smigielski, K. (2018) Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58, 2176-2201
- [3] Kim, J.G., Yousef, A.E. & Dave, S. (1999) Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: A review. *Journal of Food Protection*, 62, 1071-1087

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Stěnička, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **31. prosince 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Robert Gál, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 25. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Hlavním cílem bakalářské práce je zmapovat možná využití ozonu v různých oblastech potravinářského průmyslu. Pozornost je věnována i širším historickým, legislativním, toxikologickým a technickým souvislostem, které spoluutváří celkový pohled na tuto problematiku. Jelikož je ozon silné biocidní činidlo, je těžištěm většiny jeho aplikací eliminace mikroorganismů, popř. škůdců. Kromě toho jsou v práci popsána méně známá nasazení ve vztahu k úpravě vlastností surovin a potravin nebo degradaci chemických kontaminantů. Netoxický rozklad ozonu a další benefity plynoucí z jeho vlastností ho činí perspektivní alternativou k tradičním sanitačním prostředkům. Zmíněny jsou také deteriorativní účinky ozonizace na potraviny i obalové materiály.

Klíčová slova: dezinfekce; mikroorganismy; ozon; ozonizovaná voda; potravinářský průmysl

ABSTRACT

The main goal of the bachelor thesis is to map the possible uses of ozone in various areas of the food industry. Attention is also paid to broader historical, legislative, toxicological and technical contexts that co-form the overall view of this issue. Since ozone is a strong biocidal agent, the focus of most applications is the elimination of microorganisms, or. pests. In addition, lesser-known applications are described in relation to the modification of the properties of raw materials and food or the degradation of chemical contaminants. Non-toxic decomposition of ozone and other benefits resulting from its properties make it a promising alternative to traditional sanitary substances. Deteriorative effects of ozonation on food and packaging materials are also mentioned.

Keywords: disinfection; microorganisms; ozone; ozonated water; food industry

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinovi Stěničkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a podnětné připomínky, které mi poskytl v průběhu zpracování této práce. Zároveň bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA OZONU	10
2 OZON V ATMOSFÉŘE	12
3 HISTORIE	13
3.2 OZON PŘI ÚPRAVĚ VODY	14
3.3 OZON V POTRAVINÁŘSTVÍ, LÉKAŘSTVÍ A JINÝCH OBORECH.....	14
4 LEGISLATIVA V EU	17
5 TOXIKOLOGIE	19
5.2 TOXOKINETIKA	19
5.3 AKUTNÍ TOXICITA	20
5.4 CHRONICKÁ TOXICITA.....	20
5.5 PŘÍPUSTNÉ KONCENTRAČNÍ LIMITY PRO OBYVATELSTVO.....	21
6 TVORBA OZONU	22
6.1 DIELEKTRICKÝ BARIÉROVÝ VÝBOJ (DBD).....	22
6.2 FOTOHEMICKÁ METODA (UV ZÁŘENÍ)	25
7 APLIKACE OZONU	27
7.1 PŘEVOD OZONU DO VODY.....	27
7.1.1 Metoda Venturiho injektoru.....	27
7.1.2 Metoda difuzéru jemných bublin	28
7.2 STAVBA OZONIZAČNÍCH SYSTÉMŮ	28
7.3 MONITOROVÁNÍ KONCENTRACE OZONU	29
8 MECHANIZMY REAKCE	30
8.1 PŘÍMÁ REAKCE	30
8.2 NEPŘÍMÁ REAKCE.....	30
8.2.1 Iniclace	30
8.2.2 Propagace	31
8.2.3 Terminace.....	31
9 ANTIMIKROBIÁLNÍ ÚČINEK	32
9.1 BAKTERIE.....	32
9.2 VIRY.....	32
9.3 PRVOCI.....	32
10 VYUŽITÍ OZONU V POTRAVINÁŘSTVÍ	33
10.1 OVOCE A ZELENINA	33
10.2 OVOCNÉ A ZELENINOVÉ ŠŤÁVY	35

10.3	ÚPRAVA BALENÝCH VOD.....	36
10.4	UMĚLÉ STAŘENÍ ALKOHOLICKÝCH NÁPOJŮ	37
10.5	ZPRACOVÁNÍ OBILOVIN	38
10.6	MLÉKO A MLÉČNÉ VÝROBKY.....	39
10.7	PRODUKCE MASA	41
10.8	ZPRACOVÁNÍ RYB.....	43
10.9	SANITACE POVRCHŮ A ZAŘÍZENÍ	44
10.10	ODPADNÍ VODA	47
10.11	ODSTRAŇOVÁNÍ PACHŮ.....	48
10.12	DEGRADACE PESTICIDŮ.....	48
10.13	DEGRADACE MYKOTOXINŮ	49
10.14	PLASTOVÉ OBALOVÉ MATERIÁLY	50
10.15	INOVATIVNÍ OZONOVÉ TECHNOLOGIE.....	50
	ZÁVĚR	53
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	68

ÚVOD

I když je ozon v podobě ozonové vrstvy nezbytnou podmínkou života na Zemi, byl vědcům dlouhou dobu neznámý. Až od 40. let 19. stol., kdy byl ozon objeven a vědecky popsán, se začalo rozvíjet jeho studium. Význačné oxidační účinky této plynné látky byly předmětem mnoha experimentů. Rozsáhlé mikrobiologické studie vyústily na přelomu 19. a 20. stol. k vybudování několika úpraven vod, kde se ozon uplatňoval jako již dobře známé a prověřené dezinfekční činidlo. [1–2]

V potravinářství se od skromných pokusů postupně přecházelo k širšímu využití jak plynného ozonu, tak ozonizované vody. Kromě úspěšného nasazení v rámci dezinfekce výrobních zařízení, prostor a skladů se hledaly způsoby, jak pomocí ozonu zlepšit či pozměnit vlastnosti surovin a potravin. Již od 2. poloviny 19. stol. lze zaznamenat roli ozonu při urychlování zrání destilátů nebo úpravě olejů a dalších materiálů. [2, 4]

Aplikace ozonu přímo na potravinářské suroviny a potravin vede ke snížení povrchové mikroflóry a omezení výskytu škůdců, což se projevuje prodloužením trvanlivosti a zvýšením jejich bezpečnosti. [5, 6]

Ozon je vzhledem ke své silné oxidační schopnosti považován za širokospektrální dezinfekční prostředek, u kterého je oceňován jeho rozklad bez zanechání vlastních reziduí. Tato zjištění vedla na přelomu milénia k uznání ozonu jako pomocné látky při výrobě potravin, a nastal tak celosvětový rozmach ozonizačních technologií. Výrobci potravin tento způsob ošetření považují za šetrný jak k potravinám, tak i k životnímu prostředí, jelikož ozon může nahrazovat halogenové a ostatní dezinfekční prostředky. Ozonizace se rozšířila do oblastí zpracování ovoce a zeleniny, obilovin, masa, ryb, mléka nebo nápojů. [7, 8]

Na poptávku ozonové technologie reaguje řada specializovaných firem. K dostání jsou mobilní generátory, směšovací zařízení pro tvorbu ozonizované vody i komplexní řešení pro velké potravinářské podniky s centrální tvorbou ozonu a jeho rozvodem. [7]

Je třeba dodat, že ozon je toxická látka, která poškozují dýchací trakt a plíce. Proto je vždy nutné dbát na ochranu zdraví zaměstnanců a dodržování přípustných expozičních limitů. [9]

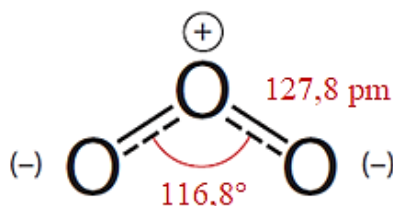
1 CHARAKTERISTIKA OZONU

Ozon (O_3) je alotropická modifikace kyslíku tvořená jeho třemi atomy. Za normálních podmínek se jedná o plyn těžší než vzduch s charakteristickým zápachem. Ve srovnání s dvouatomovou molekulou kyslíku je ozon velmi nestabilní a rychle se rozkládá na molekulu kyslíku O_2 . Za nízkých koncentrací je plynný ozon bezbarvý až namodralý. Při koncentraci vyšší než 20 % obj. jde o modrý plyn. Čichem lze ozon detekovat již v koncentracích kolem $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Od koncentrace cca $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lze pach popsat jako příjemně svěží, ve vyšších koncentracích se stává nepříjemně štiplavým. Akutní toxické účinky se začínají projevovat zhruba kolem koncentrace $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [9, 10]

Za atmosférického tlaku a teploty $-111,9 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází ke zkapalnění plynu na tmavě modrou kapalinu. Snížením teploty na $-192,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ozon tuhne a získává tmavě fialovou barvu. Kapalně i pevně skupenství ozonu se po iniciaci explozivně rozkládá za vzniku molekuly dikyslíku. Plynný ozon je v koncentracích nad 10 % obj. rovněž výbušný. Pod tuto hranici je termodynamická nestabilita ozonu charakterizována poločasem rozpadu, který závisí zejména na teplotě a tlaku, ale také na proudění a přítomnosti nečistot a katalyzátorů. Čistý plynný ozon uzavřený v pístu má při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ poločas rozpadu 3 dny. Zvýšením teploty na $40 \text{ }^\circ\text{C}$ klesne poločas rozpadu na 13 hod. [10–12]

Rozpustnost ozonu ve vodě při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a pH 7 je $1,05 \text{ g/L}$ a s rostoucí teplotou výrazně klesá. V rozpuštěném stavu je ozon méně stabilní než ve stavu plynném. Poločas rozpadu rozpuštěného ozonu při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ činí 20 min a zkracuje se s rostoucí teplotou a pH. Čistota vody je také důležitá, neboť ozon reaguje s přítomnými organickými a anorganickými látkami. Ionty kovů v roztoku působí jako katalyzátory jeho rozkladu.

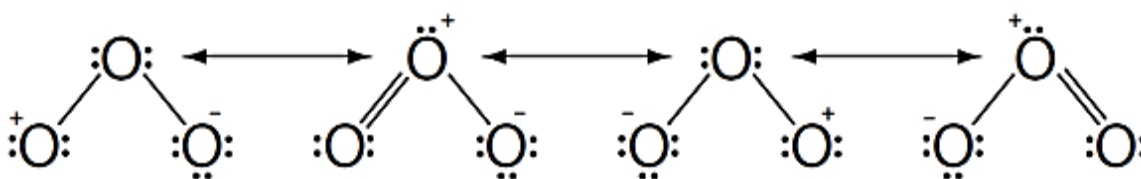
Na základně mikrovlnné spektroskopie bylo experimentálně zjištěno, že molekula ozonu je lomená. Atomy kyslíku tvoří vrcholy pomyslného trojúhelníku s vnitřním úhlem $116,8^\circ$. Vzdálenost mezi nimi byla stanovena na $127,8 \text{ pm}$. Struktura molekuly ozonu je znázorněna na obrázku 1. [10, 12, 13]



Obrázek 1: Struktura molekuly ozonu [10, upraveno]

Molekula je stabilizována rezonancí, což je důvodem její odolnosti vůči rozkladu při nižších teplotách. Molekula představuje rezonanční hybrid mezi čtyřmi možnými strukturami, jak je ilustrováno na obrázku 2. [10]

Ozon má značný dipólový moment s hodnotou 0,54 D, jedná se tak o polární látku. Vysoká reaktivita ozonu je způsobena rozložením nábojů v molekule, přičemž absence elektronů v jednom z koncových atomů kyslíku v některých rezonančních strukturách potvrzuje elektrofilní charakter, zatímco přebytečný záporný náboj přítomný na jiném atomu kyslíku propůjčuje nukleofilní charakter. [14]



Obrázek 2: Rezonanční struktury molekuly ozonu [10]

V tabulce 1 jsou srovnány fyzikální vlastnosti kyslíku a ozonu.

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti ozonu a kyslíku [9, 12, 14]

Parametr	Kyslík	Ozon
Chemická značka	O ₂	O ₃
Molekulová hmotnost	31,999	47,998
Bod varu [°C]	-183,0	-111,9
Bod tání [°C]	-218,8	-192,5
Hustota [kg/m ³] (101,325 kPa, 0 °C)	1,429	2,141
Rozpustnost ve vodě [mg/L] (101,325 kPa, 0 °C)	14,6	1050
Oxidační potenciál [V]	1,23	2,07
Teplota v trojném bodě [°C]	-218,8	-192,5
Tlak v trojném bodě [kPa]	0,146	7,35·10 ⁻⁴
Kritická teplota [°C]	-118,6	-12,2
Kritický tlak [MPa]	5,04	5,57

2 OZON V ATMOSFÉŘE

Ozon je přirozenou součástí ovzduší, kde je zastoupen ve stopovém množství. Přibližně 90 % veškerého ozonu je soustředěno ve stratosféře, která je vymezena 15–50 km nad povrchem Země. Zbývajících 10 % se nachází v troposféře, tj. v nejnižší vrstvě atmosféry sahající do výšky cca 15 km. [15]

Součástí stratosféry je ozonová vrstva, což se pás ve výšce 15 až 35 km vykazující značně zvýšený poměr ozonu vůči dvouatomovému kyslíku. Význam ozonové vrstvy spočívá v absorpci nebezpečného záření z oblasti UV-B, které v nadměrných dávkách způsobuje intenzivní opálení kůže, poškození zraku, a vzhledem ke schopnosti narušovat nukleové kyseliny, také rakovinné bujení. U rostlin negativně ovlivňuje účinnost fotosyntézy. Celkové množství ozonu se udává v Dobsonových jednotkách (D.U.), přičemž 1 D.U. vyjadřuje množství ozonu, které by za normálních podmínek vytvořilo vrstvu silnou 10 μm . Průměrná hodnota nad územím ČR se pohybuje kolem 350 D.U. [15, 16]

Tvorba stratosférického ozonu probíhá hlavně fotodisociací molekul kyslíku působením UV-C záření a rekombinací vznikajících radikálů. Ozon se poté rozkládá působením UV a viditelného záření. [15]

Jelikož do troposféry neproniká dostatek UV-C záření, vznikají zde kyslíkové radikály jako výsledek fotodisociace oxidu dusičitého (NO_2), jehož produkce je spjata se spalováním fosilních paliv. Troposférický (přízemní) ozon je považován za atmosférický polutant, který dráždí sliznice a vyvolává onemocnění dýchací soustavy, u rostlin způsobuje změnu pigmentace listů a zpomalení růstu. Kromě toho se podílí na degradaci pryže, plastů, barev a nátěrů. Nejvyšších hladin dosahuje v letních měsících. Některé organické sloučeniny (VOC, CO, CH_4) zprostředkovávají regeneraci NO_2 , proto je jejich vyšší koncentrace v ovzduší nežádoucí. [15–17]

V 70. letech 20. stol. byly zveřejněny práce upozorňující na narušení ozonové vrstvy vlivem emise halogenovaných uhlovodíků, zejména freonů a halonů, které nacházely široké uplatnění jako chladicí média a hasicí prostředky. Tyto látky jsou chemicky velmi odolné a při úniku do atmosféry katalyticky rozkládají stratosférický ozon. Ve snaze zvrátit trend oslabující se ozonové vrstvy byla v roce 1985 sjednána Vídeňská úmluva na její ochranu. Konkrétní závazky byly stanoveny Montrealským protokolem (1987), jehož cílem bylo postupné vyloučení výroby a spotřeby téměř 100 regulovaných látek. K Montrealskému protokolu doposud přistoupilo 198 států včetně ČR (1990). [16, 18]

3 HISTORIE

3.1 Objev ozonu a jeho rané studium

Ozon poprvé pozoroval v roce 1781 nizozemský chemik M. van Marum, který prováděl experimenty se statickou elektřinou. V popisu svých experimentů zaznamenal pronikavý štiplavý zápach v blízkosti jiskřícího zařízení. Dle jeho slov šlo o „vůni elektřiny“. [1]

Později, v roce 1840 dospěl ke stejnému poznatku Ch. F. Schönbein, který přirovnal tuto „vůni elektřiny“ k zápachu bílého fosforu, když je vystaven vzdušné vlhkosti. Na základě toho sestavil aparaturu, ve které nechal reagovat bílý fosfor s vlhkým vzduchem. Získaný plyn podrobil testům s kovy a barvivy, které potvrdily stejné oxidační účinky jako měl stejně zapáchající plyn vznikající při elektrickém výboji. Schönbein tento plyn nazval ozon podle řeckého slova *ozein* – cítit, vonět. Díky tomu je objev ozonu připisován Schönbeinovi. Vědec též vyvinul jednoduchý způsob měření ozonu ve vzduchu pomocí směsi škrobu a jodidu draselného rozprostřené na papírovém proužku. Výsledkem je odstín fialové barvy porovnávaný se zavedenou stupnicí. I když má test pouze orientační charakter, může napomoci ke zhodnocení stavu atmosféry i v dnešní době, např. při školní výuce. [1, 19]

Na počátku 40. let 19. stol. ještě nebylo jasné, z jakých prvků se molekula ozonu skládá. Vzhledem k tvorbě ozonu ze vzduchu připadal v úvahu kyslík, dusík a vodík. Až v roce 1845, při pokusu přípravy ozonu elektrolýzou čistého kyslíku dokázali J. Ch. G. de Marignac a A. A. de la Rive, že je jistou formou kyslíku. Vzorec ozonu O_3 navrhl T. Andrews a P. G. Tait na základě měření změn koncentrace plynu v soustavě, ve které probíhaly reakce ozonu s různými látkami. Tým molekulový vzorec byl potvrzen J.-L. Sorettem v roce 1865. [1]

V roce 1857 sestrojil W. von Siemens první generátor ozonu, který se skládal z vysokonapětového transformátoru a využíval dielektrický bariérový výboj. [2]

O další rozvoj poznatků o atmosférickém ozonu se zasloužili v roce 1913 Ch. Fabry a H. Buisson objevem ozonové vrstvy učiněného na základě měření vlnových délek slunečního záření. Její vlastnosti podrobně prozkoumal britský meteorolog G. Dobson, který zavedl jednotku pro měření množství ozonu v atmosféře. [20]

Mnoho studií i vlastní zkušenosti vědců dávaly do souvislosti silné oxidační účinky ozonu s jeho negativním působením na živé organizmy. U lidí a zvířat docházelo k dráždění očí a dýchacích cest, což při velkých koncentracích vedlo až ke smrtelným otokům plic. Vliv ozonu na bakterie poprvé zkoumal J. Chappuis, který dokázal, že ozon usmrcuje

kvasinky. Práce W. Ohlmüllera z roku 1891 zmiňuje dramatické zesílení antimikrobiálních účinků ozonu probublávajícího bakteriálními suspenzemi. Také pozoroval snížení účinku v závislosti na rostoucím množství biomasy ve vodě. Ohlmüllerovi závěry otevřely bránu k využití ozonu při úpravě vody. [1]

3.2 Ozon při úpravě vody

Na konci 19. stol. byl ozon dostatečně prozkoumán a začal se využívat v praxi. První aplikace v technickém měřítku se uskutečnila v holandském Oudshoornu v roce 1893 při úpravě pitné vody pocházející z řeky Starý Rýn. Velmi slibné výsledky mikrobiální jakosti i organoleptických vlastností takto upravené vody vedly vedení města Paříže ke zřízení vlastní úpravny Saint-Maur na řece Marně. Tyto úspěšné studie následovala úpravna vody ve francouzské Nice v roce 1906.

