دوازدهمین کنگره ملی
مهندسی مکانیک بیوسیستم
و مکانیزاسیون ایران
دانشگاه شهید چمران اهواز ۱۶ - ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۸

مروری بر ازن: ویژگی‌ها، اثرات، سازوکارهای واکنش، جنبه‌های زیست‌محیطی و ایمنی در فرآوری مواد غذایی

مرضیه قربانی [۱*]، محمدحسین کیانمهر [۲]، اکبر عرب حسینی [۳]، احسان سرلکی [۴]، علی اسدی الموتی [۵]، رضا صادقی [۶]

۱. دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (marzie.ghorbani@ut.ac.ir)
۲. استاد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (kianmehr@ut.ac.ir)
۳. دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (ahosseini@ut.ac.ir)
۴. دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (e.sarlaki685@ut.ac.ir)
۵. استادیار گروه علوم دام و طیور، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (a.alamouti@ut.ac.ir)
۶. دانشیار گروه حشره‌شناسی و بیماری‌های گیاهی، پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران (rsadeghi@ut.ac.ir)

چکیده

هدف از این مقاله نشان دادن پتانسیل فنی-اقتصادی استفاده از ازن در صنایع غذایی برای تسهیل پذیرش آن در کاربردهای تجاری-صنعتی است. این مقاله وضعیت فعلی فن‌آوری و کاربردهای نوظهور فرآوری با ازن را بررسی می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و اصول ازن‌دهی، پارامترهای کنترل فرآیند، سازوکارهای واکنش در غیر فعال‌کردن میکروارگانیسم‌ها و اثرات آن بر پارامترهای تغذیه و کیفیت غذا به‌دقت بررسی و خلاصه شده‌اند. درنهایت، جنبه‌های سلامتی و ایمنی اعمال ازن در فرآوری مواد غذایی و روند آتی صنعتی درزمینهٔ ازن‌دهی مواد غذایی، مرور و مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: *ازن، خواص فیزیکی شیمیایی، فرآوری مواد غذایی، جنبه‌های سلامتی و ایمنی*

*نویسنده مسئول: marzie.ghorbani@ut.ac.ir

مروری بر ازن: ویژگی‌ها، اثرات، سازوکارهای واکنش، جنبه‌های زیست‌محیطی و ایمنی در فرآوری مواد غذایی

مقدمه

ازن ازنظر فتوشیمیایی در استراتوسفر، در یک قوس الکتریکی با ولتاژ بالا و در حضور بخارهای فتوشیمیایی و لامپ‌های استریل پرتو فرابنفش (UV[1]) و صفحات پرتو گاما تشکیل می‌شود [۲۱]. مشخصات بوی تازه و تمیز هوا پس از رعد و برق، نشان‌دهنده تولید ازن تازه در اتمسفر است. تصویب مقررات جدید و کاربرد طیف گسترده ازن می‌تواند آن را به یک جایگزین سبز در رویکردهای متداول برای کاربردهای مختلف غذایی تبدیل کند. به‌طورکلی ازن یک ماده ایمن شناخته‌شده (GRAS[2]) است و اداره غذا و داروی ایالات‌متحده (FDA[3]) آن را به‌عنوان یک عامل ضد میکروبی برای تماس مستقیم با مواد غذایی تائید می‌کند [۷]. به دلیل ترکیبات باقی‌مانده و محصولات جانبی واکنش، عامل‌های شیمیایی ضدعفونی‌کننده تحت بررسی قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، محصولات جانبی کلرزنی[4] مثل تری هالومتان‌ها[5] و ترکیبات کلرامین[6] به‌طور بالقوه سرطان‌زا هستند. در حالی که محصولات مربوط به واکنش ازن از اکسیداسیون ترکیبات آلی مانند آلدئیدها، کتون‌ها و اسیدهای کربوکسیلیک عواقب مضری برای سلامتی گزارش نداده‌اند [۲۹]. ازن همچنین به‌عنوان جایگزین کلر برای جلوگیری از تشکیل ترکیبات آلی هالوژن در نظر گرفته می‌شود. با این حال، کارایی ازن در غذا و محصولات غذایی بستگی به خواص فیزیکی‌شیمیایی آن دارد. با توجه به جنبه‌های سلامتی و ایمنی ازن برای فرآوری مواد غذایی، عوامل بسیاری ممکن است در مرحله فرآیند ازن‌دهی دیده شوند. کلمه سلامت به سلامت انسان‌ها ازجمله کارگران درگیر در فرآوری مواد غذایی با ازن که به‌طور همزمان یک ماده ضدعفونی‌کننده و عامل اکسیداسیون بسیار قوی است، مربوط می‌شود. ازن به‌دلیل ظرفیت اکسیداسیونی آن، توانایی تغییر ساختار شیمیایی مولکول‌های مواد غذایی را دارد. بنابراین برخی از محصولات جانبی از اکسیداسیون ازن ایجاد می‌شوند که جزء اصلی مواد غذایی نیستند. محصولات جانبی چنین اکسیداسیون‌هایی در هر نقطه از فرآوری مواد غذایی ممکن است زیان‌آور، سودمند یا بدون تأثیر روی مصرف‌کننده‌ها از دیدگاه سلامتی و ایمنی باشد. علاوه بر این، سطوح برخی از مواد مغذی در غذاها (ویتامین‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها) می‌تواند در طول فرآوری ازن (معمولاً کاهش‌یافته، اما نه همیشه) تغییر کنند، که ممکن است در سلامت و ایمنی مصرف‌کننده‌ها مؤثر باشد. همچنین، اصطلاح ایمنی برای کارگران فرآوری مواد غذایی و همچنین تجهیزات و ابزار دقیقی که در کارخانه فرآوری مواد غذایی برای فرآوری آن‌ها نصب شده‌اند، به‌کار برده می‌شود. چنین تجهیزات فرآوری که برای تولید، تأمین و فرآوری غذاها مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید سازگار با ازن باشند تا به‌طور ناخودآگاه به مواد دیگری تبدیل و منجر به خسارت به تجهیزات فرآوری و یا آلودگی مواد غذایی در حال فرآوری شود [۲۸].

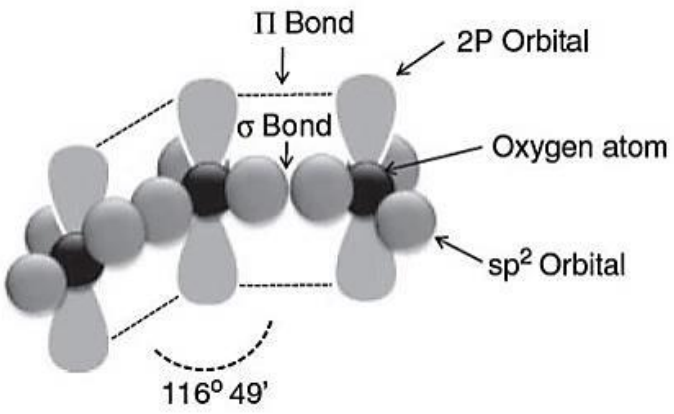
ازن گازی است که تا حدی در آب محلول و ناپایدار است و نیمه عمر کوتاهی دارد. این گاز، یک عامل ضدعفونی‌کننده و اکسیدکننده بسیار قوی است که برای صنعت فرآوری مواد غذایی جدید بوده و توسط اداره غذا و داروی آمریکا

1 Ultraviolet
2 Generally Recognised as Safe
3 Food and Drug Administration
4 Chlorination
5 Trihalomethane
6 Chloramine

(FDA)[1] به‌عنوان یک افزودنی مواد غذایی ضد میکروبی در سال ۲۰۰۱ تائید شده است [۷]. عدم پایداری ازن مانع از تجاری بودن آن و درنتیجه عدم خرید و فروش آن در مخازن، محل حمل و ذخیره می‌شود. در عوض ناپایداری آن نیاز به این دارد که ازن در محل تولید و بلافاصله برای اهداف از قبل تعیین شده مورد استفاده قرار گیرد. ازن اضافه سپس با تبدیل به اکسیژن، که از آن ابتدا شکل گرفته بود، تجزیه می‌شود. هنگامی‌که ازن برای ضدعفونی کردن و سایر اهداف به آب اضافه می‌شود، حلالیت جزئی آن بدین معناست که در پایین‌دست می‌تواند از نقطه تماس اولیه آن با آب، گاز زدایی شود و بنابراین برای تنفس کارگران کارخانه در دسترس باشد. مهندسان فرآوری مواد غذایی که با این خواص ازن کاملاً آشنا هستند، به‌طور منظم طرح‌هایی را ارائه می‌دهند که از در معرض قرار گرفتن کارکنان در برابر ازن در طول فرایند جلوگیری کنند. در این مقاله در مورد خواص فیزیکی، شیمیایی و ضد میکروبی ازن و کاربرد آن در صنایع غذایی بحث می‌شود [۲۸].

ساختار مولکولی ازن

واکنش‌پذیری قوی ازن به‌علت ساختار مولکولی آن است. مولکول ازن از سه اتم اکسیژن تشکیل شده است. در لایه والانس به ازای هر اتم اکسیژن دو الکترون جفت‌نشده وجود دارد که هر یک، یک اوربیتال 2p را اشغال می‌کنند. در طول تشکیل ازن، سه اتم اکسیژن ترکیب و با اکسیژن مرکزی که در یک صفحه sp^2 از 2s و ۲ تا 2p اوربیتال‌های اتمی پیوند والانس، بازسازی شده‌اند. با این ترکیب مجدد، سه اوربیتال هیبریدی sp^2 جدید، مثلثی با هسته اکسیژن در مرکز آن با زاویه ۱۱۶° ۴۹' همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تشکیل می‌دهند [۱].



شکل ۱- ساختار مولکولی ازن [۲۸]

واکنش‌پذیری بالای ازن می‌تواند به‌طرز قرارگیری الکترون‌ها در این مولکول نسبت داده شود، زیرا عدم وجود الکترون در یکی از اتم‌های اکسیژن انتهایی در برخی از ساختارهای رزونانس، تأییدکننده ویژگی‌های الکترون دوستی[2] ازن است، در حالی که بار اضافی منفی موجود در برخی از اتم‌های دیگر اکسیژن ویژگی هسته دوستی[3] را به ازن نسبت می‌دهند [۱].

1 Food and Drug Administration
[2] Electrophilic
[3] Nucleophilic

خواص فیزیکی‌شیمیایی ازن

ازن (O_3) اکسیژن سه گانه‌ای است که با افزودن یک رادیکال آزاد اکسیژن به اکسیژن مولکولی تشکیل شده است. در سال ۱۷۸۱، Van Marum اولین شخصی بود که بوی تند ازن را توصیف کرد [۶]. بعدها، در سال ۱۸۴۰، Schönbein ازن را بر اساس کلمه یونانی "ozein" به‌معنی "بو" نام‌گذاری کرد [۱۴، ۲۰ و ۳۶]. ازن در دمای معمولی وقتی که از هوای خشک تولید می‌شود گازی آبی رنگ است، اما وقتی که از اکسیژن با خلوص بالا تولید گردد، بی‌رنگ است. صرف‌نظر از نحوه چگونگی تولید، در غلظت‌های عادی برای اکثر کاربردها ازجمله فرآوری مواد غذایی، رنگ ازن قابل توجه نیست. در دمای منفی ۱۱۲ °C، ازن به یک مایع با رنگ آبی تیره تغلیظ می‌شود. اگر بیشتر از ۲۰ درصد مخلوط ازن - اکسیژن رخ دهد، ازن مایع می‌تواند منفجر شود. سه اتم اکسیژن در مولکول ازن در یک زاویه منفرجه مرتب شده‌اند، در نتیجه یک اتم اکسیژن مرکزی به دو اتم اکسیژن هم فاصله متصل می‌شود (زاویه تقریباً ′۴۹ °۱۱۶ و طول پیوند Å ۱/۲۷۸ است). نقطه جوش ازن ۰/۳°C ± ۱۱۱/۹- ، نقطه ذوب ۰/۴°C ± ۱۹۲/۵- ، دمای بحرانی °C ۱۲/۱- و فشار بحرانی ۵۴/۶ اتمسفر است [۲۰]. ازن (۲/۱۴ g/L) نسبت به هوا (۱/۲۸ g/L) در دمای °C ۰ و فشار اتمسفر کمی چگال‌تر است (جدول ۱). حلالیت ازن در آب تحت تأثیر دما است و حلالیت با افزایش دما کاهش می‌یابد. در °C ۰، حلالیت ازن ۰/۶۴۰۱ (ازن بر لیتر آب) است، در حالی که در دمای °C ۶۰ در آب حل نمی‌شود [۱۲]. ازن دارای پتانسیل اکسیداسیونی بالای V ۲/۰۷ در مقایسه با کلر (V ۱/۳۶) و اکسیژن (V ۱/۲۳) است [۲۰ و ۳۰]. سازو کار تجزیه ازن در آب به‌طور کامل مشخص نشده است، اما برخی از رویکردها، تجزیه آن به رادیکال‌های هیدروکسیل، یون‌های اکسیژن و هیدروکسید را پیشنهاد داده‌اند و در pH بالاتر از ۷/۵، تشکیل رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل که دارای پتانسیل اکسیداسیونی بالاتر از ازن (V ۲/۸۰) هستند، افزایش می‌یابد[۳۰].

ازن در دمای اتاق یک گاز ناپایدار است و به‌راحتی تجزیه می‌شود [۲۰]؛ اما دارای نیمه عمر بیشتری در حالت گازی نسبت به محلول آبی است [۳۵]. خلوص آب معمولاً بر پایداری ازن تأثیر می‌گذارد. اگرچه ازن در آب خالص به‌سرعت به اکسیژن تجزیه می‌شود، در محلول‌های ناخالص، حتی سریع‌تر تجزیه می‌شود. Hill و Rice (۱۹۸۲) گزارش دادند که حدود ۵۰ درصد ازن در ۲۰ دقیقه در دمای °C ۲۰ در آب مقطر یا آب شیر تجزیه می‌شود، در حالی که تنها ۱۰ درصد ازن در ۸۵ دقیقه در دمای °C ۲۰ در آب دوبار تقطیر شده تجزیه می‌شود [۱۲]. حلالیت ازن در آب ۱۳ برابر اکسیژن در °C ۰-۳۰ و در آب سردتر به‌تدریج محلول‌تر است، همچنین ازن در دماهای بالاتر آب، سریع‌تر تجزیه می‌شود [۳۵]. برای تولید ازن، ابتدا مولکول اکسیژن دو اتمی باید تقسیم شود، اکسیژن رادیکال آزاد حاصله، آزاد و با اکسیژن دو اتمی واکنش دهد تا مولکول ازن سه اتمی ایجاد شود. با این حال، به‌منظور شکستن پیوند O-O، مقدار زیادی انرژی موردنیاز است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی ازن [۱۹]