Kolem roku 1916 bylo v celé Evropě v provozu 49 ozonových zařízení (26 z nich se nacházelo ve Francii). Tento nárůst však brzy poté zakolísal v důsledku používání nových chlorových sloučenin. Produkce ozonu dosáhla své předchozí úrovně až po 2. světové válce. V roce 1940 se počet ozonových instalací, které se používaly po celém světě, zvýšil pouze na 119. V roce 1977 se tento počet zvýšil na 1 043 ozonových instalací. Více než polovina z nich byla umístěna ve Francii. Kolem roku 1985 byl počet ozonových zařízení odhadován na více než 2 000. [3]

Pro dezinfekci vody je dnes stále preferován chlor před ozonem. Důvodem častého využívání chloru je jeho velká baktericidní účinnost, kterou si zachovává i v malých koncentracích. Ovšem od 70. let 20. stol. se objevuje snaha o minimalizaci dávek chloru do pitné vody a roste význam ozonu. Děje se tak v reakci na objev trihalomethanů (THM), které jsou škodlivými vedlejšími produkty dezinfekce chlorem. Dalším problémem byl nárůst rušivých, obtížně odstranitelných organických mikropolutantů v povrchových vodách. Tyto sloučeniny jsou oxidovány rychleji ozonem než chlorem a jeho sloučeninami. Navíc se ukázalo, že ozon inaktivuje i ty mikroorganismy, které si vyvinou rezistenci vůči dezinfekčním prostředkům, např. oocysty *Cryptosporidium parvum*. [7]

3.3 Ozon v potravinářství, lékařství a jiných oborech

Jedno z prvních použití ozonu v potravinářství provedl M. Widemann již v roce 1869 při odstraňování nežádoucí chuti whisky. Poznamenal, že aplikace ozonu po dobu asi 20 min se

vyrovná 10 rokům zrání. Tento způsob urychlení přirozených oxidačních pochodů se následně prosadil i v technologii mnoha dalších lihovin, vína a ciderů.

Již na konci 19. stol. bylo možné zaznamenat snahu o popularizaci ozonu jakožto užitečné látky v oblasti výroby potravin. V roce 1897 vyzval E. Andréoli na své přednášce pro London Industrial Chemical Society o výrobě a aplikacích ozonu, aby se průmysl více angažoval na aktivním výzkumu jeho využití. Mezi potenciální využití, která popsal, patřila dezinfekce vody a vzduchu, úprava potravin (zlepšení melasy, zušlechťování rybího oleje, bělení cukerných sirupů) a nápojů (kávy, piva, vína, brandy). Na stejnou notu přednesl o rok později W. J. Engledue, který představil aparát generující ozon v množství až 175 g/hod. Diskutovanými aplikacemi byla dezinfekce pivovarských sudů, rafinace a bělení lněného oleje a příprava řady dalších olejů. Tyto návrhy byly ovšem shledány jako neekonomické a eventuelně použitelné jen u malých šarží dražších olejů. [2]

Rozsáhlá publikace „L'Ozone et ses applications industrielles“ vydaná v roce 1904 mapuje dosavadní využití ozonu v průmyslu a detailně popisuje tehdy zavedené i inovativní přístupy jeho aplikace včetně konstrukcí nejrůznějších ozonizačních zařízení. V knize je kromě výše uvedených potravinářských aplikací věnován prostor také ošetření masa, mléka a vajec. Ozon bylo možné použít k čištění a odbarvení cukerné šťávy při výrobě řepného cukru. Bělící účinek se uplatňoval ve škrobárenství i textilním průmyslu. Působením ozonu na eugenol a isoeugenol se připravoval vanilin. Mezi nepotravinářské využití patřila např. výroba mýdel, laků, barviv a parfémů. Ozon urychloval stárnutí dřeva pro výrobu uměleckých předmětů a hudebních nástrojů. [4]

V roce 1900 založil N. Tesla v USA společnost Tesla Ozone Company, která vyráběla generátory ozonu využívající koronový výboj. Ve stejné době se rozmáhalo terapeutické užití ozonu, čehož Tesla využil a nabízel ozonizovaný olivový olej s hojivými a regeneračními účinky. J. H. Clarke (1902) a následně M. Eberhart (1910) popsali užití ozonu při léčbě tuberkulózy, chudokrevnosti, zeleného zákalu, černého kašle, bronchitidy, zápalu plic, dny a mnoha dalších onemocnění. Ozon se užíval formou inhalace přes eukalyptový nebo cedrový olej. [21]

V roce 1909 bylo v německém Kolíně nad Rýnem hlášeno použití ozonu jako prostředku prodlužující trvanlivost chlazeného masa. [7]

Během 1. světové války se ozon osvědčil hlavně v lékařství. Byly jim léčeny rány po amputacích, gangrény a otravy bojovými plyny. V meziválečném období byl ozon úspěšně

nasazen např. při léčbě rakoviny tlustého střeva a děložního čípku, bércových vředů, paradentózy a operačních zánětů. [21]

Z potravinářské oblasti lze zmínit experimentální nasazení ozonizované vody při omývání ryb, koryšů a měkkýšů (Francie, 1929). Toto ošetření prodloužilo trvanlivost na 5 dní bez nepříznivého ovlivnění chuti a vzhledu. Také se zkoumalo využití ozonizovaného ledu pro skladování čerstvých ryb (Francie, 1936). Mnoho studií se též věnovalo prodloužení trvanlivosti skladovaného ovoce a zeleniny. Jedny z prvních experimentů ze 30. letech 20. stol. se zabývaly ozonizací banánů. Ostatní studie zahrnující např. mrkev, brokolici, hrušky, broskve či jablka uváděly určitý stupeň prodloužení trvanlivosti a snížení patogenní kontaminace.

Na počátku 40. let 20. stol. se ozon se začínal aplikovat ve skladech vajec a sýrů s cílem omezit růst plísní, kvasinek a bakterií. Od 50. let se používal k odstranění železa a manganu při úpravě pitné vody. V 60. a 70. letech se objevovaly aplikace ozonu při redukci znečištění povrchových vod fenolickými sloučeninami, pesticidy i přemnoženými řasami.

V roce 1973 byla založena organizace International Ozone Association s celosvětovou působností, která se zabývá všemi aspekty působení a využití ozonu ve světě. Sdružuje výzkumné ústavy, univerzity, vědce, lékaře, technology, výrobce a uživatele využívající vlastnosti ozonu.

V roce 1982 udělil americký Úřad pro kontrolu potravin a léčiv (FDA) status GRAS („Generally Recognised As Safe“) ozonové dezinfekci balených vod. Toto stanovisko v roce 1995 obnovil. Odborný panel svolaný americkou organizací Electric Power Research Institute v roce 1997 potvrdil ozon jako bezpečný pro přímý kontakt s potravinami. [7]

FDA v roce 2001 schválil ozon jako „Secondary Direct Food Additive“ s antimikrobiálním účinkem. Jedná se o přídatnou látku, jejíž funkčnost je vyžadována při výrobě nebo zpracování potravin a obvykle se neočekává, že bude přítomna v konečném produktu. FDA dále stanovilo za přijatelné použití ozonu pro přímý kontakt s potravinářskými produkty, včetně ryb, masa a drůbeže, dále při ošetření masných a drůbežích výrobků připravených k přímé spotřebě těsně před balením. U takto ošetřených produktů není ozon deklarován ve složení. [7, 22]

Od přelomu milénia ozon postupně nahrazuje konvenční sanitační postupy využívající především halogenové přípravky. V potravinářském průmyslu ozon nabírá na síle jako bezpečnější, nákladově efektivnější a šetrnější způsob ošetření. [23]

4 LEGISLATIVA V EU

V Evropě se ozonizace při zpracování potravin začínala prosazovat ve větším měřítku od počátku minulého století. Legislativním překážky a jisté obavy z této technologie však potenciál ozonu po dlouho dobou omezovaly. Výjimkou byla úprava pitné vody. Rozvoj ozonu, hlavně jako alternativního dezinfekčního činidla, nastal až v polovině 90. let 20. stol. v souvislosti s novou evropskou legislativou v oblasti životního prostředí. Směrnice Evropské Rady 96/61/ES o integrované prevenci a omezování znečištění kladla důraz na průmyslové používání méně nebezpečných látek a rozvoj vědeckých poznatků v různých průmyslových oborech. V potravinářství se konkrétní změny projeví až počátkem 21. stol. [7, 24]

Základní a nezbytnou podmínkou produkce potravin je jejich bezpečnost, jež podléhá zejména nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 178/2002, kterým se stanoví obecné zásady a požadavky potravinového práva, zřizuje se Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) a stanoví postupy týkající se bezpečnosti potravin. V rámci EFSA byly zřízeny vědecké výbory a vědecké komise poskytující odborná stanoviska v různých aspektech potravinového řetězce. Pro záležitosti týkající se použití ozonu je relevantní činnost Komise pro potravinářské přídatné látky, látky určené k aromatizaci, pomocné látky a materiály přicházející do styku s potravinami. [25]

Ozon v technologii potravin vystupuje jako tzv. pomocná látka, jež je definována v nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1333/2008 o potravinářských přídatných látkách. Jde o látku, která se záměrně používá při zpracování surovin, potravin nebo jejich složek ke splnění určitého technologického účelu během úpravy nebo zpracování. Přídavek látky může vést k nezamýšlené, avšak technicky nevyhnutelné přítomnosti reziduí nebo jejich derivátů v konečném produktu. Látka samotná ani její deriváty nesmí představovat zdravotní riziko a nesmí mít technologický dopad na konečný produkt. [26]

Na základně výše uvedeného se s ozonem pojí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/13/ES o sbližování právních předpisů členských států týkajících se označování potravin, jejich obchodní úpravy a související reklamy. Tento dokument uvádí, že se za složky potravin nepovažují přídatné látky, které se používají jako pomocné látky při zpracování. [7, 27]

O ozonu jako biocidní látce vznikající na místě (*in situ*) pojednává nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 528/2012 o dodávání biocidních přípravků na trh. Je zde

stanoven cíl používat pouze povolené biocidní přípravky obsahující účinné látky schválené v programu přezkumu nebo látky již zapsané v příloze I tohoto nařízení. V ČR platí zákon č. 324/2016 Sb. o biocidních přípravcích a účinných látkách, který uvádí základní podmínky pro uvádění biocidních přípravků na trh v přechodném období, než bude platit požadavek na jejich povolení podle čl. 95 zmíněného nařízení. Kromě naplnění cílů nařízení je třeba, aby byl biocidní přípravek oznámen Ministerstvu zdravotnictví do Registru chemických látek a prostředků. [28]

Význačné oxidační účinky ozonu našli své uplatnění v technologii balených vod. Směrnice Komise 2003/40/ES umožňuje úpravu přírodní minerální a pramenité vody vzduchem obohaceným ozonem s cílem odstranění nestabilních sloučenin železa, manganu, síry a arsenu, aniž by bylo ovlivněno složení vody, pokud jde o její základní složky. Aplikace ozonu nesmí zanechávat nadlimitní rezidua a koncentrace nežádoucích vedlejších produktů, tj. bromičnanů a bromoformů. Informace o úpravě musí být uvedena na etiketě. Do právního řádu ČR je tato směrnice implementována skrze vyhlášku č. 275/2004 Sb. o požadavcích na jakost a zdravotní nezávadnost balených vod a o způsobu jejich úpravy [29]

V letech 2003 a 2004 vydal Francouzský úřad pro bezpečnost potravin (AFSSA, od r. 2010 ANSES) dvě stanoviska týkající se bezpečnosti používání ozonu jako pomocné látky k ošetření pšeničných zrn před mletím. První (AFSSA 2003) uvádí, že dávka ozonu 12 g (při standardní teplotě a tlaku) na 1 kg zrna, určená k přípravě mouky na pečivo obsahující cukry přidané do úrovně 7 až 50 % hmot. sušiny, nepředstavuje pro spotřebitele žádné zdravotní riziko. Druhé stanovisko (AFSSA 2004) rozšířilo použití ozonu na přípravu mouky určené pro výrobu chleba a pečiva obsahující až 7 % hmot. přidaných cukrů v koncentraci 8 g ozonu na 1 kg zrna. Dále bylo v roce 2006 povoleno zlepšení kvality mouky na základě úpravy ozonem v uzavřeném sekvenčním vsádkovém reaktoru. V roce 2019 vydala ANSES stanovisko k rozšíření používání ozonu ve formě vodného roztoku pro mytí salátů určených k rychlé spotřebě. [30]

Se současnou mírou globalizace trhů je velmi významná snaha o soulad v potravinářské legislativě jednotlivých států. Platformou pro globální diskuzi o vědeckých otázkách, které podporují rozhodnutí vlád a mezinárodních regulačních orgánů je Globální harmonizační iniciativa (GHI). Cílem je spolupráce na podpoře harmonizace mezinárodních předpisů v oblasti bezpečnosti potravin. Tato iniciativa by měla usnadnit pokračující přijímání ozonu jako bezpečné a k životnímu prostředí šetrné látky v potravinářském průmyslu. [31]

5 TOXIKOLOGIE

5.1 Účinek ozonu na zdraví

Lidský čich je schopen rozeznat přítomnost ozonu ve vzduchu již při velmi nízkých koncentracích od cca 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tato schopnost je však individuální a v přítomnosti nízkých koncentrací se v řádu několika minut vytrácí. [9, 32]

Při delším pobytu v místech se zvýšenou koncentrací ozonu (nad cca 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ či 0,1 ppm) se dostavuje pálení očí a sliznice v nosu a krku, kašel a bolest hlavy. Reakce organismu jsou různé a závisí na predispozicích, aktuální fyzické aktivitě a době působení. Podle WHO se první příznaky obtíží mohou u některých jedinců objevit již při překročení průměrné hodinové koncentrace 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,08 ppm). Nejvíce citliví jsou lidé, kteří mají zdravotní obtíže, jako je astma, chronické onemocnění dýchacích cest a problémy oběhové soustavy. Pokud koncentrace ozonu v ovzduší přesáhne cca 1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,5 ppm), dochází k významnému dráždění očí a dýchacích cest, včetně plic, projevující se suchým kašlem, dostavuje se bolest na hrudi a únava. Koncentrace vyšší než cca 2 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1,0 ppm) způsobují během několika minut silné dráždění dýchacích cest, zvracení a možné kóma. Vystavení se koncentracím nad 20 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 ppm) má za následek plicní krvácení, bezvědomí a smrt způsobenou otokem plic. [9, 32, 33]

5.2 Toxokinetika

Při expozici ozonu jsou zasaženy především kůže a sliznice dýchacích cest. Bariérové vlastnosti kůže omezují účinek na epidermis a horní vrstvy dermis. [34]

Inhalací se ozon dostává do dýchacích cest, kde dochází k jeho absorpci. Vzhledem k tomu, že ozon má omezenou rozpustnost ve vodě, nejsou horní dýchací cesty při záchytu vdechovaného plynu tak účinné, jako je tomu u hydrofilnějších polutantů (SO_2 , Cl_2). Důsledkem toho se většina inhalovaného ozonu dostává do dolního dýchacího traktu a plic, kde se rozpouští v tenké vrstvě tekutiny epitelové výstelky (TEV). [35]

TEV obsahuje substráty, např. kyselinu askorbovou, kyselinu močovou, glutathion a nenasycené lipidy, které mohou podléhat oxidaci zprostředkované ozonem. Navíc se TEV neustále obnovuje díky sekreční aktivitě a koordinovanému pohybu řasinkových buněk. Tato ochranná vrstva minimalizuje množství ozonu přicházející do kontaktu s buňkami epitelu. Oxidací některých složek TEV však dochází k tvorbě bioaktivních sloučenin, jako jsou hydroperoxydy, ozonidy a aldehydy, které mohou vyvolat zánět a poškození buněk.

Přímé buněčné poškození je naznačeno zvýšenou koncentrací enzymu laktátdehydrogenázy a proteinů uvolňovaných z cytoplazmy. Buňky, které nejsou destruovány, produkují mediátory zprostředkovávající neutrofilní zánětlivou reakci. Děje se tak zatím ne zcela objasněným mechanismem zahrnujícím působení oxidačních produktů pocházejících z TEV a vnějších buněčných struktur na buněčné receptory. Zanícené řasinkové buňky vykazují zhoršenou schopnost produkovat a distribuovat TEV, čímž se snižuje účinnost odvádění cizích částic, hlenu a patogenů z povrchu dýchací trubice. Také je pozorována zvýšená permeabilita této ochranné buněčné vrstvy, což ve zvýšené míře umožňuje vnik patogenů a jejich šíření do hlubších vrstev tkáně. [34, 36–38]

Vývoj neutrofilního zánětu souvisí s přílivem neutrofilů do dýchacích cest, jenž dosahuje vrcholu mezi 6. až 18. hod po expozici. Během několika dnů po krátkodobé expozici zánět odeznívá a poškozené řasinkové epitelální buňky dýchacích cest jsou obměněny. V plicích jsou poškozené alveolární buňky zcela regenerovány během několika týdnů. [35–37]

5.3 Akutní toxicita

Akutním fyziologickým projevem krátkodobé expozice ozonu je snížená vitální kapacita plic doprovázená kašlem, sípáním, dušností a tlakem na hrudi. Tyto projevy jsou nejčastěji dávány do souvislosti se stimulací interepitelálních nervových vláken, což vede k reflexnímu kašli a kontrakci hladkého svalstva v bronchiálních dýchacích cestách. Reakce organismu odeznívá v rozmezí od několika hodin do 2 dnů. [35, 36]

5.4 Chronická toxicita

Studie na laboratorních zvířatech dokládají, že dlouhodobé vystavení se ozonu v koncentracích vyšších, než je úroveň okolního prostředí může vést k nevratným morfologickým změnám v dýchacích cestách a k trvalé poruše plicních funkcí. [35]

Vliv dlouhodobého působení ozonu na lidské zdraví je analyzován na základě epidemiologických studií a dat získaných ze zařízení poskytujících zdravotní péči. V rámci projektu HRAPIE (2013), který se zabýval zdravotními riziky plynoucími ze znečištění vzduchu v Evropě lze shrnout, že chronická expozice ozonu zvýšila četnost hospitalizací pro zhoršení astmatu u dětí a pro akutní zhoršení kardiovaskulárních a respiračních onemocnění u starších osob. Zvýšení denní maximální 8hodinové koncentrace o každých $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nad hladinu $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vedla ke zvýšení celkové denní úmrtnosti o 0,3 %. Dopad na úmrtnost na respirační onemocnění u populace nad 30 let byl odhadnut na 1,4 %. [39, 40]