خصوصیات	مقدار
فرمول شیمیایی	O_3
رنگ	گاز مایع به آبی، مایع آبی تیره
وزن مولکولی	۴۷/۹۹ g/mol
نقطه جوش	۰/۳ °C ± ۱۱۹/۹- °C
نقطه ذوب	۰/۴ °C ± ۱۹۲/۵- °C
دمای بحرانی	۰/۱ °C ± ۱۲/۱- °C
فشار بحرانی	۵۴/۶ atm

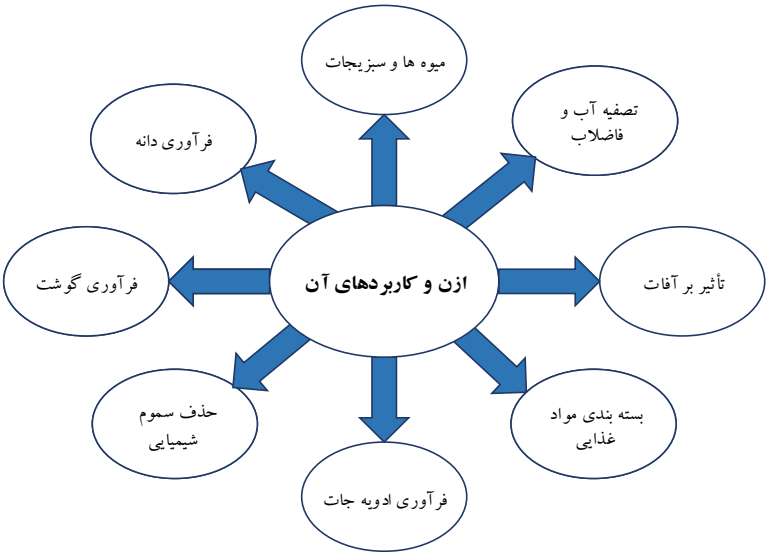
چگالی	۲/۱۴ kg/m^3
آنتالپی استاندارد تشکیل	۱۴۴/۷ kj/mol
قدرت اکسیداسیون	۲/۰۷۵ V
حلالیت در آب	۳ ppm در ۲۰ °C
وزن مخصوص	۱/۶۵۸
گرمای تولید	۱۴۴/۷ KJ/mol
دانسیته گاز نسبت به دانسیته هوا	۱/۶۵۷ °C

روش‌های پرتو فرابنفش (طول‌موج ۱۸۸ نانومتر) و تخلیه کرونا می‌توانند برای شروع تشکیل رادیکال آزاد اکسیژن استفاده و از این طریق ازن تولید شود. به‌منظور تولید سطح تجاری ازن، روش تخلیه کرونا معمولاً استفاده می‌شود. در طرح تخلیه کرونا، دو الکترود در یک فاصله تخلیه باریک جدا می‌شوند. ازن با افزودن رادیکال آزاد اکسیژن به یک مولکول اکسیژن تشکیل می‌شود. اگر از طریق ژنراتور، هوا به‌عنوان یک گاز تغذیه منتقل شود، ۳-۱ درصد ازن تولید می‌شود؛ درحالی‌که با استفاده از اکسیژن خلوص بالا می‌توان تا حدود ۱۶ درصد ازن تولید کرد [۳۴]. فرآیندهای انرژی‌زا که می‌تواند مولکول‌های ازن را تولید کنند، می‌توانند ازن را نیز تجزیه کنند. غلظت بالای ازن باعث افزایش میزان تجزیه ازن می‌شود. در نتیجه، غلظت ازن نمی‌تواند فراتر از نقطه‌ای افزایش یابد که نرخ تشکیل و تجزیه برابر است [۲۰]. ازآنجاکه ازن خودبه‌خود تجزیه می‌شود، گاز ازن نمی‌تواند ذخیره شود [۲، ۱۴ و ۳۹].

کاربردهای ازن در صنایع غذایی

علاقه به ازن در سال‌های اخیر در واکنش به تقاضای مصرف‌کنندگان برای تمایل به افزودنی‌های "سبزتر" مواد غذایی، تصویب قانونی و پذیرش ازن به‌عنوان یک فن‌آوری سازگار با محیط زیست، گسترش‌یافته است. چند عاملی بودن ازن باعث می‌شود که یک ماده امیدوارکننده در فرآوری مواد غذایی باشد. ازن اضافی، به‌سرعت و به‌طور خودکار برای تولید اکسیژن تجزیه می‌شود و به همین دلیل هیچ باقیمانده‌ای از ازن در مواد غذایی به‌جای نمی‌ماند [۲۸]. قوانین اداره غذا و داروی ایالات‌متحده[1](FDA) در استفاده ازن در غذا، منجر به افزایش علاقه به کاربردهای غذایی بالقوه آن در سراسر جهان شده است. ازن به‌عنوان یک اکسیدان در فرآوری آب، بهداشتی کردن، شستشو و ضدعفونی کردن تجهیزات، حذف بو و فرآوری میوه، سبزی، گوشت و غذاهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲).

1 Food and Drug Administration



شکل ۲- کاربردهای ازن در فرآوری مواد غذایی [۳۲]

مسائل سلامتی و ایمنی استفاده ازن در فرآوری مواد غذایی

مقررات قرار گرفتن در معرض ازن

ازن با وجود اکسیدکننده بودن قوی آن، اگر انسان در معرض غلظت کافی برای مدت‌زمان طولانی قرار بگیرد، به‌طور بالقوه مضر است. در ایالات‌متحده آمریکا، ازن و سایر گازهای سمی در مکان‌های کاری تجاری-صنعتی توسط اداره ایمنی و سلامت شغلی وزارت کار ایالات‌متحده (OSHA) تنظیم شده است (جدول‌های ۲ و ۳). یکی از مزایای اولیه استفاده ازن در هر مکان از کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی، کاهش سطح میکروارگانیسم‌های موجود در سطوح مواد غذایی است. دستیابی به این مزایا، عمر مفید مواد غذایی ویژه را گسترش می‌دهد. با این حال، برخلاف این مزیت، توانایی اکسیداسیون قوی ازن است. این به این معنی است که تماس زیاد با ازن (به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر)، احتمال واکنش مواد غذایی با ازن را افزایش و به‌همین دلیل ماهیت اولیه شیمیایی مواد غذایی را تغییر می‌دهد. بنابراین در چنین کاربردهایی، به‌اندازه کافی برای کاربران ازن، دستیابی به کاهش میکروارگانیسم‌ها مهم است و در عین حال کاهش هرگونه تجزیه اکسیداسیونی ناخواسته ماده غذایی ناشی از قرارگیری در معرض بیش از حد ازن است [۲۸].