5.5 Přípustné koncentrační limity pro obyvatelstvo

Podle výsledků z dlouhodobého projektu Monitoring zdravotního stavu obyvatelstva se dlouhodobě měřené koncentrace ozonu v letním období pohybují mezi 60 až 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, v zimě okolo 30 až 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Obecně je vyšších hodnot dosahováno během jarních a letních měsíců ve vyšších nadmořských výškách, kde je vznik ozonu podporován intenzivnějším slunečním zářením. Při vhodných meteorologických podmínkách (teplo, bezvětří) může nastat tzv. ozonová epizoda (vznik fotochemického smogu), kdy je v ovzduší zvýšená koncentrace přízemního ozonu a lze předpokládat setrvání takových hodnot. [33]

Dle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší musí být obyvatelstvo informováno o překročení hranice 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,09 ppm) a varováno při překročení hodnoty 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,12 ppm) za dobu průměrování jedné hodiny. Za účelem ochrany zdraví lidí stanovuje zákon imisní limit pro troposférický ozon 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,06 ppm), jenž odpovídá maximálnímu dennímu 8hodinovému průměru, který se počítá z hodinových koncentrací. Pro ochranu vegetace je imisní limit stanoven složitějším způsobem. [41]

5.6 Limity platné pro pracovní prostředí

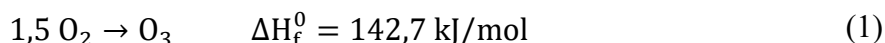
Narizení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, zmiňuje u ozonu přípustný expoziční limit (PEL) 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,05 ppm) a nejvyšší přípustnou koncentraci (NPK-P) 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,1 ppm). [42]

V jiných státech jsou přípustné vyšší expoziční limity. Například řada států na americkém kontinentě, mimo jiné také Occupational Safety and Health Administration (OSHA) v USA, přijala hodnotu PEL-TWA (Time-weighted Average) 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pro 8hodinovou expozici. Setkat se lze také s PEL-STEL (Short-term Exposure Limit), který např. ve státě Kalifornie činí 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,3 ppm) pro maximální jednorázovou dobu expozice 15 min, uskutečňující se nanejvýš čtyřikrát denně s prodlevou mezi expozicemi delší než 1 hod. [43]

V Německu platí Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ za podmínek expozice 8 hod denně. Pod správou německého Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung je volně dostupná databáze chemických látek GESTIS, která obsahuje limitních hodnoty pro pracovní prostředí užívané v mnoha zemích světa. Nejvíce frekventovanou hodnotou limitní koncentrace pro 8hodinovou expozici ozonu je zde 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [32, 44]

6 TVORBA OZONU

Ozon je velmi reaktivní plyn, který se samovolně rozkládá. Proto ho není možné dlouhodobě skladovat a musí se vyrábět v místě spotřeby. Nezbytným krokem při tvorbě molekuly ozonu je rozštěpení dvouatomové molekuly kyslíku. Tímto vzniká kyslíkový radikál, který reaguje s dvouatomovým kyslíkem za vzniku tříatomové molekuly ozonu. Tvorbu ozonu je možné zapsat celkovou chemickou rovnicí 1: [9]



Reakce je endotermická. V přírodě je vznik ozonu spojen s procesy v atmosféře, jejichž zdrojem energie je sluneční záření (fotochemická tvorba) či elektrický výboj (blesky při bouřkách). Oba jmenované způsoby byly původní inspirací pro konstrukci vlastních generátorů používaných v průmyslu a ostatních aplikacích. [3, 45]

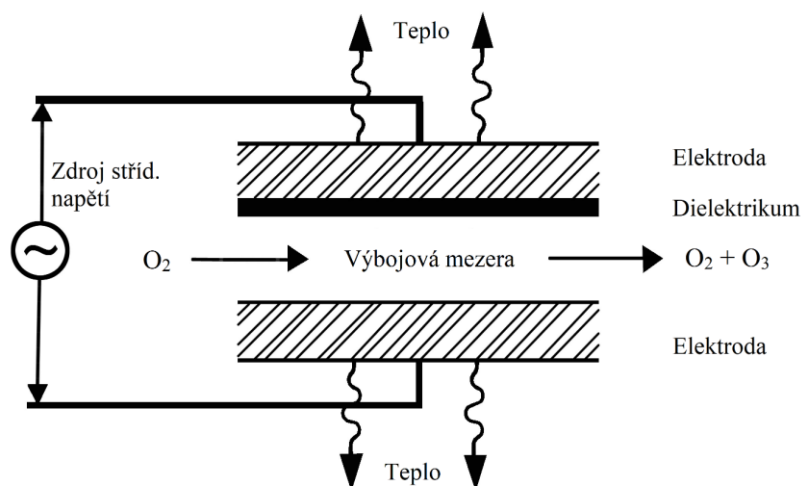
Pro nasazení v potravinářském průmyslu se využívají dvě obecné metody tvorby ozonu. První z nich je známa jako metoda dielektrického bariérového výboje (DBD), která využívá průchodu plynu obsahující kyslík vysokoenergetickým elektrickým polem. Druhá metoda je fotochemická, při níž je plyn vystaven zdroji UV záření. Ostatní způsoby výroby ozonu jsou buď ve fázi vývoje, nebo jsou pro potravinářské použití neekonomické. Jde např. o postupy elektrolytické, chemické či termické. [7]

6.1 Dielektrický bariérový výboj (DBD)

Základní součástí zařízení generující ozon je sestava dvou elektrod, které jsou navzájem odděleny skleněným nebo keramickým dielektrikem. Obě elektrody odděluje prostor, tzv. výbojová mezera. Šířka mezery se pohybuje od 0,3 mm u středofrekvenčních generátorů pracujících s vysoce čistým kyslíkem až po 3 mm u nízkofrekvenčních ozonových systémů s přívodem vzduchu, tj. 21 % obj. kyslíku [9]

Podle pracovní frekvence se generátory obecně dělí na nízkofrekvenční (50–100 Hz), středněfrekvenční (100–1 000 Hz) a vysokofrekvenční (> 1 000 Hz). [7]

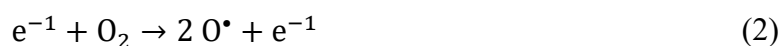
Popsané součásti DBD sestavy jsou schematicky znázorněny na obrázku 3.



Obrázek 3: Schematická sestava pro DBD [7, upraveno]

Princip vzniku výboje lze popsat tak, že výbojovou mezerou proudí plyn obsahující kyslík, zatímco na elektrody je aplikováno střídavé napětí (od 8 do 30 kV). Před anodou se kumuluje záporný náboj a následně se vytvoří lokální elektrické pole o vysoké intenzitě, které je při dosažení kritické hodnoty (průrazného napětí plynu) příčinou vzniku mikrovýboje. Plyn je ve výboji ionizován a stává se vodivým. Bariérový výboj probíhá v tzv. filamentárním režimu, tedy k průrazu dochází ve více bodech mezery a lze tak pozorovat mnoho vláknitých jisker. Toto je odrazem funkce dielektrika, které rovnoměrně rozkládá tok elektronů. Od tohoto okamžiku vznikají ve směru od anody ke katodě ionizační vlny, jež mají dostatečnou energii ke štěpení vazby v molekule kyslíku. Takto vzniká atomární kyslík, který je nezbytný pro formování molekuly ozonu. Mikrovýboj doznívá v závěrečné fázi, která je charakterizována akumulací náboje na povrchu dielektrika, čímž se kompenzuje vnější elektrické pole. Vznik nového výboje může nastat při opětovném dosažení průrazného napětí či změnou polarity systému. To je také důvodem použití zdroje střídavého napětí. [3, 46]

Vlastní proces formování ozonu je možné zjednodušeně zapsat pomocí následujících chemických rovnic. Nejdříve se vlivem vysokoenergetických elektronů vznikajících v rámci elektrického výboje štěpí vazba v molekule kyslíku (rovnice 2):



Molekula ozonu vzniká kolizí kyslíkového radikálu, kyslíkové molekuly a neutrální částice M (např. N₂), která vyrovnává energetické poměry reakce (rovnice 3):



Vzniklý ozon zároveň reaguje s přítomnými kyslíkovými radikály a elektrony za zpětného vzniku kyslíku v molekulárním i atomárním stavu. Zmíněné reakce znázorňují rovnice 4 a 5: [3]



Tvorba ozonu je velmi neefektivní proces a přibližně 85–95 % dodané elektrické energie se přeměňuje na teplo, menší část připadá na světlo, zvuk a chemické reakce. Relativně velké množství odpadního tepla musí být z generátoru, resp. z výbojové mezery odváděno, neboť zde může docházet k tepelnému rozkladu vznikajícího ozonu. Z tohoto důvodu jsou generátory chlazeny vzduchem nebo vodou. Usnadnění odvodu tepla je značně podpořeno také návrhem poměrně tenké výbojové mezery, která tak nezadržuje přílišné objemy špatně tepelně vodivého plynu. [3, 7]

Na výtěžek ozonu má negativní vliv přítomnost vlhkosti v přiváděném plynu. Z tohoto důvodu se přistupuje k vysoušení plynu na teplotu rosného bodu alespoň -40 °C. Taktéž vysoké koncentrace dusíku způsobují podstatné snížení produkce ozonu. Bylo zjištěno, že generátor pracující se vzduchem poskytuje asi jen třetinu až polovinu množství ozonu v porovnání s použitím čistého kyslíku. Obecně lze shrnout, že koncentrace produkovaného ozonu závisí na elektrických veličinách (napětí, proudu, frekvenci), materiálu dielektrika a elektrod, rozměrech výbojové mezery, tlaku ve výbojové mezeře, koncentraci kyslíku v dodávaném plynu a přítomnosti jiných látek. [3, 45]

Je-li generátor zásobován vzduchem, vytváří se 1–3 % hmot. ozonu. Pokud se ovšem neprovede dostatečné vysušení vzduchu, pak obsažený dusík a vlhkost mohou reagovat s ozonem za vzniku kyseliny dusičné, která působí korozivně a poškozuje elektrody. Z důvodu maximalizace účinnosti procesu se využívají kyslíkové směsi prosté vlhkosti, nečistot a prachových částic. Použití vysoce čistého kyslíku (> 90 % hmot.) může poskytnout 6–16 % hmot. ozonu. V praxi se často využívá čistý kyslík, jelikož je tak dosahováno dostatečně vysokého výtěžku, navíc s možností nasazení kompaktnějších generátorů bez objemných vysoušečů a filtrů vzduchu, což má za následek nižší náklady na energii a prostor. Vzhledem k výbušnosti kyslíku je důležité nastavit opatření zabráňující vzniku požáru či exploze tlakových lahví. [7, 45, 47]

Uvedené výtěžky nelze příliš navyšovat. Jejich omezenost je dána především nestabilitou ozonu, který ihned po svém zrodu podléhá interakcím s atomárním kyslíkem a elektrony

nacházejícími se ve výbojové mezeře. Vyšší koncentrace ozonu tak mají za následek i vyšší míru jeho destrukce. K dosažení vysokých koncentrací se využívají generátory, které jsou tvořeny větším počtem sériově propojených výbojových jednotek. [3, 45]

6.2 Fotochemická metoda (UV záření)

Jako zdroj potřebné energie jsou nejčastěji využívány nízkotlaké rtuťové výbojky. Zjednodušeně lze rtuťovou výbojku popsat jako uzavřenou trubici s protilehlými elektrodami obsahující malé množství rtuti a inertní plyn (obvykle argon nebo směs argonu s kryptonem). Na obou koncích trubice je patice se dvěma kolíky zajišťujícími elektrický kontakt s objímkami, předřadným a startovacím obvodem.

Vlastní výboj probíhá v nasycených parách rtuti (parciální tlak asi 0,8 Pa) a v inertním plynu, který snižuje zápalné napětí výboje. Nárůst teploty je mírný a nedochází k výraznému zvýšení tlaku vznikajících rtuťových par během provozu. Intenzita vyzařovaného světla je v porovnání s vysokotlakými výbojkami relativně nízká. Rtuťová výbojka je zařízení se záporným odporem. To znamená, že výbojkou připojenou přímo ke zdroji konstantního napětí bude protékat stále vyšší elektrický proud, dokud nedojde k jejímu poškození. Proto je součástí obvodu elektrický předřadník, který elektrický proud omezuje. [48, 49]

Výboj v prostředí rtuťových par je zdrojem intenzivního UV záření s výraznými spektrálními čarami s vlnovou délkou 185 nm (5–10 %) a 254 nm (85–90 %), zbylé emise se pohybují ve fialových a modrých oblastech spektra (v závorkách je uvedeno odhadované zastoupení fotonů o příslušné vlnové délce). [7, 50]

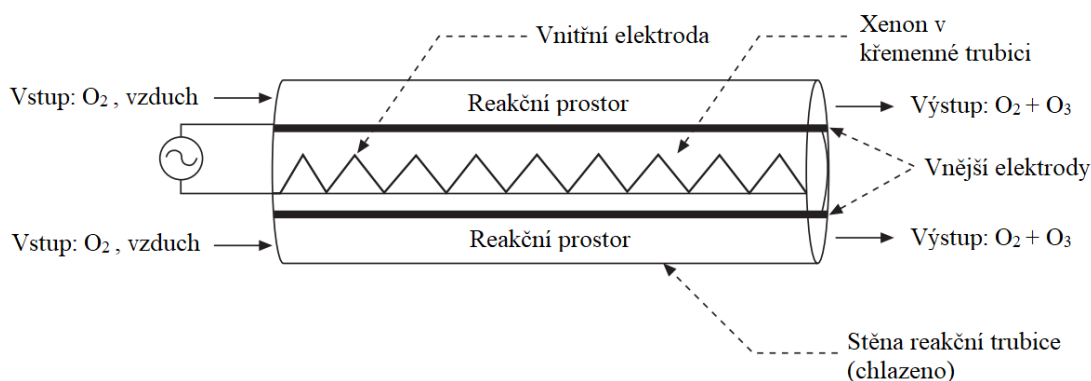
Formování ozonu se spjata se zářením o vlnové délce 185 nm, které je absorbováno molekulami kyslíku. Dochází k jejich fotodisociaci a vznikají nestabilní kyslíkové radikály. Ty se vážou na okolní molekuly kyslíku, což vede k tvorbě molekul ozonu. Záření s vlnovou délkou 254 nm je ozonem absorbováno a způsobuje jeho fotolýzu. Spolupůsobení fotonů obou vlnových délek a jejich nepoměr vede k relativně nízkému výtěžku ozonu. [3, 7]

O vlnových délkách, které je výbojka schopna vyzařovat rozhoduje materiál výbojové trubice. Z tohoto pohledu je možné rozlišovat germicidní (ozon netvořící) výbojky, jejichž trubice je vyrobena ze skla s úpravou absorbující emisi 185 nm. Do okolí tak pronikají především fotony o vlnové délce 254 nm, které jsou absorbovány DNA a způsobují změny její struktury a posléze zánik buňky. U výbojek produkujících ozon je trubice zhotovena z čirého křemenného skla vysoké čistoty, které je propustné pro fotony o vlnové délce

185 nm. Použití křemenného skla zároveň umožňuje mnohem vyšší výkonové zatížení, zejména pokud se místo kapalné rtuti používají rtuťové amalgámy. Životnost nízkotlakých rtuťových výbojek se pohybuje okolo 10 000 hod. [49, 51]

Generátor ozonu si lze představit jako trubici o dostatečném průměru, jejíž osou je vedena výbojka. Napájecí plyn (obvykle okolní vzduch) je do generátoru vháněn ventilátorem a proudí podél výbojky, kde nastává tvorba ozonu. Bylo vypočítáno, že pro absorpci 99 % energie UV záření o vlnové délce 185 nm vzduchem je třeba absorpční dráha 100 cm, což je ve vztahu ke generátoru šířka mezikruží mezi výbojkou a stěnou reakční trubice. Takové zařízení by však bylo velmi rozměrné, proto se v praxi šířka mezikruží redukuje např. na 20 cm či méně, což s sebou nese nižší výtěžnost ozonu, jelikož nevyužitá záření se absorbuje ve stěně reakční trubice. Tento jev lze významně omezit pokrytím stěny reflexním materiálem. Maximální koncentrace ozonu se zde pohybují do 0,5 % hmot. s použitím čistého vzduchu až do 1 % hmot. s použitím čistého kyslíku. Je-li ve vstupním plynu přítomna vlhkost, dochází ke kondenzaci na povrchu výbojky a reakční trubice, což má za následek zeslabení UV záření a rozklad vnikajícího ozonu. [3, 7, 52, 53]

Alternativou nízkotlaké rtuťové výbojky může být vakuová UV (VUV) výbojka, která vyzařuje fotony o vlnové délce 172 nm během rozpadu xenonového excimeru. Přívodem suchého čistého kyslíku může být teoreticky dosaženo koncentrace až 15 % hmot. ozonu. [45] Schéma VUV výbojky je uvedeno na obrázku 4.



Obrázek 4: Schéma excimerové VUV výbojky [45, upraveno]

Fotochemická metoda není příliš účinná pro průmyslové aplikace. UV světlo je vhodné pro produkci ozonu v malých množstvích, např. pro laboratorní účely, k eliminaci zápachů nebo jako doplňková dezinfekční metoda. [3]

7 APLIKACE OZONU

Aplikace ozonu probíhá buď ve formě plynu nebo častěji v podobě roztoku, který vzniká rozpuštěním ozonu ve vodě. [7]

Obecně lze rozpustnost plynu v kapalině popsat Henryho zákonem, podle kterého je parciální tlak plynné složky nad roztokem p_i přímo úměrný jejímu molárnímu zlomku x_i v tomto roztoku, když je systém kapalina/plyn v rovnováze. Vztah je uveden v rovnici 6:

$$p_i = K_H \cdot x_i \quad (6)$$

Konstantou úměrnosti je Henryho konstanta K_H , která je charakteristická pro daný plyn a je závislá na teplotě. S rostoucí teplotou roste hodnota Henryho konstanty, a rozpustnost plynu tak klesá. Dalšími faktory jsou pH, iontová síla, přítomnost ostatních látek, průměr bublin, průtok a doba kontaktu plynu s vodou. Malé bublinky (průměr kolem 1–3 mm) v součtu navyšují kontaktní povrch plynu s kapalinou, což vede ke zvýšené rozpustnosti. Narůstající tlak v systému také pozitivně ovlivňuje rozpustnost. [54, 55]

7.1 Převod ozonu do vody

Voda syčená ozonem má své využití při povrchovém ošetření potravinářských surovin, zařízení a ploch. Ozon se do vody převádí dvěma odlišnými metodami: Venturiho injektorem nebo difuzorem jemných bublin. Oba přístupy mají svůj význam v závislosti na konkrétní aplikaci. [7]

Významným faktorem je také volba materiálu zařízení. Většina materiálů je odolných vůči koncentracím ozonu 1–3 ppm, vyšší koncentrace již působí korozivně. Dobrou odolnost vykazují plasty jako polytetrafluorethylen (PTFE), polyvinylidendifluorid (PVDF), polyvinylchlorid (PVC), ethylen-chlortrifluorethylen (ECTFE) či nerezová ocel (nejlépe třídy 316L) [47, 56]

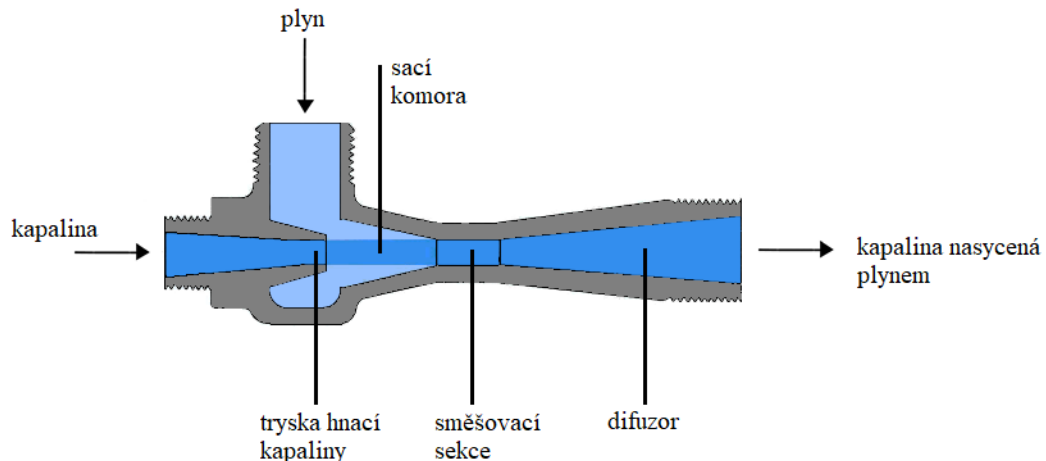
7.1.1 Metoda Venturiho injektoru

Princip činnosti je založen na Venturiho efektu, při kterém dochází ke snížení tlaku kapaliny protékající zúženým úsekem trubice.