جدول ۲- آثار مواجهه شخصی و محدودیت‌ها برای ازن در فاز گازی (ایالات‌متحده آمریکا) [۳۳]

اثرات مشاهده شده	غلظت ازن (ppm)
آستانه تشخیص بو برای یک شخص عادی	۰/۰-۰۱/۰۴
حداکثر میانگین ۸ ساعت یک شخص در معرض قرارگیری با ازن	۰/۱
سوزش چشم، بینی و گلو؛ سردرد، تنگی نفس	>۰/۱

1 Occupational Safety and Health Administration

اختلالات تنفسی، کاهش مصرف اکسیژن، تحریک ریه، خستگی شدید، درد قفسه سینه، سرفه خشک	۰/۱-۵/۰
سردرد، تحریک تنفسی و احتمال بیهوشی، احتمال پنومونی شدید در سطوح بالاتری از معرض قرار گرفتن	۱-۱۰
مرگ حیوانات کوچک ظرف ۲ ساعت	۱۵-۲۰
مرگ در چند دقیقه	>۱۷۰۰

جدول ۳- آثار مواجهه شخصی و محدودیت‌ها برای ازن گازی (کانادا) [۳۳]

اثرات مشاهده شده	غلظت ازن (ppm)
بوی قابل تشخیص	۰/۰-۰۱/۰۴
TLV-TWA (مقدار حد آستانه - میانگین زمان - وزن): حدود ۸ ساعت	۰/۱
سردرد، تنگی نفس	>۰/۱
TLV-STEL (مقدار حد آستانه - حد در معرض قرار گرفتن کوتاه مدت): حدود ۱۵ دقیقه	۰/۳
درد قفسه سینه، سرفه خشک، سوزش ریه، خستگی شدید	۰/۱-۶/۰ (۱-۲ ساعت)
بدون شک خطرناک برای زندگی و سلامتی	۱۰/۰
انتظار می‌رود مرگبار باشد	۵۰ (۳۰ دقیقه)

در سال ۱۹۹۷، یک هیئت از متخصصان مواد غذایی توسط مؤسسه تحقیقات توان الکتریکی (EPRI[1]) برای ارزیابی مقالات مربوط به فرآوری انواع مواد غذایی با ازن، برگزار شد. تأثیرات مواد مغذی و اثرات سمی بالقوه آن روی مواد غذایی فرآوری شده با ازن را مورد بررسی قرار دادند [۳]. در حالی که تضمین ایمنی غذا یک نگرانی جهانی است، رویکردهای قوانین و مقررات در سراسر جهان متفاوت است. در سطح جهانی، وضعیت قوانین برای ازن در کاربردهای فرآوری مواد غذایی هنوز هم در حال تحول و تغییرات مداوم است و در برخی از کشورها تا به امروز به آن توجه نشده است. قوانین حاکم بر ازن‌دهی برای تصفیه، حمل، فرآوری و انبار مواد غذایی به‌طور معمول در پاسخ به ارزیابی استفاده ازن در کاربردهای اولیه برای فرآوری آب، تیمار سطوح و تمیز کردن تجهیزات، شستشوی مواد غذایی و درنهایت استفاده به‌عنوان یک افزودنی مستقیم غذایی توسعه یافته است. استفاده از ازن در فرآوری مواد غذایی، به دلیل تائید به‌عنوان یک ماده شیمیایی ایمن (GRAS[2]) در سال ۱۹۹۷ و بعد آن تائید توسط FDA ایالات‌متحده به‌عنوان یک افزودنی ضد میکروبی برای تماس مستقیم با تمام غذاها بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است [۷ و ۹]. استفاده از ازن در فرآوری مواد غذایی در بسیاری از کشورها ازجمله ایالات‌متحده آمریکا، ژاپن، استرالیا، فرانسه و کانادا تائید شده است. با توجه به پیچیدگی‌های ماتریس‌های مواد غذایی و طیف غذایی تولید شده، نشان دادن تأییدیه برای یک فرآیند تبدیل به یک چالش در صنعت شده است. با این حال، شتاب‌دهی فرآیندهای اعتبارسنجی، احتمالاً با اعتبارسنجی محصولات قابل مقایسه در تطابق هستند. رویکردهای فرآوری مواد غذایی شامل استفاده ازن در هر دو فاز گازی و آبی است. شستشو در آب حاوی ازن، ذخیره‌سازی در اتمسفر غنی از ازن[3] و اضافه کردن مستقیم ازن در غذاهای مایع و اثرات ضد-میکروبی ازن برای کنترل میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا مربوط به صنایع غذایی بررسی شده‌اند. اثربخشی ازن در برابر میکروارگانیسم‌های موجود در سیستم‌های غذایی بستگی به عوامل متعددی ازجمله مقدار ازن اعمال شده، ازن موجود در محیط و عوامل محیطی مختلف مانند pH، دما، رطوبت نسبی،

1 Electric Power Research Institute
2 Generally Recognised as Safe
3 Ozonerich

افزودنی‌ها و مقدار ماده آلی اطراف سلول‌ها دارد. دانه‌های انباری مستعد پذیرش بسیاری از حشرات هستند که سبب آسیب قابل‌توجهی به دانه‌های ذخیره شده می‌شوند و به‌طور بالقوه می‌توانند مقاومت در برابر حشره‌کش‌های فعلی را توسعه دهند. افزایش مشکلات زیست‌محیطی و قوانین جدید، به کاهش مقدار مجاز آفت‌کش‌ها و یا حتی ممنوعیت مصرف آن‌ها تمایل دارند. ازن می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین ضدعفونی‌کننده مواد شیمیایی به‌منظور کنترل رشد حشرات باشد. همچنین استفاده ازن برای کنترل قارچ‌ها و مایکوتوکسین‌ها در دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۸].

اثرات تغذیه‌ای ازن با مواد غذایی

Erdman (۱۹۹۷) بیان کرد مواد غذایی برای اهداف مختلفی مورد فرآوری قرار می‌گیرند: حفظ مواد غذایی و افزایش طول عمر آن، افزایش قابلیت هضم آن، بهبود خوش‌خوراکی[1] و بافت آن، آماده‌سازی آن برای خوراک، حذف بخش‌های غیرخوراکی، تخریب عوامل ضدتغذیه، ایجاد انواع جدیدی از غذاها و تخریب سموم و حذف میکروارگانیسم‌ها [۴]. مهم ترین نگرانی مواد غذایی زمانی که مصرف می‌شود، ایمنی آن است. اگرچه اکثر روش‌های حفظ مواد غذایی مقدار کمی محتوای مواد مغذی مواد غذایی را کاهش می‌دهند، این هزینه برای پرداخت ایمنی ضروری است. بنابراین انتخاب مناسب-ترین فنون فرآوری مواد غذایی همیشه مسئله تعادل بین محدوده حفاظت و ایمنی مواد غذایی و حفظ مواد مغذی پس از فرآوری است [۵]. سه علت عمده برای فساد مواد غذایی وجود دارد: تغییرات شیمیایی، تغییرات آنزیمی و فساد میکروبیولوژیکی که بیشتر مربوط به کاربرد ازن می‌شود. روش‌های محافظت از مواد غذایی متداول برای کاهش بار میکروبی شامل فرآوری حرارتی، تغییر pH، استفاده از مواد نگهدارنده شیمیایی، استفاده از ریزموج و پرتو یونیزه شدن، حذف آب یا ترکیبی از این فنون است. اساساً تمام این فنون، به میزان متغیری محتوای مواد مغذی مواد غذایی محافظت شده را کاهش می‌دهند. ازن یک اکسیدکننده قوی است و بنابراین انتظار می‌رود که باعث تغییرات در مواد مغذی غذاها در غلظت‌های بالا برای دوره‌های طولانی گردد. با این حال، ازن عمیقاً داخل مواد غذایی نفوذ نمی‌کند [۱۷] و هرگونه اثر منفی بر محتوای مواد مغذی (ناشی از ازن) محدود به مواد مغذی در سطح مواد غذایی است.