Hnací kapalina proudí tryskou, která vytváří vysokorychlostní proud. Zvýšení rychlosti kapaliny vede ke snížení tlaku, což umožňuje nasávání plynu obsahujícího ozon v sací komoře a jeho stržení do proudu kapaliny. V následující směšovací sekci se malé bublinky

plynu vlivem turbulencí důkladně rozptylují. Směrem k výstupu (v difuzoru) se trubice rozšiřuje a rychlost proudu se snižuje, tlak opět narůstá. [57]

Venturiho injektor se skládá ze 4 základních částí: trysky hnací kapaliny, sací komory, směšovací sekce a difuzoru:



Obrázek 5: Schéma Venturiho injektoru. [58, upraveno]

Velmi účinné injektory pracují v širokém rozsahu tlaků a k vyvolání potřebného podtlaku vyžadují minimální tlakový rozdíl mezi vstupní a výstupní stranou (do 15 %). [7]

7.1.2 Metoda difuzéru jemných bublin

Difuzér je porézní zařízení, které je vyrobeno z keramiky nebo slinuté nerezové oceli a je umístěno na dně nádrže s upravovanou kapalinou. Do difuzéru je zaváděn natlakovaný plyn obsahující ozon, který probublává póry a vytváří se jemná disperze bublinek. Tlak proudu ozonového plynu musí být větší než tlak vyvíjený vodním sloupcem nad difuzorem. Obecně je třeba vyhnout se vyšším tlakům, protože stlačováním se ozon zahřívá a rychleji rozkládá.

Obvykle se mísení plynu a vody provádí v protiproudém uspořádání (voda proudí dolů, zatímco plyn obsahující ozon proudí nahoru), aby se maximalizovala doba kontaktu. Tomu výrazně napomáhá také velikost bublin, přičemž jemnější bublinky stoupají pomaleji a poskytují větší kontaktní plochu s vodou. [7]

7.2 Stavba ozonizačních systémů

V praxi se běžně využívají kompaktní zařízení, které se skládají z následujících částí:

- Tlaková lahev s kyslíkem nebo kyslíkový koncentrátor se vzduchovými filtry a absorbérem vlhkosti (v případě tvorby ozonu ze vzduchu).

- Generátor ozonu – nejčastěji pracující na principu DBD. Důležitou součástí je zde chlazení.
- Reakční komora s ošetřovaným materiálem. Nebo se ozon převádí do vody. Před i po ošetření je koncentrace ozonu měřena analyzátory, na základě jejichž dat lze celý proces regulovat.
- Destruktor přebytečného ozonu – k bezpečnému rozkladu. Toho lze dosáhnout tepelně nebo katalytickými prostředky. Pro nízké koncentrace nebo malé objemy ozonu je možný průchod přes vlhké granulované lože aktivního uhlí. Výsledkem je rozklad téměř veškerého ozonu. Konečné množství vypouštěné do okolí je monitorováno detektorem, který spustí varování při překročení bezpečné koncentrace. [47, 59]

7.3 Monitorování koncentrace ozonu

Koncentrace ozonu v plynné fázi lze velmi přesně měřit metodou absorpční spektrofotometrie v UV oblasti. Toto měření je však technicky náročné, proto se v praxi využívají dostupnější analyzátory založené na technologii Metal Oxide Semiconductor (MOS), které poskytují dostatečně přesné výsledky. Senzor je pokrytý tenkou vrstvou oxidu kovu, která při zahřátí adsorbuje ozon. Tím se mění její elektrický odpor, jenž je vstupním signálem pro výpočet koncentrace. Jednotky MOS jsou k dispozici v ručních, nástěnných i v osobních klipových formátech.

Elektronické monitory nebo regulátory rozpuštěného ozonu používají amperometrický senzor, který se skládá z membrány propustné pro ozon natažené přes zlatou katodu. Stříbrná anoda a roztok elektrolytu doplňují vnitřní obvod. Během provozu ozon difunduje ze vzorku přes membránu a reaguje s roztokem elektrolytu za vzniku meziproductové sloučeniny. Napětí aplikované na katodu redukuje tuto sloučeninu a vytváří proud mezi katodou a anodou, který analyzátor měří. [7]

Koncentraci rozpuštěného ozonu je možné měřit také manuálně (testovací soupravou) za použití činidla indigotrisulfonátu, přičemž ozon bělí modrou barvu indiga. Reakce je kvantitativně vyhodnocena spektrofotometricky. [5]

8 MECHANIZMY REAKCE

Reakce ozonu s látkami vyskytujícími se ve vodném prostředí není snadné jednoduše popsat. Mnoho reakcí probíhá současně a ozon může reagovat buď nepřímo (kdy se rozkládá mechanismem řetězové reakce) nebo přímo (selektivními reakcemi). Účinnost ozonizačního procesu je závislá na koncentraci ozonu, teplotě a také na složení vody, zejména na jejím pH a obsahu a typu organické hmoty. Rozklad ozonu ve vodní fázi je velmi rychlý, proto je antimikrobiální účinek zřetelný především na povrchu ošetřovaného předmětu. [7]

8.1 Přímá reakce

Vzhledem k molekulární struktuře může ozon během reakcí působit jako elektrofilní nebo nukleofilní činidlo. K elektrofilním reakcím dochází s organickými molekulami o vysoké elektronové hustotě. Reakce probíhá rychle např. u sloučenin s aromatickým cyklem.

Nukleofilní reakce je typická pro sloučeniny, které obsahují skupiny s afinitou k elektronům, jako jsou karboxylová skupina nebo nitroskupina.

Přímá reakce se převládající mírou podílí na inaktivaci mikroorganismů následkem selektivní oxidace cílových skupin v buňce. [59]

8.2 Nepřímá reakce

Rozklad ozonu ve vodě je provázen tvorbou částic s nepárovými elektrony, tj. radikály. Většina radikálů je velmi nestabilních a okamžitě podstupují reakci s jinou molekulou, aby získaly chybějící elektron. Nepřímá reakce ozonu probíhá jako sled radikálových přeměn, které v průběhu mohou vést k vytvoření řady vysoce reaktivních látek. Je známo, že vznikající hydroxylové radikály OH^\bullet mají velmi krátkou životnost, ale mimořádně silný oxidační potenciál. Lze tak vysvětlit vyšší antimikrobiální aktivitu ozonizované vody. [47]

Radikálový řetězový mechanismus zahrnuje fáze iniciace, propagace a terminace. [59]

8.2.1 Iniciace

Nejdříve nastává rozklad molekuly ozonu za účasti iniciátoru, kterým může být hydroxylový aniont OH^- , jak je znázorněno v rovnici 7: [7]



Vzniklý radikál HO_2^\bullet má acidobazickou rovnováhu při $\text{p}K_a = 4,8$. Nad touto hodnotou se radikál neštěpí a tvoří radikál $\text{O}_2^{\bullet-}$, jak popisuje rovnice 8: [7]



8.2.2 Propagace

V této fázi reaguje s ozonem pouze jeden radikál $\text{O}_2^{\bullet-}$, což vede ke vzniku radikálu $\text{O}_3^{\bullet-}$, který se prostřednictvím radikálu HO_3^\bullet rychle rozkládá na radikál OH^\bullet . Uvedené lze zapsat následujícími chemickými rovnicemi 9–11: [47]



Hydroxylový radikál OH^\bullet pak může reagovat podle rovnic 12 a 13: [47]



Opakovaný vznik superoxidových radikálů $\text{O}_2^{\bullet-}$ je podpořen přítomností tzv. promotorů. Jejich roli zastávají např. kyselina mravenčí, kyselina glyoxalová, primární alkoholy a arylové skupiny. [59]

8.2.3 Terminace

Posledním krokem je terminace, při které se ukončuje výše uvedená řetězová reakce a inhibuje se rozklad ozonu. Děje se tak činností látek zachycujících radikály, např. iontů CO_3^{2-} a HCO_3^- . Jiným způsobem terminace je reakce dvou radikálů, uvedená v rovnici 14: [7]



9 ANTIMIKROBIÁLNÍ ÚČINEK

Antimikrobiální aktivita ozonu je založena na jeho silném oxidačním účinku, který způsobuje nevratné poškození buněčných struktur. Primárně dochází ke kontaktu ozonu s povrchem buňky, kde nastává oxidace případných složek buněčné stěny s následnou degradací nenasycených mastných kyseliny obsažených v cytoplazmatické membráně. Tyto změny mají za následek poruchu membránové propustnosti, která nakonec vede k lýze buňky. Dojde-li k difuzi ozonu do buňky, působí rozsáhlou oxidaci proteinů, enzymů a nukleových kyselin, což vede k rychlému odumření buňky. [59–61]

Účinnost ozonizace je vyšší ve vlhkém a vodném prostředí, neboť se zde zapojují vznikající radikály. Při ošetřování komplexních systémů, např. potravin, je obecně potřeba vyšších dávek ozonu z důvodu snížené propustnosti a přítomnosti dalších oxidovatelných složek. Ozon je možné aplikovat současně i s jinými metodami. Obecně se postupy pokročilé oxidace využívají s cílem zefektivnit účinek ozonu. Snahou je maximalizovat tvorbu reaktivních OH^\bullet radikálů působením aktivátorů jako je peroxid vodíku nebo UV záření [7]

Mikrobicidní účinky ozonu byly studovány u široké škály druhů bakterií, virů a prvoků.

9.1 Bakterie

Ozon inaktivuje vegetativní buňky i jejich spory. Např. W. T. Broadwater a kol. uvádí letální prahovou koncentraci pro *Bacillus cereus* 0,12 mg/L a pro *Escherichia coli* a *B. megaterium* 0,19 mg/L. Prahová koncentrace pro spory *B. cereus* a *B. megaterium* činila 2,3 mg/L. [62]

9.2 Viry

Ozon se jeví jako účinný virucidní prostředek. K inaktivaci virů stačí jeho relativně nízká koncentrace a krátká doba kontaktu. Významnou roli zde hraje množství suspendovaných látek a asociace virové částice s buněčnými fragmenty, které působí jako ochrana. [5]

9.3 Prvoci

Působení ozonu na eukaryotický typ buňky studovali G. B. Wickramanayake a kol. u oocyst *Naegleria gruberi* a *Giardia muris*, přičemž bylo pozorováno snížení populace o 2 log při koncentraci ozonu 0,2 mg/L. Jiná studie se zabývala střevním parazitem *Cryptosporidium parvum*, u kterého bylo inaktivováno > 90 % populace, při použití ozonizované vody o koncentraci 1 mg/L během 1 min. [63]

10 VYUŽITÍ OZONU V POTRAVINÁŘSTVÍ

Následující kapitoly shrnují možné aplikace ozonu v různých oblastech zpracování a nakládání s potravinami a potravinářskými surovinami. Jsou zde uvedeny nejvýznamnější i některé méně známé možnosti nasazení ozonu či ozonizované vody ve vztahu ke snižování výskytu mikroorganismů, prodlužování trvanlivosti, úpravy vlastností potravin apod.

10.1 Ovoce a zelenina

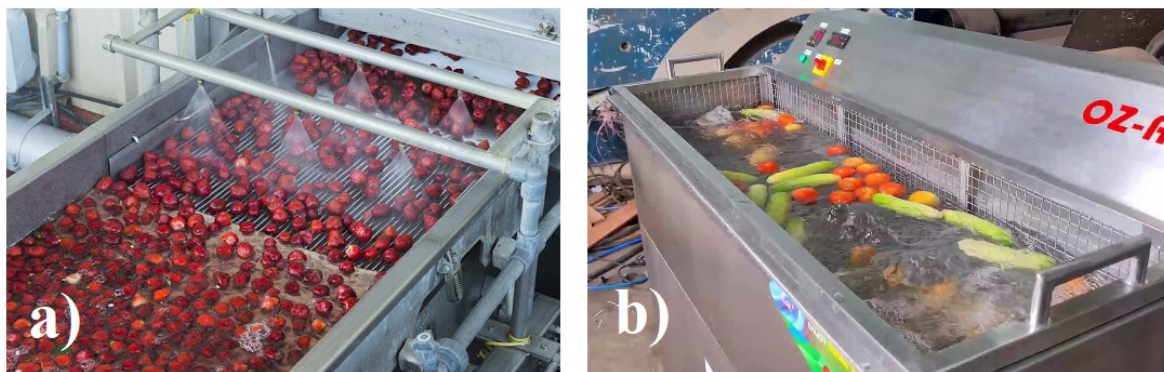
Sklizené plodiny obsahují povrchovou mikroflóru, která v následujících fázích skladování, manipulace a dělení vede ke snižování údržnosti a zhoršení organoleptických vlastností. Taktéž mohou být přítomni původci mnoha alimentárních onemocnění.

Prvořadým krokem je proto ošetření plodin v rámci posklizňových technologiích. K tomuto účelu se běžně používají chemické prostředky, mezi které se řadí roztoky chlornanu sodného, kyseliny peroctové nebo peroxidu vodíku. V současné době rostou obavy z toxických sloučenin vznikajících při reakci halogenových přípravků s přítomnou organickou hmotou. Tuto cestou mohou vznikat cytotoxické a genotoxické produkty, jako jsou např. monochloramin, THM nebo halogenoctové kyseliny. Přijatelnou a dostupnou alternativní technologií je proto ozonizace. [30]

Ozonizovaná voda nachází své uplatnění při mytí sklizených plodin, které mohou být vodou postříkovány nebo v ní být oplachovány či prány v rámci vsádkového i kontinuálního procesu. V praktickém provozu se očekává koncentrace ozonu ve vodě vyšší než 10 ppm. K usmrcení 90–95 % přítomné mikroflóry mnohdy postačí 1,5 ppm ozonu působící po dobu jednotek minut. Důvodem používání násobně vyšší koncentrace je přítomnost reaktivních sloučenin v nečistotách, které ozon rychle vyčerpávají. [30, 64]

Ozon ve vodném prostředí efektivně inaktivuje grampozitivní bakterie jako je *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* nebo *Enterococcus faecalis*. Z gramnegativních bakterií lze zmínit významný patogen *E. coli* O157:H7, dále *Pseudomonas aeruginosa*, *Yersinia enterocolitica* nebo *Shigella sonnei*. Ozonu podléhají též kvasinky z rodu *Candida* či *Zygosaccharomyces* a plísně *Botrytis*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* i jejich spory. [59, 64, 65]

Posklizňová ozonová technologie je použitelná pro širokou škálu kusového ovoce a zeleniny i pro upravené kus, např. čerstvě řezaného salátu. Obrázek 6 zachycuje různé způsoby mytí ovoce ozonizovanou vodou.



Obrázek 6: Aplikace ozonizované vody při mytí ovoce: a) postřik, b) praní [66, 67]

V plynné formě ozon napomáhá s prodloužením údržnosti sklizně během balení a skladování tím, že snižuje povrchovou mikrobiální kontaminaci plodin a provozního zařízení. Koncentrace ozonu se volí s ohledem k předpokládanému mikrobiálnímu napadení, aniž by docházelo k oxidačnímu poškození citlivých látek, zejména v povrchových vrstvách slupky. Před uložením plodin je možné jejich vstupní ošetření v tunelu s plynným ozonem (> 300 ppm) po dobu několika sekund. [7, 68]

V chladírenských komorách je hladina ozonu udržována v koncentracích desetin až jednotek ppm při teplotách < 10 °C. Pro optimální účinek ozonu je třeba udržovat relativní vlhkost vzduchu (RVV) vyšší než 80 %. Při sanitaci komory se používá koncentrací nad 200 ppm po dobu alespoň 1 hod. Inaktivace spor zelené hniloby (*Penicillium digitatum*) a modré hniloby (*Penicillium italicum*) navíc vyžaduje nasycení prostoru na RVV 95 %. [7, 64]

Ozon je možné využít k oxidaci ethylenu uvolňovaného plodinami během skladování. Etylen je jednoduchý fytohormon, který urychluje zrání a stárnutí uskladněného ovoce a zeleniny. Jeho odbouráváním se prodlužuje dozrávací fáze a oddaluje se mikrobiální zkáza zralých plodů. Nejčastěji jsou takto ošetřovány jablka, hrušky a citrusy. [7]

V minulosti bylo provedeno nespočet studií vyhodnocujících různé podmínky ozonizace (formu ozonu, koncentraci, čas působení, teplotu, RVV, pH, aj.) na desítky druhů ovoce a zeleniny s cílem etablovat ozon jako antimikrobiální činidlo. Vzhledem k odlišným experimentálním podmínkám nelze výsledky navzájem příliš porovnávat, nicméně je jasně patrný mikrobicidní účinek ozonu srovnatelný s běžnými chemickými prostředky. [13]

Předmětem studií bylo i zhodnocení změn nutričních a organoleptických vlastností, které jsou kromě podmínek ozonizace značně ovlivněny strukturou a chemickým složením dané plodiny. Tyto vlastnosti hrají stěžejní roli při výběru a rozhodování spotřebitelů.

Obecně lze shrnout, že aplikace ozonu v koncentracích desetín až nízkých desítek ppm v minutových až hodinových intervalech nemá negativní vliv. Změny jsou pozorovány hlavně při dlouhodobých (týdenních, měsíčních) expozičních dobách nebo při krátkodobém působení vysokých koncentrací (řádově stovky až tisíce ppm). [7, 13]

Při krátkodobém ošetření, v rádech minut, byla u mnoha druhů plodin zaznamenána zvýšená celková antioxidační kapacita, jakožto odpověď pletiva na oxidační stres. S rostoucím časem byly hlášeny snížené obsahy fenolických látek a kyseliny askorbové, což souvisí s jejich antioxidační povahou. Oxidace také snižuje celkový obsah cukrů a anthokyanů.

Při nešetrné ozonizaci dochází ke změnám i v rámci vizuální kvality plodin. Na povrchu se mohou objevovat tmavé léze. V jiných případech dochází ke zesvětlování barvy vlivem oxidace barviv nebo se vytváří tmavé skvrny jako důsledek oxidační přeměny fenolů. Následkem skladování v ozonové atmosféře může být postižena textura plodin. Tato oblast není dosud dostatečně prozkoumána. Texturní změny bývají vysvětlovány oxidačními změnami struktury celulózy a hemicelulóz nebo degradací fenolických příčných vazeb mezi pektinem buněčné stěny, strukturálními proteiny, popř. jinými polymery. [7, 57, 59]

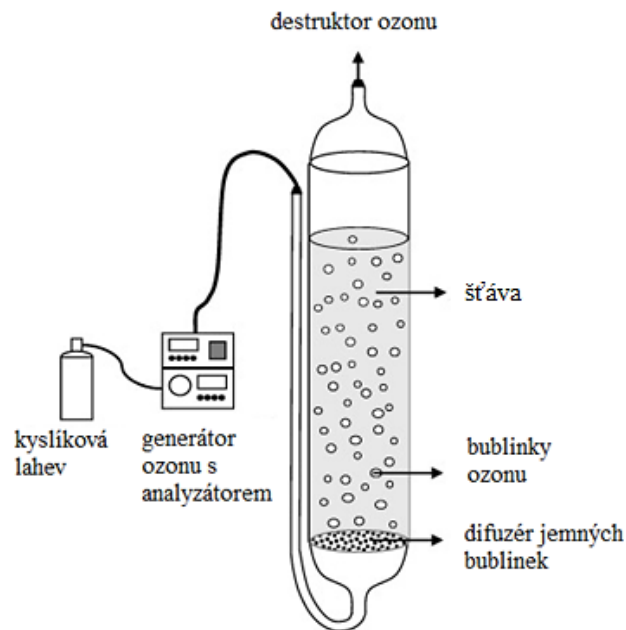
10.2 Ovocné a zeleninové šťávy

Ovocná nebo zeleninová šťáva je tekutý, zkvasitelný výrobek získaný z jedlých částí zralého a zdravého, čerstvého, chlazeného nebo zmrazeného ovoce nebo zeleniny. [69]

V 90. letech bylo v USA a ostatních státech zaznamenáno několik ohnisek s výskytem nebezpečného patogenu *E. coli* O157: H7, jenž způsobuje hemoragické kolitidy i závažný hemolyticko-uremický syndrom. Nákaza souvisela s konzumací tradičně lisovaného moštu a cideru. V roce 2001 schválila FDA použití ozonizace k ošetření šťáv. Nezbytným předpokladem byla schopnost ozonu snížit počet nejzávažnějších patogenů (*E. coli*, *Salmonella* sp. a *Listeria monocytogens*) alespoň o 5 log. Požadavek FDA vedl k rozmachu ozonové technologie jako účinné metody netepelného ošetření šťáv.

Ozonizace se provádí vstřikováním ozonu do potrubí nebo v nerezových reaktorech s instalovaným difuzérem jemných bublin (obrázek 7). Důležitá je volba vhodného ozonizačního režimu tak, aby nedocházelo ke zhoršení organoleptických vlastností šťávy. Následkem ozonizace může být hnědnutí způsobené oxidací fenolických sloučenin. [7]

Kromě mikrobiální inaktivace ozon odstraňuje také některé mykotoxiny, např. patulin. [70]



Obrázek 7: Reaktor pro ozonizaci tekutin využívající difuzér jemných bublin [71, upraveno]

10.3 Úprava balených vod

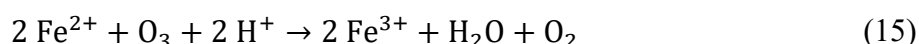
V ČR se rozlišuje balená voda minerální, pramenitá, kojenecká a pitná, přičemž mezi nimi existují kvalitativní rozdíly. První tři druhy pocházejí z chráněných podzemních zdrojů. Balená pitná voda však může pocházet i z běžné vodovodní sítě, s čímž se pojí i mírnější legislativní požadavky na její složení a původ. [72]

Pitná voda je výsledkem procesů odehrávajících se na úpravnách pitné vody. Ozon se zde používá k preoxidaci surové vody, tedy k oxidaci sloučenin železa a manganu a jejich převodu na nerozpustné látky, které se separují filtrací. Tímto zásahem i další oxidací organických látek se zlepšují organoleptické vlastnosti vody. Zásadní úlohou ozonu je zajištění hygienického zabezpečení vody, při kterém je inaktivována valná většina přítomných mikroorganismů a jsou též rozloženy toxické látky produkované sinicemi. [9, 72]

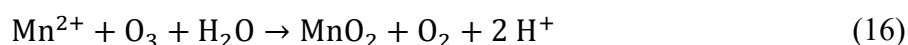
Způsoby úpravy minerálních a pramenitých balených vod jsou poněkud omezeny. Často se stává, že vyvěrající podzemní voda obsahuje nestabilní látky, které narušují její organoleptické vlastnosti a překračují stanovené koncentrační limity. Vyhláška proto povoluje odstranění takových látek, konkrétně sloučenin arzenu, manganu, železa a síry, pomocí vzduchu obohaceného ozonem s následnou filtrací nebo dekantací. Zásah musí být

nezbytně nutný, účinný a bezpečný a nesmí změnit fyzikálně-chemickou skladbu základních složek vody. Voda musí před úpravou vykazovat vyhovující mikrobiologické ukazatele uvedené v příloze vyhlášky. [72]

Pro kvalitu vody jsou i zde nejvýznamnější ionty železa a manganu. Železo se ve vodě vyskytuje v oxidačním stupni II nebo III, v závislosti na hodnotě pH, redoxním potenciálu a složení vody. Oxidační stupeň II je přítomný v redukčním prostředí podzemních vod a u dna nádrží. V oxidačním prostředí přechází do oxidačního stupně III a vzniká nerozpustný $\text{Fe}(\text{OH})_3$, jak znázorňuje chemická rovnice 15:



Na oxidaci 1 mg Fe^{2+} je teoreticky potřeba dodat 0,43 mg ozonu, kvůli spoluúčasti přítomného kyslíku je však reálná spotřeba nižší. Oxidace Mn^{2+} probíhá podle rovnice 16:



Tentokrát oxidace 1 mg Mn^{2+} spotřebuje 0,88 mg ozonu. Dávka ozonu nesmí být příliš vysoká, aby se předešlo vzniku MnO_4^- a obarvení vody do fialového odstínu.

Obě uvedené reakce probíhají velmi rychle, proto se ozon zavádí přímo do přívodního potrubí se surovou vodou nebo se ozonem probublává zásobní tank. Vzniklé nerozpustné látky se v dalším kroku filtrují přes granulované aktivní uhlí a křemičitý písek.

Vyhláška uvádí, že po úpravě voda nesmí obsahovat nadlimitní množství ozonu, bromičnanů a bromoformů a nesmí vznikat látky, které by mohly představovat ohrožení veřejného zdraví. Bromičnany vznikají, pokud jsou ve vodě přítomny bromidové ionty. Bromičnany mohou být také obsaženy v chemických látkách a přípravcích, které se používají k úpravě pitné vody, zejména v chlornanu sodném. [9, 72–74]

10.4 Umělé staření alkoholických nápojů

Připravené ovocné destiláty před zráním obsahují vyšší alkoholy, organické kyseliny, estery a aldehydy, které dodávají ostrou a drsnou příchut' i vůni. Během dlouhodobého uložení v dřevěných sudech tyto látky částečně vyprchají a částečně se pozmění vlivem vzdušného kyslíku, což se projeví zaokrouhlením chuti a vývinu příjemného aroma destilátu. Přirozeně probíhá tento proces velmi pomalu, i v řádu několika let, proto se z ekonomických důvodů často volí různé způsoby urychleného uležení (staření).

V průmyslovém měřítku se k tomu všeobecně využívá účinku směsi kyslíku či ozonu se vzduchem na ohřátý destilát při zvýšeném tlaku. Kromě oxidace sensoricky nežádoucích látek působí ozon také na přítomné nečistoty, které se pak lépe absorbují na aktivní uhlí v rámci filtrace. Zařízení na stažení destilátů jsou navrhována individuálně pro potřeby daného podniku. Na základě patentové dokumentace lze uvést např. zařízení pro kontinuální ošetřování široké škály destilátů (ginu, brandy, whiskey, vodky), které se skládá ze systému filtrů a reakční nádoby, do níž je pomocí injektoru zaváděn plynný ozon v koncentracích 5–1 000 mg/L a ponechán reagovat 1–10 min. [6, 75, 76]

Ozonizaci je možné využít i pro zkrácení časového trvání pochodů přirozeného stárnutí vín. Působení ozonu bylo zkoumáno při 45 s až 30 min. Výsledky pokusů přinesly zjištění, že nastává slabší oxidace alkoholů a zvyšuje se obsah aldehydů a těkavých kyselin, celková acidita nebyla změněna. Vliv na třísloviny a barevné látky byl významný, přičemž u červených vín byla změněna intenzita barvy. Obsah oxid siřičitého byl snížen, jelikož byl přeměněn na sírany. U bílých vín vznikl po ozonizaci šedočerný sediment, skládající se ze solí železa vázaných s tříslovinami. Tento čířící efekt zamezoval vzniku bílého zákalu. Barva zůstala světle žlutá. Činnost mikroorganismů byla obecně velmi silně omezena.

Ozonizací lze dosáhnout určité stabilizace u vín běžné jakosti nebo u vín nemocných, kdy může jít také o ochranu proti octovatění. U vín jemných, ušlechtilých, je však použití ozonu spojeno s nebezpečím porušení skladby a chuťové harmonie. [77]

10.5 Zpracování obilovin

V odvětví zpracování obilovin může ozon sloužit k eliminaci mikroorganismů a škůdců v uskladněných zrnech a ke zlepšení technologických vlastností mouky a těsta.

Nejvýznamnější je včasný a účinný zásah proti rozvoji škůdců a mikroorganismů při skladování obilí, neboť jejich aktivitou dochází ke ztrátě výnosu obilí kolem 3–10 %, v rozvojových zemích až 50 %. Největší podíl na ztrátách mají hmyzí škůdci, kteří mohou vykazovat rezistenci ke konvenčním insekticidům. Konkrétní výsledky přináší např. práce S. A. Kellse a kol., jež se zabývala studiem hubení dospělce potemníka (*Tribolium castaneum*), pilouse (*Sithophilus zeamais*) a larvy zavíječe (*Plodia interpunctella*) nasazených ve sloupci kukuřičného zrna. Výsledky ukázaly 92–100% redukci hmyzu při aplikovaných 50 ppm ozonu po dobu 3 dnů. [6, 7, 78]

Uskladněné obilí může být napadeno také plísněmi, především z rodu *Aspergillus*, *Fusarium* a *Penicillium*, které za určitých podmínek mohou produkovat nebezpečné mykotoxiny. Dle mnohých studií není dekontaminace zasaženého materiálu ozonem účinná a mohou vznikat další nežádoucí látky, jiné práce naopak ozonizaci označují jako vhodnou. I přes rozpory však zůstává zásadní omezit růstu plísní ve skladovaném obilí, s čímž ozon může pomoci. [6–8]

Ošetření obilí může probíhat v ocelových reaktorech, ve kterých se obilná masa vertikálně promíchává šnekovou hřídelí s ozonem proudícím ze dna nádoby. Rozhodující je zde především čas, koncentrace ozonu, jeho schopnost pronikat masou a vlhkost. [6, 7]

Ozonová úprava pšeničných zrn před mlýnským zpracováním zlepšila údržnost mouky i její technologické vlastnosti. Ošetření vedlo ke snížení potřebné energie v první fázi mletí zrna, což bylo způsobeno zvýšenou drobivostí vnějších vrstev a škrobového endospermu.

Dále bylo zkoumáno využití ozonu při tvorbě těsta, do kterého byl ozon přidáván ve vodě v množství mezi 4 až 60 mg/kg vyrobeného těsta. Bylo zaznamenáno zkrácení doby míchání těsta a jeho rychlejší hnětení. Při použití pšeničné mouky došlo ke zvýšení tuhosti těsta. Vysvětlením tohoto jevu může být dáno do souvislosti s pozorovaným zesíťováním proteinů vlivem jejich oxidace. Snížení obsahu vitaminů či oxidace mastných kyselin nebyly při podobných koncentracích zaznamenány, rovněž organoleptické vlastnosti mouky a těsta nebyly pozměněny. [7, 8]

Uvedené poznatky jsou klíčové pro další rozvoj ozonové technologie v oblasti zpracování obilovin. Je též důležité nadále zkoumat působení ozonu na surovinu a definovat optimální podmínky úpravy. [6]

10.6 Mléko a mléčné výrobky

Ozon nachází uplatnění již při prvovýrobě mléka. Ozonizace může nahradit chemikálie a horkou vodu používané při sanitaci potrubí, které vedou syrové mléko z dojcích stanic. Patentované jsou systémy dezinfikující vemena a struky před dojením. Ozonoterapie napomáhá také k léčbě mastitidy skotu bez nutnosti podávat antibiotika. Výhodou je fakt, že tento způsob léčby nezanechává rezidua léčiv v mléce. Dalším využitím na mléčných farmách je přidávání ozonu ve velmi nízkých koncentracích do vzduchu ve stájích za účelem zničení vzdušných patogenů a odstranění zápachu. [79]

V rámci zpracování mléka je nejčastěji zmiňována sanitace potrubí a zařízení postupy Clean-in-Place (CIP) i běžné mytí vnějších povrchů a výrobních prostor.

Hygienické zabezpečení syrového mléka je tradičně realizováno tepelnými procesy, které více či méně snižují jeho organoleptické, nutriční a technologické vlastnosti. Ozonizace jakožto alternativa pasterace byla zkoumána Sanderem již v roce 1985, který také patentoval metodu ozonového ošetření tekutin, včetně mléka a tekutých mléčných výrobků. Do praxe byla ozonizace syrového mléka zavedena švédskou firmou Pastair v roce 2007 s cílem produkovat mléko s prodlouženou trvanlivostí a minimální změnou jeho vlastností. Proces zahrnuje zavádění ozonu do proudu mléka následované krátkým zahřátím na teplotu 55–62 °C. [79–81]

V současné době probíhají výzkumy zabývající se aplikací ozonu i na další mléčné výrobky, např. smetanu či máslo. Kromě redukce mikroorganismů je pozornost věnována také vlivu na chemické, fyzikální, technologické a organoleptické vlastnosti. [82]

Již od 40. let 20. stol. se plynný ozon používá v prostorách určených pro zrání a skladování sýrů k omezení výskytu plísní, které jsou součástí vzdušné kontaminace. Mnoho studií zmiňuje fungicidní efekt ozonu na povrchu různých druhů sýrů ve zrácích prostorách při koncentracích od desetin do nízkých jednotek ppm. Pro ilustraci lze uvést práci M. A. Gabriel'yants' a kol., jež skladovali sýry švýcarského typu v chladničce při periodické ozonizaci. Při aplikaci 2,5–3,5 ppm ozonu po dobu 4 hod ve 2 až 3denních intervalech došlo k inhibici růstu plísní na sýrech i obalových materiálech. Dlouhodobým pozorováním po dobu 4 měsíců nebylo shledáno negativní ovlivnění chemického složení sýrů ani jejich organoleptických vlastností. Kontrolní, neozonizované sýry, vykazovaly růst plísní po 1 měsíci skladování. [7, 79, 83]

Ve zrácích a skladovacích prostorách je ozonizace obstarávána buď přenosnými generátory, nebo individuálně navrženými zabudovanými systémy. Příklad systému s centrálními generátory a potrubním vedením do cílových prostor je uveden na obrázku 8. [84]



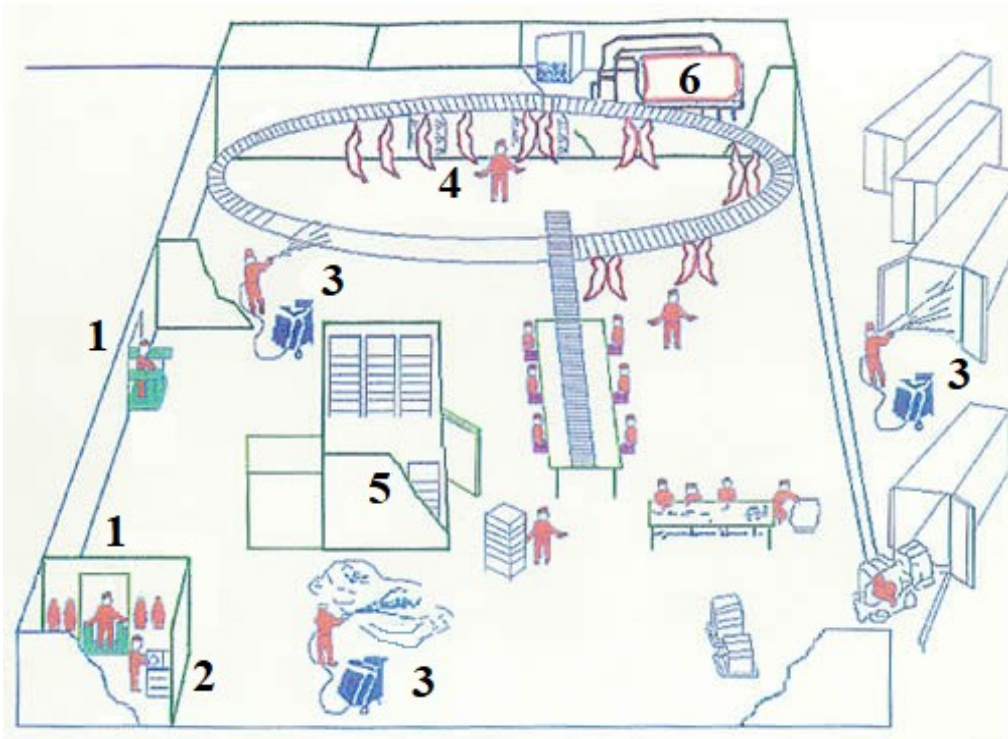
Obrázek 8: Ozonizační systém ve zracích prostorách [84]

10.7 Produkce masa

Ozonová technologie se objevuje na jatkách, v bourárnách, skladech masa i při výrobě masných výrobků. Ozonizovaná voda je používána k oplachu jatečně upravených těl (JUT) skotu, prasat i drůbeže s cílem snížit počet patogenních mikroorganismů (zejména rodů *Salmonella*, *Campylobacter*, *Listeria*, *Staphylococcus*, *Clostridium* či patogenní *E. Coli*), spor plísní (*Aspergillus*, *Mucor*, *Rhizopus*) a kvasinek (*Candida*, *Rhodotorula*, *Torulopsis*). Kromě ohrožení zdraví konzumentů se mikroorganismy podílí i na nežádoucích enzymatických změnách na povrchu i v hlubších vrstvách masa. [5]

J. O. Reagan a kol. hodnotili vliv oplachu ozonizovanou vodou na mikroflóru u hovězích JUT. Při koncentraci ozonu 0,3–2,3 ppm došlo ke snížení povrchové aerobní populace o 1,30 log CFU/cm², což bylo srovnatelné s konvenčními dezinfekčními roztoky. [85]

Jelikož se ozon ukázal jako výhodné antimikrobiální činidlo, je v současné době na trhu k dispozici mnoho řešení jeho aplikace, jak ukazuje obrázek 9.