اثرات فرآوری مواد غذایی ازن‌دهی شده بر محتوای ویتامین

ویتامین‌هایی که بیشتر در شرایط اکسیداسیون[2] ناپایدارند شامل ویتامین C، ویتامین B1 (تیامین)، فولات و کاروتنوئید هستند. اغلب ویتامین C و B1 به‌عنوان شاخص مواد مغذی در هنگام بررسی اثر فنون فرآوری مواد غذایی بر پایداری مواد مغذی استفاده می‌شوند. اگر این ترکیب‌ها تا درجه بالایی حفظ شوند، فرض بر این است که بقیه نیز این‌گونه خواهند بود. اثرات فرآوری ازن روی تیامین و ریبوفلاوین[3] (ویتامین B2، یکی دیگر از ویتامین‌های محلول در آب باثبات بیشتر حرارتی نسبت به تیامین، اما پایداری کمتری نسبت به نور) نگهداری شده در محصولات غلات و نانوایی[4]، نخودفرنگی[5]، لوبیا[6] و ادویه‌جات[7] ارزیابی شده‌اند.

1 Palatability
2 Oxidizing
3 Riboflavin
4 Bakery
5 Peas
6 Beans
7 Whole spices

Naito و Nanba (۱۹۸۷) ۲۴ نوع مختلف مواد غذایی شامل دانه‌های غلات، پودر دانه غلات، نخودفرنگی، لوبیا و ادویه‌جات با حدود ppm ۵۰ – ۰/۵ ازن (در فاز گازی) در دمای °C ۱۰ برای ۱ ساعت تحت فرآوری قرار دادند. ریبوفلاوین در طی فرآوری با بیش از ۹۰ درصد حفظ ویتامین B2 در تمام نمونه‌های غذا حتی با فرآوری‌های ppm ۵۰ ازن، پایدار نشان داد. تجزیه تیامین در برخی از نمونه‌های غذایی آرد و ادویه‌جات فرآوری شده با ppm ۵۰ ازن شناسایی شدند. در محصولات با سطوح بالا، مقدار تلفات به ۴۰ درصد رسید، اما در تمام محصولات دانه‌ای و لوبیا، حداقل تلفات (حدود ۱۰ درصد) دیده شد [۲۲]. Naito و همکاران (۱۹۸۹) همچنین به مدت ۶ ساعت آرد گندم را با ppm ۵-۰/۵۰ ازن برای کنترل میکروارگانیسم‌های هوابرد قبل از تولید ماکارونی ژاپنی[1]تحت فرآوری قرار دادند و در مقدار ریبوفلاوین تغییری مشاهده نکردند. عمر مفید محصول به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت، هرچند مقدار محتوای تیامین از بین رفت [۲۳].Henry و همکاران (۱۹۹۶)، سینتیک تخریب کاروتنوئید، بتاکاروتن و لیکوپن را در شرایط آزمایشگاهی پس فرآوری با جریان پیوسته اکسیژن یا آب حاوی ازن بررسی کردند [۱۱]. هر کاروتنوئید روی سطح جامد جذب و آب فیلتر شده با اکسیژن و یا با ازن که روی سطح در دمای محیط شناور شده بودند، اشباع شدند. همانطور که انتظار می‌رود، ازن یک اکسیدکننده قوی‌تر از اکسیژن است. تقریباً ۹۰ درصد رنگ لیکوپن و بتاکاروتن به‌ترتیب پس از ۱ و ۷ ساعت با ازن و ۲ و ۷ ساعت با اکسیژن از بین رفتند. بنابراین لیکوپن بیشتر از بتاکاروتن آسیب‌پذیر نشان داد. محققان هنگامی‌که سیب‌زمینی را در محیط حاوی ازن نگهداری کردند، مقدار ۱/۲ برابر ویتامین C بیشتری در مقایسه با نمونه شاهد گزارش دادند [۱۵]. این تغییر احتمالاً ناشی از تأثیر ازن بر متابولیسم سیب‌زمینی بوده است به‌صورتیکه قندهای کل ۱/۵-۱/۳ برابر با ۶-۳ درصد افزایش در محتوای نشاسته کاهش یافتند. سازو کار این تغییرات به‌احتمال زیاد به‌علت اثر شناخته‌شده اکسیداسیون ازن در اتیلن با هدف نهایی کندشدن فرآیند بلوغ است [۴].

اثرات فرآوری مواد غذایی ازن‌دهی شده بر محتوای پروتئین

مطالعات ازن‌کافت برای فرآوری مواد غذایی کاملاً مشهود است که ازنظر شیمیایی استفاده زیاد از این اکسیدکننده بسیاری از اسیدهای آمینه را از بین می‌برد [۳۷]. LaLecheur و Glaze (۱۹۹۶) نشان دادند که اکسیداسیون سرین[2]در آب، محصولات فرعی حاوی کربونیل و کربوکسیلات تولید می‌کند که منعکس‌کننده سازو کار شیمی مولکولی ازن و رادیکال آزاد هیدروکسیل هستند [۱۸]. کربوکسیل‌زدایی به‌وسیله اکسیداسیون و تشکیل نیترات، مسیر واکنش سرین با ازن مولکولی است، در حالی‌که تشکیل آمونیاک، اصول شیمی رادیکال آزاد هیدروکسیل را نشان می‌دهد. توالی‌های واکنش ازن با گلایسین[3] آلانین[4]و فنیل آلانین[5]مشخص شده است، اما پس از آن پیشرفت واکنش‌ها همانند کلرین است. Kasei و همکاران (۱۹۹۴) از فرآوری ازن‌کافت برای تهیه کازئین[6](ماده پروتئین شیر) استفاده کرد. این فرآوری تحت شرایط شدید،

1 Japanese noodles
2 Serine
3 Glycine
4 Alanine
5 Phenylalanine
6 Casein

تمام آمینو اسیدهای آروماتیک را به‌غیر از چند باقی‌مانده فنیل آلانین به‌طور کامل از بین برد و قابلیت هضم واقعی کازئین را کاهش داد [۱۳].

Naitoh (۱۹۹۲) اثرات سطوح بالای ازن (۱۱۰–۱۲۰ ppm) را بر ازن‌دهی اسیدهای آمینه در محلول‌های آبی ارزیابی کرد و دریافت که اسیدهای آمینه تریپتوفان[1]، تیروزین[2]، فنیل آلانین[3] و متیونین[4] ناپایدارترین بودند. محصولات متابولیک تولید شده در طول این فرآیند، موتاژنیک[5] یافت نشد، به‌هرحال اسیدهای آمینه خالص یا مخلوط اسیدهای آمینه و گلوکز ازن‌دهی شده بودند [۲۵]. هیچ مدرکی وجود ندارد که قرار گرفتن غذا در معرض ازن معمولاً برای حفظ مواد غذایی به‌گونه‌ای توصیه می‌شود که موجب هرگونه تخریب بقایای اسیدآمینه یا کاهش کیفیت پروتئین نشود [۴].

اثرات فرآوری مواد غذایی ازن‌دهی شده بر محتویات چربی

Naitoh (۱۹۸۹) پودرهای غلات، نخودفرنگی، لوبیا، محصولات پالس[6] و دانه‌های غلات را با ۰/۰۵تا ۵۰ ppm ازن فرآوری کردند و دریافتند که ازن‌دهی ۵ ppm، اکسیداسیون لیپیدها به‌ندرت رخ داده، در حالی که در سطوح بالاتر ازن (۵۰ ppm و بالاتر)، اکسیداسیون لیپید بیشتر هستند [۲۴]. Gorman و همکاران (۱۹۹۵) اثر چند نوع ضدعفونی‌کننده شامل ۰/۵ درصد آب حاوی ازن را بر TBA[7] (تیوباربیتوریک اسید) موجود در گوشت گاو[8] پس از ۲۹ روز نگهداری در دمای ۴ °C مطالعه کردند [۸]. Watanabe و همکاران (۱۹۹۴) ازن را در سطوح ۰، ۰/۰۳ و ۰/۱ ppm در طی کشت قارچ‌های nameko استفاده کردند و دریافتند که فرآوری با ازن مقادیر پالمیتولئیک اسید را افزایش و اسید لینولئیک و نسبت PUFA/SAT FA (PUFA[9]= اسیدهای چرب پلی-اشباع نشده؛ SATFA[10]= اسیدهای چرب اشباع شده) را کاهش می‌دهد [۳۸]. ازن برای واکنش سریع با ترکیبات آلی اشباع نشده مناسب است [۳۴]. بنابراین تعجب‌آور نیست در سطوح بالاتر ازن‌دهی، اکسیداسیون PUFA و افزایش در پراکسیداسیون چربی رخ دهد. با این حال، در سطوح معمولی فرآوری با ازن، اثرات معنادار مورد انتظار مشاهده نشدند [۴].

جنبه‌های سم‌شناسی فرآوری مواد غذایی ازن‌دهی شده

دو مطالعه، تغذیه کازئین[11] فرآوری شده با ازن را به موش صحرایی گزارش دادند [۱۳]. کازئین در ۸ مول اوره حل و پس از آن ۰/۰۳ ازن در جریان اکسیژن داخل محلول با نرخ ۱۰۰ L/h برای ۲۰ ساعت (یک رژیم شدید) حباب‌دهی شد. پس از لیوفیلیزاسیون[12] محلول دیالیزشده، کازئین ازنیده شده بدست آمد. آنالیز شیمیایی تلفات معناداری از کیستین[13]

1 Tryptophan
2 Tyrosine
3 Phenylalanine
4 Methionine
5 Mutagenic
6 Pulse
7 Thiobarbituric acid
8 Beef
9 PolyUnsaturated Fatty Acids
1 Saturated Fatty Acids 0
1 Casein 1
1 Lyophilisation 2
1 Cystine 3

متیونین[1] تریروزین[2] تریپتوفان[3] فنیل آلانین و هیستیدین[4] در کازئین‌های ازنیده شده نشان داد. غلظت اسیدآمینه در کازئین-های فرآوری شده و نشده با افزودن یک مقدار مناسب از اسیدآمینه آزاد برابر بود. یک گروه شش‌تایی از موش‌های صحرایی یک دوره دو هفته‌ای را با رژیم غذایی کازئین‌ها به میزان ۸ درصد تغذیه شدند. گروه چهارتایی با سفیده تخم‌مرغ ۴ درصد تغذیه شدند و در اندازه‌گیری‌ها، ارزش بیولوژیکی و قابلیت هضم واقعی هر رژیم آزمایشی محاسبه شدند. رشد و جذب غذا برای هر دو گروه که کازئین ازنیده شده تغذیه کرده بودند، یکسان بود و از گروه کازئین بدون فرآوری کمی کمتر و بدون اختلاف معنادار بود. ارزش بیولوژیکی رژیم غذایی کازئین ازنیده شده کمتر از رژیم غذایی کازئین بومی نبود، اما قابلیت هضم واقعی از رژیم غذایی کازئین ازنیده شده به‌طور معنی‌داری کمتر از رژیم غذایی کازئین بومی بود. وزن‌های کلیه[5] اعور[6] و کبد[7] موش‌های صحرایی که با کازئین‌های ازنیده شده تغذیه شدند به‌طور قابل توجهی بیشتر از آن‌هایی بود که رژیم غذایی کازئین بومی مصرف کردند. اختلاف معنی‌داری در وزن سایر اندام‌ها مشاهده نشد. به نظر می‌رسد که اعور بزرگ شده توسط قابلیت هضم پایین‌تری از کازئین ازنیده شده مواجهه شده بود، زیرا اعور موش‌های صحرایی حاوی کازئین ازنیده شده پس از هضم سریع[8] با پپسین[9] در مقایسه با آن‌هایی که از کازئین ازنیده شده تغذیه کردند، کوچک‌تر بودند. علت بزرگ شدن کلیه تعیین نشد. بخشی از افزایش کبد از گروه تغذیه شده با کازئین ازنیده شده به دلیل انباشت تری‌گلیسیرید بود [۲۸].

اثرات اسیدهای آمینه بر ته‌نشینی چربی در کبد موش‌های صحرایی که دارای رژیم غذایی کم پروتئین بودند به عدم تعادل اسیدآمینه وابسته است. مطالعات دیگر نشان داده‌اند که رژیم کازئین ۸ درصد با ۰/۳ درصد متیونین، کبد چرب را به سطح پلاسما ترئونین و سرین کاهش می‌دهد. با افزودن ترئونین از تجمع چربی در کبد جلوگیری شد. مقالات نیز نشان می-دهند که محصولات اکسیداسیون زمانی که مواد غذایی با ازن فرآوری می‌شوند، شبیه به آن‌هایی که وقتی آب با ازن فرآوری می‌شود، تشکیل می‌شوند. اگرچه داده‌ها تا حدودی محدود هستند اما اطلاعات موجود مشکلات قابل توجهی را برای سلامتی نشان نمی‌دهند. نتایج تأییدکننده برای این ادعا عبارتند از:

- مطالعات استنشاقی طولانی‌مدت و متوالی حیوانات نشان می‌دهد که ازن سرطان‌زا نیست [۲۷].
- پس از ۱۸ تیمار اسیدهای آمینه متفاوت، هیچ‌گونه محصولات موتاژنی[10] شناسایی نشدند و ۱۰ مورد ساکارید منجمد خشک شده به مدت ۵-۱ ساعت با ازن مورد فرآوری قرار گرفتند [۲۵].
- محصولات جانبی واکنش ازن با اسیدهای چرب غیراشباع عمدتاً آلدئیدها، کتون‌ها و هیدروژن پراکسید بودند [۱۶].
- ارزش بیولوژیکی کازئین ازنیده شده نسبت به کازئین فرآوری نشده قابل توجه بود، اگرچه قابلیت هضم رژیم غذایی ازنیده شده (کازئین) کمتر از رژیم کازئین بومی بود. اثرات متابولیکی جانبی در موش‌های صحرایی تغذیه شده با کازئین ازنیده شده به‌علت از دست دادن اسیدهای آمینه و تشکیل ندادن انباشت ترکیبات سمی بود. در

1 Methionine
2 Tyrosine
3 Tryptophan
4 Histidine
5 Kidney
6 Cecum
7 liver
8 Predigestion
9 Pepsin
1 Mutagenic products 0

ژاپن و استرالیا هیچ‌گونه محدودیتی در مورد ازن به‌عنوان عامل فرآوری مواد غذایی وجود ندارد. به نظر می‌رسد تلاش برای ایجاد مقررات مطابق با الزام سایر کشورهای عضو در جامعه اروپایی وجود داشته باشد [۲۶].