Obrázek 9: Možnosti využití ozonu při zpracování masa: 1) dezinfekce rukavic a obuvi ozonizovanou vodou, 2) dezinfekce ručních nástrojů, nožů a rukou, 3) sanitace zařízení, podlah a přepravních prostor pomocí mobilní tlakové jednotky, 4) oplach JUT postřikem ozonizované vody, 5) ozonová atmosféra v chladírenském boxu, 6) úprava odpadní vody. [86, upraveno]

Ozonová atmosféra v chladírenských boxech napomáhá k prodloužení údržnosti JUT a masa, ovšem je třeba zvolit vhodnou koncentraci ozonu a režim jeho dávkování. [87]

Deteriorativní účinky ozonu na vlastnosti masa byly pozorovány hlavně při prodloužené kontaktní době a nadměrné koncentraci. V této souvislosti je zmiňována změna barvy masa. Ve svalech je přítomno červené barvivo oxymyoglobin obsahující své struktuře dvojmocné železo. Ozon způsobuje jeho oxidaci za vzniku trojmocného železa a vzniká hnědě zbarvený methmyoglobin. Spotřebitelé často spojují čerstvost masa s červeným zbarvením, proto může být odlišnost v barvě vnímána negativně. Zlepšená stabilizace barvy byla pozorovatelná u vepřového a hovězího masa ošetřeného ozonem v kombinaci s mléčnanem draselným. Efekt spočívá ve zvýšení aktivity laktátdehydrogenázy, která podporuje redukci methmyoglobinu na oxymyoglobin nebo deoxymyoglobin.

Dalším negativem ozonizace je oxidace mastných kyselin v tuku a s tím spojená tvorba těkavých degradačních produktů, které zanechávají nežádoucí aroma. Obecně jsou k oxidaci náchylnější části masa obsahující vyšší podíl nenasycených mastných kyselin. [7, 82]

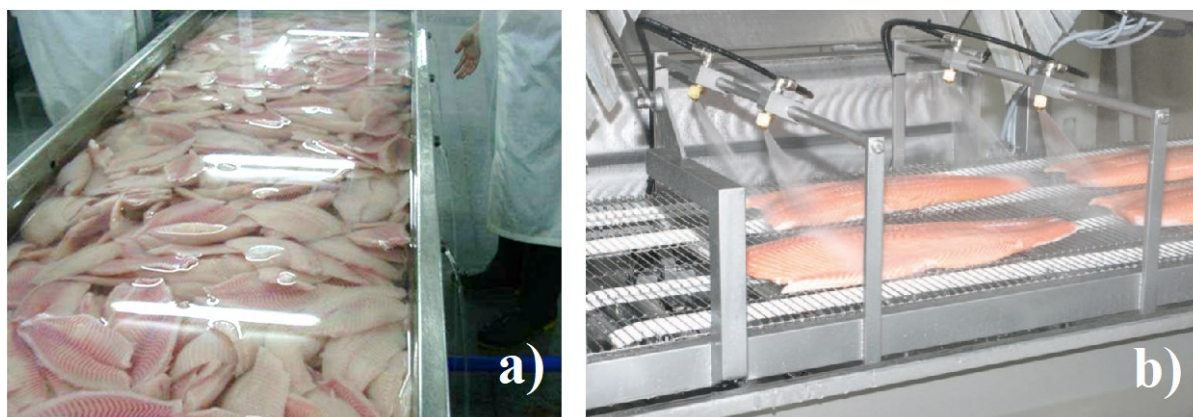
10.8 Zpracování ryb

V odvětví zpracování ryb a jiných vodních živočichů je používání ozonu na vzestupu. Pozornost se zaměřuje na bezpečnost produkce, zejména na odstraňování patogenních mikroorganismů (např. *Listeria monocytogenes* a *Vibrio cholerae*). Tradiční technologie využívají k mytí čerstvých mořských plodů vodu nebo roztoky dezinfekčních prostředků. Používání dezinfekčních látek s sebou nese riziko rozvoje mikrobiální rezistence, proto se hledají alternativní přístupy např. v podobě ozonu. [23]

Nejvíce používanou formou ozonu je ozonizovaná voda, která se obecně využívá k sanitaci zařízení, oděvů zaměstnanců, přepravek apod. Rybářská plavidla používají ozon ve skladovacích nádržích k udržení kvality ryb, dokud nejsou dodány do zpracovatelského závodu nebo na trh. Ozon lze čerpat do strojů na výrobu ledu nebo jím probublávat ledovou tříšť, a zlepšit tak jejich mikrobiální kvalitu. [23, 68]

Přímá aplikace na těla ryb a ostatních živočichů v průběhu zpracování byla předmětem mnoha studií. Antimikrobiální účinek byl zkoumán např. u vykuchaných makrel (*Trachurus trachurus*) a shimaaji (*Caranx mertensi*), u nichž ošetření ozonizovanou vodou (0,6 ppm) po dobu 30–60 min snížilo celkový počet bakterií o 2–3 log.

Při operacích jako je odšupinování, kuchání či dělení jatečného těla ryb je výhodná kontinuální aplikace ozonizované vody pro udržování čistoty pracovních ploch a zařízení. Rybí tělo může být na zpracovatelské lince omýváno ozonizovanou vodou (kolem 2,5 mg/L) před odstraněním šupin. Tak se odstraní povrchový sliz osídlený značným množstvím mikroorganismů. [7] Oplachování upraveného těla či filet je možné provést prouděním v lázni nebo postřikem, jak je zachyceno na obrázku 10.



Obrázek 10: Aplikace ozonizované vody na rybí maso: a) proudění v lázni, b) postřik [23, 88]

Kažení rybiho masa probíhá rychleji než u hospodářských zvířat. Nejběžnějšími bakteriálními rody podílejícími se na kažení jsou *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium* nebo *Proteus*. Proteolýzou vznikají sloučeniny jako je sirovodík, indol nebo různé ketony, které způsobují zápach. Využití ozonové atmosféry ve skladech nebo jeho aplikace do odvětrávacího systému napomáhá k jeho eliminaci.

Plynný ozon nachází uplatnění při chladírenském skladování rybích i ostatních mořských živočichů. Např. ošetření chlazené tilapie ozonem (6 ppm) při 0–5 °C prodloužilo skladovatelnost o 12 dní. Jiné výsledky ukázaly, že koncentrace ozonu mezi 2,5 a 3 ppm při teplotě 1–3 °C a RVV 90 % byly vyhodnoceny jako nejvhodnější ve vztahu k zamezení oxidace lipidů a tvorbě zápachu. [23]

Vzhledem k rozmanitosti zpracovávaných živočichů, podmínek a využívaných technologií je třeba nadále pokračovat ve zkoumání a vyhodnocování možností a režimů aplikace ozonu v tomto potravinářském odvětví. [7, 23]

10.9 Sanitace povrchů a zařízení

K dosažení požadované úrovně hygieny v potravinářských podnicích jsou vyžadovány účinné programy sanitace. Sanitaci lze definovat jako odstranění nečistot z povrchů přicházejících do styku s potravinami tak, aby byly čisté, odmaštěné a prosté zápachu. Druhou složkou tohoto procesu je usmrcení přítomných organismů, zejména patogenních a biofilmy tvořících mikroorganismů. Zvolený sanitační prostředek nesmí způsobovat korozi ošetřovaného materiálu a musí být aplikován v souladu s pokyny výrobce. Po sanitaci následuje důkladný oplach vodou, čímž se odplaví rezidua přípravku. [61]

Mezi nejběžnější dezinfekční prostředky patří deriváty chloru, jodu a bromu, kvartérní amoniové soli či organické peroxidy. Uvedené prostředky jsou ekonomické a mají širokou inaktivační schopnost, ale mohou zanechávat rezidua a za určitých podmínek tvoří nežádoucí organické deriváty. Další negativem je zátěž pro životní prostředí. Ozon je dobrou alternativou pro použití v potravinářském průmyslu vzhledem k jeho silné oxidační schopnosti, neškodnému rozkladu a nižší celkové spotřebě energie. [60]

Jednou z možností aplikace ozonu je postřik ozonizované vody přímo na povrchy zařízení nebo jejich demontované části, vozíky, odtoky, podlahy nebo stěny. S výhodou se využívají mobilní tlakové systémy poskytující proud ozonizované vody, které nachází uplatnění v

mnoha potravinářských oblastech, mimo jiné např. k výplachu sudů a kotlů v pivovarech a vinařstvích. Příklad takového zařízení je zobrazen na obrázku 11. [89]



Obrázek 11: Mobilní ozonizační zařízení, AGW–0500 [89]

Sanitace dubových vinařských sudů je dvoufázový proces. Nejdříve jsou sudy propláchnuty teplou vodou, poté následuje cca 2minutové oplachování studenou ozonizovanou vodou o koncentraci kolem 2,5 mg/l. Tento sanitační režim je dostatečný k inaktivaci nežádoucích mikroorganismů při zachování struktury dřeva a jeho aroma. [68]

Při práci v prostředí ozonu je třeba dbát na dodržování zákonných limitů koncentrace ozonu v prostředí. Prostory, ve kterých probíhá ozonizace, je doporučeno oddělit např. fóliemi a ozon odvádět ventilačním systémem. Rovněž mohou být zařazeny absorbery obsahující oxid manganičitý, které ozon katalyticky rozkládají. Úrovní ozonu by měl odpovídat ochranný oděv a ochranné pomůcky zaměstnanců, zahrnující zejména respirátor. [7]

Výsledky některých experimentů, které se zabývaly hodnocením antimikrobiálních účinků ozonu, jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Vyhodnocení antimikrobiálního účinku ozonu při sanitaci [90]

Cíl	Podmínky	Mikroorganismus	Výsledek
CIP systém v mlékárně	Ozon. voda; 0,5 ppm; po dobu 10 min	<i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>C. albicans</i>	99% redukce počtu
Konvice, stoly a pláště zařízení (nerezová ocel)	Ozon. voda; 2 ppm; po dobu 1 min	Nespecifikováno	63,1–99,9% redukce CPM (dle povrchu)
Povrchy zařízení v mlékárně (nerezová ocel)	Plynný ozon; 22 °C; RVV 77 %; po dobu 4 hod	<i>E. coli</i> , <i>S. liquefaciens</i> , <i>S. aureus</i> , <i>L. innocua</i> , <i>R. rubra</i>	Redukce počtu o 1,65 log až 5,64 log
Přeppravky (plast)	Ozon. voda; 2 ppm; po dobu 1 min	Nespecifikováno	68,8–97,4% redukce při bioluminiscenčním testu
Podlahy na více a méně vytížených místech	Ozon. voda; 2 ppm; po dobu 1 min	Nespecifikováno	67,0–95,6% a 84,3–99,9% redukce CPM
Povrchy (nerezová ocel)	Plynný ozon (v komoře); 20 °C; RVV 50 % po dobu 1 hod	<i>M. luteus</i>	Redukce počtu o 2 až 3 log
Vybavení, stěny, podlahy, stoly, dopravníky (pravidelně čištěné)	Ozon. voda; 3,0–3,5 ppm	<i>S. choleraesuis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>C. jejuni</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>A. flavus</i> , <i>E. coli</i>	Redukce počtu o 4 až 6 log

Hlavní přednosti ozonizace se však objevují, když se používá jako součást systému Clean-in-Place. Systém CIP je automaticky ovládaný sanitační program, který poskytuje řadu mycích a oplachovacích cyklů na vnitřní povrchy zpracovatelského zařízení, jako jsou nádrže, potrubí aj. V porovnání s běžně využívanými roztoky kyselin, zásad a dezinfekcí má použití ozonizované vody mnoho výhod. Jelikož ozon nezanechává rezidua, není třeba vícenásobné oplachování, které je v průmyslu standardní praxí. Voda obohacená ozonem je navíc účinná při nízkých teplotách, což výrazně snižuje náklady. Dále odpadá potřeba skladovat nebezpečné látky, neboť se ozon vytváří na místě. Systémy CIP využívající ozon se v praxi objevují v mlékárenství, vinařství či pivovarnictví. [7, 61]

Plynný ozon je možné využít k dezinfekci prostor chladicích a mrazicích zařízení nebo zracích komor, často s využitím i UV záření. [5]

B. Dosti a kol. porovnali účinek ozonu a chloru na biofilmy tvořené zástupci rodu *Pseudomonas*. Biofilmy přítomné na povrchu z nerezové oceli byly vystaveny ozonu (0,6 ppm po dobu 10 min) a chloru (100 ppm po dobu 2 min) a bylo zjištěno, že ozon způsobil redukci počtu bakterií v biofilmech o 7,3 log, zatímco chlor o 3,07 log. [91]

10.10 Odpadní voda

Pitná voda je pro potravinářský průmysl klíčovou složkou. Kromě vody jakožto součásti vyráběných potravin se její velké objemy spotřebují na mnoho operací, např. na sanitaci zařízení a jejich oplachování, výrobu páry, jako médium pro přenos tepla nebo k mytí, namáčení a blanšírování rostlinných surovin. Potravinářství patří tradičně mezi obory s nejvyšší spotřebou vody, proto se z ekonomických i ekologických důvodů klade důraz na její recyklaci. [8]

Odpadní voda pocházející zejména z podniků zpracovávajících mléko, maso nebo mořské plody obsahuje velké množství sacharidů, lipidů, proteinů a minerálních látek, a poskytuje tak vhodné podmínky pro růst mikroorganismů. Kvalita vody se hodnotí dle biochemické spotřeby kyslíku (BSK), chemické spotřeby kyslíku (CHSK) a obsahu organického uhlíku (COU). Bylo zjištěno, že používání vysokých dávek chlorových dezinfekčních přípravků, např. při sanitaci nebo mytí ovoce a zeleniny, značně znehodnocuje vzniklou odpadní vodu, ve které při vyšším obsahu COU mohou vznikat nadlimitní koncentrace karcinogenních sloučenin. [7, 92]

Pro účely úpravy odpadní vody bylo vyvinuto několik postupů založených na membránové filtraci a reverzní osmóze. Membránová filtrace je kombinována s chemickou předúpravou. Ozon je přijatelnou alternativou tradičních prostředků, neboť prostřednictvím koagulačních a flokulačních účinků zlepšuje separaci nečistot na filtrech a snižuje mikrobiální zátěž vody, což také souvisí s prodloužením životnosti filtrů. [7, 8, 60]

Ozon preoxiduje organický materiál a zlepšuje jeho biodegradaci na čistírnách odpadních vod. S rostoucím množstvím oxidovatelných nečistot se navyšuje spotřeba ozonu, navíc klesá jeho mikrobicidní účinek. Je-li ozon využíván primárně k redukci počtu mikroorganismů, je třeba před jeho aplikací zařadit filtraci organických částic. [60]

10.11 Odstraňování pachů

Mnohé potravinářské provozy jsou zdrojem látek, které obtěžují svým zápachem. Zvýšená pachová zátěž se může týkat vlastních prostor i širšího okolí areálu.

Pachy produkované potravinářským průmyslem jsou obvykle způsobeny biologickými nebo chemickými procesy, ke kterým dochází v důsledku zpracování potravin. Dalším zdrojem zápachu jsou uskladněné materiály. Skladovací podmínky, které nejsou vhodné pro konkrétní materiály (suroviny, potraviny a odpadní produkty), mohou vést k jejich rozkladu, a tím k tvorbě zápachu.

Pachy jsou výsledkem produkce široké škály karbonylových sloučenin, organických kyselin, alkoholů, thiolů, sulfidů, aminů, čpavku či těkavých uhlovodíků. [47]

Legislativa v ČR se zabývá prevencí vzniku pachových látek a popisuje postup k stanovení jejich emisních limitů. Limity pro jednotlivé typy stacionárních zdrojů se tvoří na základě vyhlášky č. 415/2012 Sb. nebo je může stanovit krajský úřad v povolení daného zdroje. Plošně žádné limity určeny nejsou. V rámci omezování emise pachových látek stanovuje uvedená vyhláška např. provedení odsávání odpadních plynů. Zde je prostor pro technické řešení specializovaných firem, které instalují ozonizační systémy do digestoří a jiných zařízení pro odtah vzduchu z problematických prostor. Principem odstraňování zápachu pomocí ozonu je pozměnění chemické struktury nežádoucích sloučenin, čímž vznikají látky sensoricky neutrální. [93, 94]

Mezi hlášené použití ozonizované vody lze zařadit odstranění skatolických, indolických a sirných sloučenin při sanitaci lihovarnických kotlů nebo snižování hladin geosminu a 2-methylisoborneolu ze svaloviny ryb během omývání a praní. [47]

10.12 Degradace pesticidů

Během zemědělské prvovýroby se pesticidy využívají k prevenci a omezování výskytu škůdců, což pozitivně ovlivňuje výnosy a posklizňové skladování plodin.

Negativním jevem je setrvávání zbytkových množství pesticidů v půdě a povrchových vrstvách plodin. Limitní hodnoty reziduí pesticidů v potravinách a krmivech jsou uvedeny v legislativě EU, nicméně s ohledem na environmentální i zdravotní dopady je v současné době trendem spotřebu pesticidů snižovat.

V rámci posklizňových technologií bylo vyvinuto několik metod ke snížení reziduí pesticidů, např. mytí (praní) v roztocích kyselin a chlorových přípravků, fotochemická nebo mikrobiální degradace. Ozon může nahradit zavedené prostředky v procesu mytí a praní, aniž by do systému zaváděl další chemické látky. Ozonovou úpravu lze použít pro degradaci širokého spektra pesticidů, včetně několika hlavních kategorií, jako jsou organofosfáty, karbamáty, pyretroidy a organochlorové látky. [7, 95]

J. Wu a kol. zkoumali účinek oplachování ozonizovanou vodou na degradaci 4 druhů pesticidů aplikovaných na nadzemní části brukve čínské (*Brassica rapa*). Studie ukázala, že ze zeleniny bylo odstraněno více než 60 % cypermetrinu a 27–55 % diazinonu, methylparathionu a parathionu. Oplachování při počáteční koncentraci 1,4 mg/L rozpuštěného ozonu po dobu 15 min odstranilo rezidua pesticidů v rozmezí 27–34 %. Vyšší koncentrace (2,0 mg/L) zvýšila účinnost degradace na 30–54 %. Při prodlouženém oplachování (2,0 mg/L) po dobu 30 min bylo zaznamenáno snížení o 45–61 %. [96]

Ostatní autoři taktéž potvrzují významný účinek ozonizované vody i plynu ve vztahu k odstraňování pesticidů z ovoce, zeleniny, obilovin a dalších produktů. Aktuální předmětem výzkumů je identifikace a toxikologické zhodnocení možných vedlejších produktů ozonizace. Při vhodné kombinaci ozonové technologie, ošetřovaného materiálu a ozonizačního režimu se tento způsob degradace pesticidů jeví jako velmi výhodný a perspektivní. [7, 95]

10.13 Degradace mykotoxinů

Mykotoxiny nejsou problém jen při skladování obilovin, ale jsou také spojeny s produkcí skořápkových plodů, koření, čerstvého i sušeného ovoce, zeleniny a šťáv.