پیشرفت فن‌آوری، جنبه‌های زیست‌محیطی و چالش‌های کاربرد ازن

تحولات قابل توجهی در روش‌های تولید ازن ازجمله تخلیه کرونا/پلاسما و پرتودهی فرابنفش وجود دارد که باعث می‌شود ازن‌دهی یک رویکرد سبزتری برای فرآوری مواد غذایی باشد. جنبه‌های فنی-اقتصادی تولید ازن ازجمله کنترل فرآیند، مقیاس تولید، شیوه‌های کاربرد و محدودیت‌های هر روش مشخص شده‌اند. چالش‌هایی که در تولید صنعتی ازن وجود دارند، همراه با روندهای آینده به آن‌ها پرداخته شده است. سیستم‌های جدید برای تولید ازن در داخل بسته‌بندی‌های آب‌بندی‌شده در هوا و یا اتمسفرهای اصلاح شده شرح داده شده است. چنین رویکردهایی برای بسیاری از کاربردهای غذایی از محصولات تازه گرفته تا محصولات گوشتی مناسب هستند [۲۸]. برای دستیابی به پتانسیل کامل عملیات تجاری فن‌آوری‌های نوین، مسائل مربوط به اثرات زیست‌محیطی مانند فاضلاب و انتشار گاز، حفظ منابع تجدیدناپذیر و مصرف انرژی باید توسط فرآوری کننده‌های مواد غذایی مورد بررسی قرار گیرد، زیرا آن‌ها می‌توانند کاهش قابل توجهی در هزینه‌های فرآوری داشته باشند [۳۱]. صنعت غذا یک مشتری بزرگ انرژی برای فرآوری حرارتی متداول ازجمله سوخت فسیلی است. آب یک عنصر کلیدی در صنعت مواد غذایی است و نقش اساسی در بسیاری از فرآوری‌های متداول مواد غذایی و عملیات واحد مانند خیساندن، شستن[1] شستشو[2] رنگ‌زدایی[3] حرارت‌دهی، پاستوریزه کردن، سرد کردن[4] خنک کردن[5] تولید بخار، تمیز کردن عمومی، اقدامات بهداشتی و ضدعفونی دارد. با این حال، صنعت هنوز استفاده از دستگاه‌ها و شیوه‌های صرفه‌جویی آب را خیلی خوب نشناخته است. در حالی که ازن در سطح جهان یک روش فرآوری آب به‌صورت موفق بوده است، مقالات نشان داده‌اند که هنوز توسط صنایع غذایی تا حد زیادی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، هر چند که برای استفاده در بازیابی آب سرد برای ماکیان توسط وزارت کشاورزی ایالات‌متحده در سال ۱۹۹۷ مورد تائید قرار گرفته است [۱۰]. پتانسیل ازن به‌عنوان یک جایگزین برای فرآوری آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد آب در صنایع غذایی، استفاده در بخش میوه و سبزی، گوشت و لبنیات شناسایی شده‌اند. اثربخشی ازن برای استفاده مجدد ایمن آب در صنایع غذایی از لحاظ فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی بررسی شده‌اند. علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه علمی و پتانسیل صنعتی ازن در غذاهای دریایی، گوشت و ضدعفونی کردن بقایای آفت‌کش‌ها در زنجیره غذایی، کمبود مطالعات گزارش شده در این حوزه به‌طورکلی وجود دارد. همچنین، پتانسیل کاهش هزینه‌های فرآوری از طریق کاربرد فن‌آوری‌های ازن به‌طور گسترده‌ای منتشر نشده است. آگاهی و درک کاربردهای ازن برای غذاها، عاملی برای بهبود درک فن‌آوری ازن توسط صنعت است. افزایش چشم‌انداز وضعیت قوانین ازن برای کاربردهای غذایی باعث افزایش پذیرش جهانی توسط صنعت غذا خواهد شد.

1 Washing
2 Rinsing
3 Blanching
4 Chilling
5 Cooling

نتیجه‌گیری

ازن یک ماده شیمیایی است که می‌تواند به‌تنهایی و در ترکیب با روش‌های دیگر فرآوری مواد غذایی، مزایای بسیاری برای صنعت غذا فراهم کند. با این حال، طبیعت بالقوه خطرناک آن باید درک شود و اقداماتی صورت گیرد تا اطمینان حاصل شود که کارکنان کارخانه در معرض بیش از حد ازن نیستند. قرار گرفتن در معرض غلظت‌های پایین ازن برای مدت کوتاه باعث ایجاد صدمه به افراد نمی‌شود، تا زمانی که غلظت و زمان در معرض قرار گرفتن ازن کمتر از حداکثر مقدار مجاز آن باشد. در بیش از ۱۰۰ سال استفاده ازن در انواع کارخانه‌های فرآوری و صنعتی-تجاری، هرگز مرگ‌ومیر ناشی از قرار گرفتن در معرض ازن گزارش نشده است. تجهیزات تجاری برای تولید، اعمال، پایش و کنترل ازن در هر دو فاز آبی و گازی برای کاربردهای مختلف در کارخانه فرآوری مواد غذایی در دسترس هستند. زمانی که روش‌های تولید به‌صورت مناسب استفاده شوند، ازن برای کارگران کارخانه ایمن بوده و اثرات مضر احتمالی برای غذاهای فرآوری شده با ازن ندارد. هنگامی‌که اکسیژن به‌عنوان گاز تغذیه برای تولید ازن استفاده می‌شود، کاربران باید آگاه باشند که قابلیت اشتعال بسیاری از مواد آلی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. قرار گرفتن در معرض برخی از مواد آلی برای اکسیژن با خلوص بالا ممکن است تخریب این مواد را افزایش دهد. بنابراین، هنگامی‌که اکسیژن برای تهیه ازن استفاده می‌شود، به‌عنوان یک رویداد رایج در بسیاری از کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی باید اقدامات لازم نسبت به آتش‌سوزی‌های احتمالی که ممکن است ناشی از جرقه یا شعله در اثر نشت اکسیژن باشد، جلوگیری شود. علاوه بر این، باید توجه خاصی به مواد مقاوم در برابر اکسیژن و ازن داشت زمانی که این دو ابزار برای فرآوری مواد غذایی در کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی طراحی شده باشند. کنترل ایمن و استفاده از مواد خطرناک در کاربردهای تجاری-صنعتی ازن ضروری دارد که خطرات بالقوه چنین موادی درک و احتیاط‌های لازم در فرایندهای استفاده آن‌ها طراحی شوند.

منابع

1. Beltran, F.J. 2004. Ozone Reaction kinetics for water and wastewater system. New York, NY: CRC Press CLL.
2. Coke, A.L. 1993. Mother nature’s best remedy: ozone, Water Conditioning and Purification, Oct.: 48-51.
3. EPRI. 1997. Expert Panel Report: Evaluation of the History and Safety of Ozone in Processing Food for Human Consumption, Vol. 1: Executive Summary, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, Final Report, TR-108026-VI-4827.
4. Erdman, J.W. 1997. Nutrient impact (of ozone contact with foods), in EPRI (1997) Expert Panel Report: Evaluation of the History and Safety of Ozone in Processing Food for Human Consumption, Vol. 1: Executive Summary, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, Final Report, TR-108026-VI-4827, Chapter 5).
5. Erdman, J.W. and Poneros-Schneier, A. 1994. Factors affecting nutritive value in processed foods, in Shils, M.E., Olson, J.A. and Shike, M. (eds) Modern Nutrition in Health and Disease, Philadelphia, PA: Lee and Febiger. pp: 1569-1578.
6. Evans, F.L. 1972. Ozone in Water and Wastewater Treatment. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers.
7. FDA. 2001. Secondary direct food additives permitted in food for human consumption. Federal Register, 66(123): 33 829-30.