Dekontaminaci uvedených surovin se v současné době věnuje mnoho studií. Při experimentech s kukuřicí, arašídami, pistáciemi, sušenými fíky a pepřem byla dosažena až 95% redukce nejnebezpečnějších mykotoxinů. Vzhledem k rozličné chemické struktuře mykotoxinů musí být jejich degradace hodnocena individuálně. Například bylo zjištěno, že aflatoxiny B1 a G1 byly rychle degradovány použitím plynného 2 % obj. ozonu, zatímco méně toxické aflatoxiny B2 a G2 byly odolnější a vyžadovaly vyšší koncentraci, neboť v jejich struktuře nebyla přítomna náchylná dvojná vazba mezi C₈ a C₉.

Při rozkladu mykotoxinů se mnohdy tvoří různé degradační produkty, které mohou mít toxikologické vlastnosti podobné nebo i závažnější než původní látka. Míra degradace souvisí se strukturou mykotoxinu, přičemž jednoduché látky jsou degradovány téměř úplně.

Ozonizace se zdá být slibnou aplikací hlavně pro ošetřování krmných směsí. Výskyt mykotoxinů lze vyloučit při zamezení růstu jejich producentů – plísní, což souvisí se správnými skladovacími a zpracovatelskými podmínkami. [97]

10.14 Plastové obalové materiály

Další oblastí aplikace ozonu je sterilizace obalových materiálů, zejména masivně využívaných plastových obalů. [61]

Použití ozonu s sebou nese možné změny strukturních, mechanických a bariérových vlastností polymerů. Jako příklad lze uvést, že úprava ozonem výrazně zvýšila povrchové napětí a hydrofilitu polyethylenu (PE), polypropylenu (PP) a polyethylentereftalátu (PET) a zlepšila jejich adhezní vlastnosti. [61]

B. F. Ozen a kol. zkoumali vliv plynného ozonu na mechanické vlastnosti polyethylenové a polyamidové folie při koncentracích od 2,1 do 4,3 mg/L. Bylo zjištěno, že polymerní řetězce jsou oxidačně degradovány a jejich náchylnost roste s teplotou a koncentrací ozonu. Při nižší teplotě (5 °C) však došlo ke zvýšení pevnosti v tahu, zřejmě v důsledku zesílení intermolekulárních sil vlivem interakcí polárních skupin a přestavby molekulární struktury. Výsledky měření poměrného prodloužení při přetržení vykazovaly obdobný trend. [98]

Dále bylo zjištěno, že 24hodinové působení ozonu mělo za následek 40–50% snížení propustnosti pro kyslík u obou materiálů folie. Snížení plynopropustnosti může být též vysvětleno zvýšením intermolekulární síly mezi polymerními řetězci, což v tomto případě zmenšuje volný objem. [98]

V praxi je při ošetřování obalů využíváno nízkých koncentrací ozonu spolu s krátkou dobou působení, která může činit nanejvýš jednotky minut, což vylučuje negativní ovlivnění vlastností plastů. [99]

10.15 Inovativní ozonové technologie

Ozon jakožto dezinfekční prostředek byl potravinářským průmyslem přijat jako samostatné činidlo nebo v kombinaci s jinými metodami. Dobrým příkladem takové kombinace je technologie Ventafresh, vyvinutá společností SwissFood Tech Management, Inc. [100]

Proces Ventafresh využívá ozon, spolu s UV zářením, ultrazvukem a balením v krátkodobé ozonové atmosféře. První prototyp této technologie byl zaveden již v roce 2002 pro zpracování čerstvých krájených produktů, jako je ovoce a zelenina. Do úspěšného procesu byly následně zahrnuty i další potraviny: maso, těstoviny, rýže, brambory a ostatní.

Technologii využívá např. švýcarská společnost Sushi-Mania. K zajištění vysoké úrovně hygienického zabezpečení je v prostorách továrny udržována teplota 3 °C a veškeré vybavení a prostory jsou dezinfikovány pomocí ozonu, včetně přiváděného vzduchu. Ryby, zelenina a rýže se omývají elektrolyzovanou vodou za spoluúčasti ultrazvuku, který napomáhá k rozrušování částic nečistot a inaktivaci mikroorganismů. Samotné sushi je před balením dezinfikováno ozonem a UV zářením ve speciálním tunelu (obrázek 12). Obalové materiály jsou dezinfikovány stejným způsobem. Ve fázi balení sushi je do boxu vháněn kyslík a po jeho uzavření folií je opět aplikováno UV záření v dalším tunelu. Zde je nejprve použito UV záření o vlnové délce 185 nm, což vede k tvorbě molekul ozonu ve vnitřní atmosféře boxu. Tento krok slouží k závěrečné ozonizaci již zabaleného produktu. Následuje ozáření UV zářením o vlnové délce 254 nm, které většinu ozonu rozloží.

Technologie Ventafresh dle výrobce zvyšuje trvanlivost sushi produktů ze 3 na 7 dní, aniž by byly použity konzervační látky. [68, 100]



Obrázek 12: Tunel využívající ozon a UV záření. [100]

Čerstvé ovoce a zelenina jsou po ozonovém procesu uzavírány do hermetických kontejnerů nebo pytlů, které se dostávají do tranzitních chladíren. Tyto prostory jsou sterilní zóny ošetřené UV zářením. Trvanlivost produktů za uvedených podmínek činí 14 až 21 dnů. [100]

Další inovativní přístup dezinfekce syrových a nezpracovaných potravinářských produktů byl vyvinut na Purdue University (USA) v roce 2009. Principem je vznik ozonu uvnitř uzavřených obalů pomocí nízkoproudých vysokonapěťových elektrod umístěných na opačných stranách obalu. Ionizace generuje baktericidní molekuly s použitím nízkého proudu (15 mA), přičemž uvnitř obalu nevzniká téměř žádné teplo. [7]

ZÁVĚR

Cílem rešeršní bakalářské práce bylo zmapovat možnosti využití ozonu v potravinářském průmyslu. Pro postihnutí všech aspektů tohoto tématu byly uvedeny i informace související s ozonem jakožto samostatnou chemickou látkou. Byl nastíněn všeobecný chemický, historický, legislativní, toxikologický či environmentální kontext. Dále byla věnována pozornost způsobům tvorby ozonu a přípravě ozonizované vody. V neposlední řadě byl popsán mechanismus účinku ozonu.

Ozon je tradičně spojován s hygienickým zabezpečením pitné vody, což byla i jeho první průmyslová aplikace. Se změnou legislativy v USA a poté i v EU na přelomu milénia doznaly ozonizační technologie v potravinářství značného rozmachu. Ozonu byl uznán jako bezpečný a byl mu udělen status pomocné látky při výrobě potravin.

Obecně je ozon používán jako silné biocidní činidlo při sanitaci provozních prostorů, zařízení a nástrojů. Oplachování a mytí ovoce, zeleniny, JUT a ryb ozonizovanou vodou prokazatelně snižuje mikrobiální kontaminaci. Stejný efekt má i skladování surovin a potravin v ozonové atmosféře, např. u sýrů a obilovin omezuje výskyt plísní a škůdců. Ozon nachází uplatnění i při snižování pachové zátěže prostředí. Velmi rannou aplikací je umělé staření alkoholických nápojů, zejména destilátů a vín. Z nápojů lze ještě zmínit balené vody, které se ozonem upravují a stabilizují.

Rizikem ozonizace jsou možné oxidační změny potravin spojené s negativním ovlivněním jejich nutričních, organoleptických a technologických vlastností. Návrh optimálního ozonizačního režimu je proto zásadní.

Zavedení ozonizačních technologií v potravinářství je v současné době podmíněno značnými počátečními investicemi. Pozitivem již zavedené praxe jsou finanční úspory, které pramení z tvorby ozonu *in situ* a možností jeho použití. Ozon je ceněný kvůli svému šetrnému rozkladu bez zanechání reziduí, což z něho činí perspektivní alternativu zejména chlorových dezinfekčních přípravků.

Pokračující vědecké studie se zaměřují na využití potenciálu ozonu k odstraňování kontaminujících látek přítomných v potravinovém řetězci, jako jsou např. mykotoxiny a pesticidy. Další oblastí výzkumu je kinetika ozonizace a její vliv na tvorbu nežádoucích meziproduktů v potravinách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RUBIN, Mordecai B. The History of Ozone. The Schönbein Period, 1839-1868. *Bulletin for the History of Chemistry* [online]. 2001, **26**(1), 40-56 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1053-4385. Dostupné z: http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/v26-1/v26-1%20p40-56.pdf
- [2] RUBIN, Mordecai B. The history of ozone. II. 1869-1899 (1). *Bulletin for the History of Chemistry* [online]. 2002, **27**(2), 81-106 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1053-4385. Dostupné z: http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/v27-2/v27-2%20p81-106.pdf
- [3] RICE, Rip G. a Aharon NETZER. *Handbook of Ozone Technology and Applications*. Ann Arbor Science, 1982. ISBN 02-504-0324-2.
- [4] LA COUX, Henri a Henri Marie Antoine Joseph DE LA COUX DES ROSEAUX. *L'Ozone et ses applications industrielles*. Paris: Vve. Ch. Dunod, 1904.
- [5] KIM, Jin-Gab, Ahmed E. YOUSEF a Sandhya DAVE. Application of Ozone for Enhancing the Microbiological Safety and Quality of Foods: A Review. *Journal of Food Protection* [online]. 1999, **62**(9), 1071-1087 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0362-028X. Dostupné z: doi:10.4315/0362-028X-62.9.1071
- [6] VERMA, Vikash Chandra. Applications and Investigations of Ozone in Cereal Grain Storage and Processing: Benefits and Potential Drawbacks. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* [online]. 2018, **7**(576), 5034-5041 [cit. 2022-05-16]. ISSN 2319-7706. Dostupné z: <https://www.ijcmas.com/special-issue-7.php>
- [7] O'DONNELL, Colm, B. K. TIWARI, P. J. CULLEN a Rip G. RICE, ed. *Ozone in Food Processing* [online]. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2012 [cit. 2022-03-15]. ISBN 9781118307472. Dostupné z: doi:10.1002/9781118307472
- [8] PANDISELVAM, R., S. SUBHASHINI, E.P. BANUU PRIYA, Anjineyulu KOTHAKOTA, S.V. RAMESH a S. SHAHIR. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science & Engineering* [online]. 2019, **41**(1), 17-34 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0191-9512. Dostupné z: doi:10.1080/01919512.2018.1490636
- [9] RAKNESS, Kerwin L. *Ozone in Drinking Water Treatment - Process Design, Operation, and Optimization* [online]. Denver: American Water Works Association, 2005 [cit. 2022-03-15]. ISBN 978-1-61583-816-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpODWTPDO3/ozone-in-drinking-water/ozone-in-drinking-water>

- [10] BATAKLIEV, Todor, Vladimir GEORGIEV, Metody ANACHKOV a Slavcho RAKOVSKY. Ozone decomposition. *Interdisciplinary Toxicology* [online]. 2014, 7(2), 47-59 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1337-9569. Dostupné z: doi:10.2478/intox-2014-0008
- [11] KOIKE, Kunihiko, Masaharu NIFUKU, Koichi IZUMI, Sadaki NAKAMURA, Shuzo FUJIWARA a Sadashige Horiguchi. Explosion properties of highly concentrated ozone gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. 2005, 18(4-6), 465-468 [cit. 2022-03-15]. ISSN 09504230. Dostupné z: doi:10.1016/j.jlp.2005.07.020
- [12] MCCLURKIN, Janie D., Dirk E. MAIER a Klein E. ILELEJI. Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. *Journal of Stored Products Research* [online]. 2013, 55, 41-47 [cit. 2022-03-15]. ISSN 0022474X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jspr.2013.07.006
- [13] MILLER, Fátima A., Cristina L. M. SILVA a Teresa R. S. BRANDÃO. A Review on Ozone-Based Treatments for Fruit and Vegetables Preservation. *Food Engineering Reviews* [online]. 2013, 5(2), 77-106 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1866-7910. Dostupné z: doi:10.1007/s12393-013-9064-5
- [14] GREENWOOD, N. N. a A. EARNSHAW. *Chemistry of the elements*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, c1997. ISBN 978-0750633659.
- [15] GLEASON, Karin. L. Science: Ozone Basics. *Stratospheric Ozone: Monitoring and Research in NOAA* [online]. 20.03.2008 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.ozonelayer.noaa.gov/science/basics.htm>
- [16] HARRISON, Roy M. *Pollution: causes, effects and control*. 4th ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2001. ISBN 978-0-85404-621-8.
- [17] ZÁVODSKÁ, Eva a Dušan BILČÍK. Troposférický ozón a riziká rastu jeho koncentracie. In: LITSCHMANN, T. a J. ROŽNOVSKÝ. *Agrometeorologická konference 93.: Sborník referátů*. Brno: Česká bioklimatologická společnost, 1993, s. 49-52.
- [18] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy a Montrealský protokol o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/videnska_umluva_montrealsky_protokol_dokument
- [19] RAMIREZ-GONZALEZ, Ignacio Arturo, Juan Antonio AÑEL a Antonio CID SAMAMED. Ozone measurement practice in the laboratory using Schönbein's method. *Geoscience Communication* [online]. 2020, 2001, 3(1), 99-108 [cit. 2022-03-15]. ISSN 2569-7110. Dostupné z: doi:10.5194/gc-3-99-2020

- [20] MCELROY, C.T. a P.F. FOGAL. Ozone: From discovery to protection. *Atmosphere-Ocean* [online]. 2008, **46**(1), 1-13 [cit. 2022-03-15]. ISSN 0705-5900. Dostupné z: doi:10.3137/ao.460101
- [21] ELVIS, AM a JS EKTA. Ozone therapy: A clinical review. *Journal of Natural Science, Biology and Medicine* [online]. 2011, **2**(1) [cit. 2022-03-15]. ISSN 0976-9668. Dostupné z: doi:10.4103/0976-9668.82319
- [22] U.S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION. Guidance for Industry: Recommendations for Submission of Chemical and Technological Data for Direct Food Additive Petitions. *U.S. Food & Drug Administration* [online]. 20.09.2018 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/guidance-industry-recommendations-submission-chemical-and-technological-data-direct-food-additive>
- [23] GONÇALVES, Alex Augusto. Ozone: an emerging technology for the seafood industry. *Brazilian Archives of Biology and Technology* [online]. 2009, **52**(6), 1527-1539 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1516-8913. Dostupné z: doi:10.1590/S1516-89132009000600025
- [24] Směrnice Rady 96/61/ES ze dne 24. září 1996 o integrované prevenci a omezování znečištění. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 1996, L 257/26. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=cellar:e81fef3f-8c7d-4683-93fc-c3bc9cacbb96>
- [25] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 178/2002 ze dne 28. ledna 2002, kterým se stanoví obecné zásady a požadavky potravinového práva, zřizuje se Evropský úřad pro bezpečnost potravin a stanoví postupy týkající se bezpečnosti potravin. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2002, L 31/1. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32002R0178>
- [26] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1333/2008 ze dne 16. prosince 2008 o potravinářských přídatných látkách (Text s významem pro EHP). In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2008, L 354/16. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32008R1333>
- [27] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/13/ES ze dne 20. března 2000 o sbližování právních předpisů členských států týkajících se označování potravin, jejich obchodní úpravy a související reklamy. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2000, L 109/29. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=cellar%3A1a439c9d-082d-44b0-a5dd-b5944634b034>
- [28] ČESKO. Zákon č. 324/2016 Sb. o biocidních přípravcích a účinných látkách a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o biocidech). In: *Sbírka zákonů ČR*. 2016, částka 126. Dostupné také z: <https://psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=324&r=2016>

- [29] Směrnice Komise 2003/40/ES ze dne 16. května 2003, kterou se stanoví seznam, koncentrační limity a požadavky na označování složek přírodních minerálních vod a požadavky na použití vzduchu obohaceného ozonem při úpravě přírodních minerálních vod a pramenitých vod. In: *Úřední věstník Evropské unie*. L 126/34. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32003L0040>
- [30] SARRON, Elodie, Pascale GADONNA-WIDEHEM a Thierry AUSSENAC. Ozone Treatments for Preserving Fresh Vegetables Quality: A Critical Review. *Foods* [online]. 2021, **10**(3) [cit. 2022-03-16]. ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods10030605
- [31] *Global Harmonization Initiative: Advocating science-based food safety law and trade* [online]. Vienna [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.globalharmonization.net/about>
- [32] ROESKE, Wolfgang. *Trinkwasserdesinfektion: Grundlagen, Verfahren, Anlagen, Geräte, Mikrobiologie, Chlorung, Ozonung, UV-Bestrahlung, Membranfiltration, Qualitätssicherung*. 2007. München: Oldenbourg Industrieverlag. ISBN 978-3-8356-3119-9.
- [33] STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. Odpovědi na nejčastější otázky ohledně ozónu ve venkovním ovzduší. *Státní zdravotní ústav* [online]. 22.02.2008 [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: http://szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/dokumenty_zdravi/ozon.pdf
- [34] AMANN, Markus et al. Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution. Copenhagen: World Health Organization, 2008. ISBN 978-92-890-42895. Dostupné také z: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78647/E91843.pdf
- [35] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Health Effects of Ozone in the General Population* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients-health/health-effects-ozone-general-population#symptoms>
- [36] BROMBERG, Philip A. Mechanisms of the acute effects of inhaled ozone in humans. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* [online]. 2016, **1860**(12), 2771-2781 [cit. 2022-03-18]. ISSN 03044165. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbagen.2016.07.015
- [37] MUDWAY, I. Ozone and the lung: a sensitive issue. *Molecular Aspects of Medicine* [online]. 2000, **21**(1-2), 1-48 [cit. 2022-03-18]. ISSN 00982997. Dostupné z: doi:10.1016/S0098-2997(00)00003-0

- [38] AL-HEGELAN, Mashael, Robert M. TIGHE, Christian CASTILLO a John W. HOLLINGSWORTH. Ambient ozone and pulmonary innate immunity. *Immunologic Research* [online]. 2011, **49**(1-3), 173-191 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0257-277X. Dostupné z: doi:10.1007/s12026-010-8180-z
- [39] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project: Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide* [online]. Copenhagen, 2013 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/238956/Health_risks_air_pollution_HRAPIE_project.pdf
- [40] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Informace o zdravotních rizicích spojených s kvalitou ovzduší v roce 2015* [online]. 2015 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzduši/\\$FILE/000-Zdravotni_rizika_2015-20190708.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzduši/$FILE/000-Zdravotni_rizika_2015-20190708.pdf)
- [41] ČESKO. Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2012, částka 69. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=201&r=2012>
- [42] ČESKO. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2007, částka 111. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=361&r=2007>
- [43] CALIFORNIA DEPARTMENT OF INDUSTRIAL RELATIONS. Table AC-1: Permissible exposure limits for chemical contaminants. [online]. [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: https://www.dir.ca.gov/title8/5155table_ac1.html
- [44] INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG. *GESTIS - Internationale Grenzwerte für chemische Substanzen* [online]. [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents/index.jsp>
- [45] DEMIRCI, Ali a Michael O. NGADI. *Microbial Decontamination in the Food Industry - Novel Methods and Applications* [online]. Elsevier, 2012 [cit. 2022-03-18]. ISBN 978-0-85709-575-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMDFINMAA/microbial-decontamination/microbial-decontamination>
- [46] WAGNER, H.-E., R. BRANDENBURG, K.V. KOZLOV, A. SONNENFELD, P. MICHEL a J.F. BEHNKE. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. *Vacuum* [online]. 2003, **71**(3), 417-436 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/S0042-207X(02)00765-0

- [47] BRODOWSKA, Agnieszka Joanna, Agnieszka NOWAK a Krzysztof ŚMIGIELSKI. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* [online]. 2018, **58**(13), 2176-2201 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1040-8398. Dostupné z: doi:10.1080/10408398.2017.1308313
- [48] PASCHOTTA, Rüdiger. Mercury Vapor Lamps. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/mercury_vapor_lamps.html
- [49] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – lineární zářivky. *SVĚTLO* [online]. FCC Public, 2008, (2), 56-58 [cit. 2022-03-18]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-linearni-zarivky--15796>
- [50] LAGUNAS-SOLAR, MC. Food Technologies: Pulsed Ultraviolet Radiation Processing. *Encyclopedia of Food Safety* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 225-238 [cit. 2022-03-18]. ISBN 9780123786135. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-378612-8.00261-4
- [51] CLAUS, Holger. Ozone Generation by Ultraviolet Lamps. *Photochemistry and Photobiology* [online]. 2021, **97**(3), 471-476 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0031-8655. Dostupné z: doi:10.1111/php.13391
- [52] OXIDATION TECHNOLOGIES, LLC. Ozone production from UV. *Oxidation Technologies, LLC*. [online]. c2017 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.oxidationtech.com/ozone/ozone-production/uv-lamp.html>
- [53] ONO, Ryo, Yusuke NAKAGAWA, Yusuke TOKUMITSU, Hiroyuki MATSUMOTO a Tetsuji ODA. Effect of humidity on the production of ozone and other radicals by low-pressure mercury lamps. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [online]. 2014, **274**, 13-19 [cit. 2022-03-18]. ISSN 10106030. Dostupné z: doi:10.1016/j.jphotochem.2013.09.012
- [54] WHITE, George Clifford. *White's handbook of chlorination and alternative disinfectants* [online]. 5th ed. Hoboken, N.J: Wiley, c2010 [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-1-61583-475-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWHCADE05/whites-handbook-chlorination/whites-handbook-chlorination>
- [55] PRIYANKA, B.S., Navin K. RASTOGI a Brijesh K. TIWARI. Opportunities and Challenges in the Application of Ozone in Food Processing. *Emerging Technologies for Food Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 335-358 [cit. 2022-05-16]. ISBN 9780124114791. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-411479-1.00019-X

- [56] UNČOVSKÝ, Ondřej. Všechno co jste chtěli vědět o ozonu a UV (ale báli jste se zeptat). *ASIO, spol. s r.o.* [online]. 01.01.2013 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/161.vsechno-co-jste-kdy-chteli-vedet-o-ozonu-a-uv-ale-bali-jste-se-zeptat>
- [57] DEGENHARDT, S, Y CHERIGUEN, T GEILING a M HOFFMANN. Micro-Venturi injector: design, experimental and simulative examination. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2016, **757** [cit. 2022-05-16]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/757/1/012027
- [58] Venturi Fluid Jets Ejectors. In: *Hanwel* [online]. c2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://hanwel.com/en/products/venturi-fluid-jets/venturi-fluid-jets-ejectors/>
- [59] PRABHA, Vithu, Rahul Deb BARMA, Ranjit SINGH a Aditya MADAN. Ozone Technology in Food Processing: A Review. *Trends in Biosciences* [online]. Tamilnadu, India, 2015, **8**(16), 4031-4047 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0976-2485. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305399037_Ozone_Technology_in_Food_Processing_A_Review
- [60] GUZEL-SEYDIM, Zeynep B., Annel K. GREENE a A.C. SEYDIM. Use of ozone in the food industry. *LWT - Food Science and Technology* [online]. 2004, **37**(4), 453-460 [cit. 2022-05-16]. ISSN 00236438. Dostupné z: doi:10.1016/j.lwt.2003.10.014
- [61] NATH, A., K. MUKHIM, T. SWER, Debashis DUTTA, N. VERMA, B.C. DEKA a B. GANGWAR. A Review on Application of Ozone in the Food Processing and Packaging. *Journal of Food Product Development and Packaging* [online]. Umiam, India: Jakraya, 30.09.2014, **1**, 7-21 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331222773_A_Review_on_Application_of_Ozone_in_the_Food_Processing_and_Packaging
- [62] BROADWATER, W. T., R. C. HOEHN a P. H. KING. Sensitivity of Three Selected Bacterial Species to Ozone. *Applied Microbiology* [online]. 1973, **26**(3), 391-393 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0003-6919. Dostupné z: doi:10.1128/am.26.3.391-393.1973
- [63] WICKRAMANAYAKE, G. B., A J RUBIN a O. J. SPROUL. Inactivation of Giardia lamblia cysts with ozone. *Applied and Environmental Microbiology* [online]. 1984, **48**(3), 671-672 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0099-2240. Dostupné z: doi:10.1128/aem.48.3.671-672.1984
- [64] GOLIÁŠ, Jan. *Skladování a zpracování ovoce a zeleniny*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. ISBN 978-80-7509-195-6.

- [65] HASSENBERG, Karin, Christine IDLER, Eleanor MOLLOY, Martin GEYER, Matthias PLÖCHL a Jeremy BARNES. Use of ozone in a lettuce-washing process: an industrial trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [online]. 2007, **87**(5), 914-919 [cit. 2022-05-16]. ISSN 00225142. Dostupné z: doi:10.1002/jsfa.2815
- [66] Aplikace ozonizované vody postřikem. In: *Ozcon Environmental Consulting & Trade Ltd.* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.ozcon.co.uk/applications/ozone-food-safety/>
- [67] Vegetables and Fruits Washer (OZ-AIR). In: *Creative OZ-Air (I) Pvt Ltd* [online]. 2019 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.oz-air.com/ozone-based-vegetables-and-fruits-washer.html>
- [68] DOONA, Christopher J., Kenneth KUSTIN a Florence E. FEEHERRY. *Case Studies in Novel Food Processing Technologies - Innovations in Processing, Packaging and Predictive Modelling* [online]. Cambridge (UK): Woodhead, 2010 [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-0-85-709071-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCSNFPT11/case-studies-in-novel/case-studies-in-novel>
- [69] ČESKO. Vyhláška č. 248/2018 Sb. o požadavcích na nápoje, kvasný ocet a droždí. In: *Sbírka zákonů ČR.* 2018, částka 125. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=248&r=2018>
- [70] CATALDO, Franco. Ozone Decomposition of Patulin—A Micotoxin and Food Contaminant. *Ozone: Science & Engineering* [online]. 2008, **30**(3), 197-201 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0191-9512. Dostupné z: doi:10.1080/01919510801925930
- [71] TIWARI, B.K., C.P. O'DONNELL, A. PATRAS, N. BRUNTON a P.J. CULLEN. Effect of ozone processing on anthocyanins and ascorbic acid degradation of strawberry juice. *Food Chemistry* [online]. 2009, **113**(4), 1119-1126 [cit. 2022-05-16]. ISSN 03088146. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodchem.2008.08.085
- [72] ČESKO. Vyhláška č. 275/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. In: *Sbírka zákonů ČR.* 2004, částka 88. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=275&r=2004>
- [73] BOLLYKY, L. Joseph. *Benefits of Ozone Treatment for Bottled Water* [online]. In: . [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237554291_Benefits_of_Ozone_Treatment_for_Bottled_Water. Materiál k Pan American Conference, International Ozone Association Proceedings 2002.

- [74] HUŠKOVÁ, Radka a Hana TOMEŠOVÁ. *Bromičnany v pitné vodě* [online]. Praha [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.smv.cz/res/archive/015/001801.pdf?seek=1429083261>. Pražské vodovody a kanalizace, a.s., Útvar kontroly kvality vody.
- [75] VONDRÁČEK, Otakar. *Výroba lihu a ušlechtilých pálenek z ovoce, výroba octa. 2.*, přeprac. vyd. Praha: Česká společnost chemická, 1945.
- [76] WOOD, Rick, Johannes VAN LEEUMEN a Jacek KOZIEL. *Method and system for treating a distilled spirit*. USA. US 2007/0248730 A1. Zapsáno 25.10.2007.
- [77] BLAHA, J. Umělé stárnutí vín révových. *Kvasny Prumysl* [online]. 1955, **1**(2), 31-34 [cit. 2022-05-16]. ISSN 00235830. Dostupné z: doi:10.18832/kp1955008
- [78] KELLS, Stephen A, Linda J MASON, Dirk E MAIER a Charles P WOLOSHUK. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. *Journal of Stored Products Research* [online]. 2001, **37**(4), 371-382 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0022474X. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-474X(00)00040-0
- [79] VARGA, László a Jenő SZIGETI. Use of ozone in the dairy industry: A review. *International Journal of Dairy Technology* [online]. 2016, **69**(2), 157-168 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1364727X. Dostupné z: doi:10.1111/1471-0307.12302
- [80] CAVALCANTE, D. A., B. R. C. LEITE JÚNIOR, A. A. L. TRIBST a M. CRISTIANINI. Improvement of the raw milk microbiological quality by ozone treatment. *International Food Research Journal* [online]. 2013, **20**(4), 2017-2021 [cit. 2022-05-16]. ISSN 2231 7546. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257634686_Improvement_of_the_raw_milk_microbiological_quality_by_ozone_treatment
- [81] *Pastair* [online]. Lund, c2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://pastair.se/>
- [82] KHANASHYAM, Anandu Chandra, M. Anjaly SHANKER, Anjineyulu KOTHAKOTA, Naveen Kumar MAHANTI a R. PANDISELVAM. Ozone Applications in Milk and Meat Industry. *Ozone: Science & Engineering* [online]. 2022, **44**(1), 50-65 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0191-9512. Dostupné z: doi:10.1080/01919512.2021.1947776
- [83] GABRIEL'YANTS', M. A., L. N. TEPLOVA, T. I. KARPOVA, R. A KOZLOVA a G. F. MAKAROVA. Storage of hard rennet cheeses in cold stores with ozonization of air. *Kholodil'naya Tekhnika*. 17.08.1980, **6**(5), 35-37 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0023-124X. Dostupné z: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19800461594>

- [84] Ozone System For Castelmagno Cheese Ripening Rooms. In: *ProTeA srl* [online]. 23.02.2016 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.proteasrl.com/en/ozone-system-for-castelmagno-cheese-ripening-rooms/>
- [85] REAGAN, JAMES O., GARY R. ACUFF, DENNIS R. BUEGE, et al. Trimming and Washing of Beef Carcasses as a Method of Improving the Microbiological Quality of Meat. *Journal of Food Protection* [online]. 1996, **59**(7), 751-756 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0362-028X. Dostupné z: doi:10.4315/0362-028X-59.7.751
- [86] 12 Ways to Improve your Beef Processing Plant Using Ozone. In: *Ozcon Environmental Consulting & Trade Ltd.* [online]. c2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.ozcon.co.uk/ozone-applications-in-beef-industry/>
- [87] NIETO, J.C, F JIMÉNEZ-COLMENERO a Ma.C PELÁEZ. Effect of ozone on bacterial flora in poultry during refrigerated storage. *International Journal of Refrigeration* [online]. 1984, **7**(6), 389-392 [cit. 2022-05-16]. ISSN 01407007. Dostupné z: doi:10.1016/0140-7007(84)90010-0
- [88] MAREL FISH. Efficient washing of salmon fillets. In: *Salmon Desliming & Fillet Washing* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://marel.com/media/i5nn13ok/fish-salmon-desliming-fillet-washing-2018.pdf>
- [89] DEL OZONE. *AGW-0500, Mobile Ozone Surface Sanitation System: Installation & Operations Manual* [online]. In: *DEL OZONE.* [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/29310210/agwa0500-del-ozone>
- [90] PASCUAL, A., I. LLORCA a A. CANUT. Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2007, **18**, S29-S35 [cit. 2022-05-16]. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/j.tifs.2006.10.006
- [91] DOSTI, BILAL, ZEYNEP GUZEL-SEYDIM a ANNEL K GREENE. Effectiveness of ozone, heat and chlorine for destroying common food spoilage bacteria in synthetic media and biofilms. *International Journal of Dairy Technology* [online]. 2005, **58**(1), 19-24 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1364-727X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1471-0307.2005.00176.x
- [92] FAWELL, J. Risk assessment case study—Chloroform and related substances. *Food and Chemical Toxicology* [online]. 2000, **38**, S91-S95 [cit. 2022-05-16]. ISSN 02786915. Dostupné z: doi:10.1016/S0278-6915(99)00129-5

- [93] ČESKO. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečištění a jejím zjištění a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2012, částka 151. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=415&r=2012>
- [94] Ozone Generator for Odor Removal | CKV Smoke Odor Control. *China Ozone Generator Manufacturer |DINO* [online]. c2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.dino-ozone.com/pf/ozone-odor-removal-deodorizer/>
- [95] WANG, Shan, Jiayi WANG, Tianyu WANG, Chen LI a Zhaoxia WU. Effects of ozone treatment on pesticide residues in food: a review. *International Journal of Food Science & Technology* [online]. 2019, **54**(2), 301-312 [cit. 2022-05-16]. ISSN 09505423. Dostupné z: doi:10.1111/ijfs.13938
- [96] WU, Jiguo, Tiangang LUAN, Chongyu LAN, Thomas Wai HUNG LO a Gilbert Yuk Sing CHAN. Removal of residual pesticides on vegetable using ozonated water. *Food Control* [online]. 2007, **18**(5), 466-472 [cit. 2022-05-16]. ISSN 09567135. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodcont.2005.12.011
- [97] KARACA, Hakan, Y. Sedat VELIOGLU a Sebahattin NAS. Mycotoxins: contamination of dried fruits and degradation by ozone. *Toxin Reviews* [online]. 2010, **29**(2), 51-59 [cit. 2022-05-16]. ISSN 1556-9543. Dostupné z: doi:10.3109/15569543.2010.485714
- [98] OZEN, Banu F., Lisa J. MAUER a John D. FLOROS. Effects of ozone exposure on the structural, mechanical and barrier properties of select plastic packaging films. *Packaging Technology and Science* [online]. 2002, **15**(6), 301-311 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0894-3214. Dostupné z: doi:10.1002/pts.602
- [99] OZONE SOLUTIONS. Bottled Water. *Ozone Solutions* [online]. c2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://ozonesolutions.com/bottled-water/>
- [100] SWISSFOOD TECH MANAGEMENT, INC. The Ventafresh System. In: *SwissFood Tech Management, Inc.* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: http://swissfoodtech.com/_papers/Steffen,Ventafresh-Process.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFSSA	Francouzský úřad pro bezpečnost potravin
AGW	limit expozice na pracovišti (Německo)
ANSES	Francouzský úřad pro potraviny, život. prostředí, veřejné zdraví a bezpečnost
BSK	biochemická spotřeba kyslíku
CFU	kolonii tvořící jednotka
CIP	čištění systémů na místě (Clean-in-Place)
COU	celkový obsah organického uhlíku
CPM	celkový počet mikroorganismů
D.U.	Dobsonova jednotka
DBD	dielektrický bariérový výboj (Dielectric Barrier Discharge)
DNA	deoxyribonukleová kyselina
ECTFE	ethylen-chlortrifluorethylen
EFSA	Evropský úřad pro bezpečnost potravin
FDA	Úřad pro kontrolu potravin a léčiv (USA)
GESTIS	databáze chemických látek (Německo)
GRAS	látky obecně považované za bezpečné (Generally Recognized As Safe)
HRAPIE	projekt ohledně zdravotních rizik znečištění ovzduší v Evropě
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
JUT	jatečně upravené tělo
LDPE	nízkohustotní polyethylen
MOS	oxidové polovodiče (Metal Oxide Semiconductors)
NPK-P	nejvyšší přípustná koncentrace
OSHA	Správa bezpečnosti a ochrany zdraví při práci (USA)
ppm	počet obj. jednotek plynu v milionu obj. jednotek vzduchu (pro ozon: $1 \text{ ppm} \doteq 1,996 \text{ mg/m}^3$; při teplotě 20 °C a tlaku 101,3 kPa) [42]

PE	polyethylen
PEL	přípustné expoziční limity
PEL-TWA	přípustný expoziční limit – časově vážený průměr (USA)
PET	polyethylentereftalát
PP	polypropylen
PTFE	polytetrafluorethylen
PVC	polyvinylchlorid
PVDF	polyvinylidendifluorid
RVV	relativní vlhkost vzduchu
TEV	tekutina epitelové výstelky
THM	trihalomethany
UV	ultrafialové (záření)
VOC	těkavé organické látky
VUV	vakuová ultrafialová (výbojka)
WHO	Světová zdravotnická organizace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Struktura molekuly ozonu [10, upraveno]	10
Obrázek 2: Rezonanční struktury molekuly ozonu [10]	11
Obrázek 3: Schematická sestava pro DBD [7, upraveno]	23
Obrázek 4: Schéma excimerové VUV výbojky [45, upraveno]	26
Obrázek 5: Schéma Venturiho injektoru. [58, upraveno]	28
Obrázek 6: Aplikace ozonizované vody při mytí ovoce: a) postřik, b) praní [66, 67]	34
Obrázek 7: Reaktor pro ozonizaci tekutin využívající difuzér jemných bublin [71, upraveno]	36
Obrázek 8: Ozonizační systém ve zracích prostorech [84]	41
Obrázek 9: Možnosti využití ozonu při zpracování masa: 1) dezinfekce rukavic a obuvi ozonizovanou vodou, 2) dezinfekce ručních nástrojů, nožů a rukou, 3) sanitace zařízení, podlah a přepravních prostor pomocí mobilního tlakové jednotky, 4) oplach JUT postřikem ozonizované vody, 5) ozonová atmosféra v chladiřenském boxu, 6) úprava odpadní vody. [86, upraveno]	42
Obrázek 10: Aplikace ozonizované vody na rybí maso: a) proudění v lázni, b) postřik [23, 88]	43
Obrázek 11: Mobilní ozonizační zařízení, AGW-0500 [89]	45
Obrázek 12: Tunel využívající ozon a UV záření. [100]	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti ozonu a kyslíku [9, 12, 14].....	11
Tabulka 2: Vyhodnocení antimikrobiálního účinku ozonu při sanitaci [90]	46