8. Gorman, B.M., Kochevar, S.L., Sofus, J.H., Morgan, J.G., Schmidt, G.R., and Smith, G.S. 1995. Shelf-life of beef tissue following spray-washing with chemical solutions and 35 °C or 74 °C water (Abstract), IFT Annual Meeting 1995, p. 140.
9. Graham, D.M., Pariza, M.W., Glaze, W.H., Erdman, J.W., Newell, G.W., and Borzelleca, J.F. 1997. Use of ozone for food processing. Food Technology, 51(6):72-76.
10. Guzel-Seydim, Z.B., Greene, A.K., and Seydim, A.C. 2004. Use of ozone in the food industry. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 37(4): 453-60.
11. Henry, L., Jaren, M., Catignani, G., and Schwartz, S. 1996. The effects of ozone and oxygen exposure on the degradation kinetics of β-carotene and lycopene, Presented at the 11th International Symposium on Carotenoids, Leiden, The Netherlands, 18-23 Aug. (Abstract 42).
12. Hill, A.G., and Rice, R.G. 1982. Historical background, properties and applications. in Rice, R.G. and Netzer, A. (eds) Handbook of ozone technology and applications, Vol. 1, Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers. pp: 1-37.
13. Kasei, T., Sakamaki, T., and Kiriyama, S. 1994. Modified process for preparation ozonated casein and nutritional evaluation of the product with rats. Biosci Biotech Biochem, 58(3): 451-454.
14. Kogelschatz, U. 1988. Advanced ozone generation, in Stucki, S. (ed) process technologies for water treatment, New York, NY: Plenum Publishers. pp. 87-120.
15. Kolodyaznaya, V.S., and Suponina, T.A. 1975. Storage of foods using ozone, Kholodil'naya Tekhnika, 6: 39-41.
16. Kozumbo, W.J., Hanley, N.M., Agarwal, S., Thomas, M.J., and Madden, M.C. 1996. Products of ozonated arachidonic acid potentiate the formation of DNA single strand breaks in cultured human lung cells. Environ Mol Mutagenesis, 27: 165-95.
17. Kuprianoff. 1953. The use of ozone for the cold storage of fruit, Z Kaltentechnik, Vol. 10 (translation).
18. LaLecheur, R., and Glaze, W.H. 1996. Reactions of ozone and hydroxyl radicals with serine. Environ Sci and Technology, 30: 1072-80.
19. Mahapatra, A.K., Muthukumarappan, K., and Julson J.L. 2005. Applications of ozone, bacteriocins and irradiation in food processing: a review. Crit Rev Food Sci Nutr, 45(6): 447-461.
20. Manley, T.C., and Niegowski, S.J. 1967. Ozone, in Encyclopedia of Chemical Technology. 2 edn, New York, NY: John Wiley & Sons. pp: 410-32.
21. Mustafa, M.G. 1990. Biochemical basis of ozone toxicity. Free Radical Biology and Medicine, 9: 245-65.
22. Naito, S., and Nanba, Y. 1987. Studies on the utilization of ozone in food processing. Part IV. The effect of ozone treatment on thiamine and riboflavin contents of cereal grains, cereal grain powders, legumes and whole spices, Nippon Skokuhin Kogyo Gakkaishi, 34(12): 794-800.
23. Naito, S., Sawada, Y., and Yamaguchi, N. 1989. Studies on utilization of ozone in food preservation: effects of ozone treatment on packaged Namamen Japanese raw noodle, J Antibacterial and Antifungal Agents, Japan, 17(11): 517-26.
24. Naitoh, S. 1989. The influence of ozone treatment on lipids contained in cereal grains, cereal grain powders, peas, beans and pulse products (studies on utilization of ozone for food preservation, Part VI), J Japanese Soc of Food Science and Technology, 36(11): 878-83.

25. Naitoh, S. 1992. Studies on the application of ozone in food processing: mutagenicity of ozone-treated amino acids and saccharides. J Antibact Antifung Agents, 20(7): 365-72.
26. Newell, G.W. 1997. Safety issues (with ozone in food contact) – toxicology, in EPRI (1997) Expert Panel Report: Evaluation of the History and Safety of Ozone in Processing Food for Human Consumption, Vol. 1: Executive Summary, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, Final Report, TR-108026-VI-4827, Chapter 4.
27. NTP. 1995. Toxicology and Carcinogenesis: Studies with Ozone and Ozone/NNK, US Natl Toxicology Program, Natl Inst of Health, Pub. No. 95-3371.
28. O'Donnell, C., Tiwari, B.K., Cullen, P.J., and Rice, R.G. 2012. Ozone in Food Processing. Blackwell Publishing Ltd. 308 pages.
29. Pascual, A., Llorca, I., and Canut, A. 2007. Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. Trends Food Sci & Tech, 18: S29-S35.
30. Pehkonen, A. 2001. The effect of dissolved ozone on the corrosion behavior of some stainless steels, Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Materials Science and Rock Engineering.
31. Pereira, R.N., and Vicente, A.A. 2010. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. Food Research International, 43: 1936-1943.
32. Priyanka, B.S., Rastogi, N.K., and Tiwari, B.K. 2004. Opportunities and challenges in the application of ozone in food processing.
33. Rakness, K.L. 2005. Ozone in drinking water treatment: process design, operation, and optimization, denver, CO: Am. Water Works Assoc.
34. Rice, R.G, and Gomez-Taylor, M. 1986. Occurrence of by-products of strong oxidants reacting with drinking water contaminants--scope of the problem. Environ Health Perspect, Nov, 69: 31-44.
35. Rice, R.G. 1986. Application of ozone in water and wastewater treatment. in Rice, R.G., Bollyky L.J. and Lacy, W.J. (eds) Analytical aspects of ozone treatment of water and wastewater, Chelsea, MI: Lewis Publishers. pp: 7-26.
36. Rice, R.G., and Bollyky, L.J. 1981. Fundamental aspects of ozone technology. in Rice, R.G. (ed) ozone treatment of water for cooling applications. Vienna, VA: The international ozone association. pp: 1-19.
37. Rice, R.G., Farquhar, J.W., and Bollyky, L.J. 1982. Review of the applications of ozone for increasing storage times of perishable foods. Ozone: Science & Engineering, 4: 147-63.
38. Watanabe, T., Takai, Y., Tanaka, K., and Suzuki, A. 1994. Effects of ozone exposure during cultivation of nameko mushroom (Pholiota nameko) on fatty acid composition of the fruit bodies. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, 41(10): 709-14.
39. Wickramanayake, G.B. 1991. Disinfection and sterilization by ozone, in Seymour, S.B. (ed) Disinfection, sterilization and preservation, 4 edn, Malvern, PA: Lea and Febiyer. pp: 182-90.

A review on ozone: properties, effects, reaction mechanisms, environmental and safety aspects in food processing

Marzieh Ghorbani [1*], Mohammad Hossein Kianmehr [2], Akbar Arabhosseini [3], Ehsan Sarlaki [4], Ali Asadi Alamouti [5], Reza Sadeghi [6]

1. Ph.D. Student, Department of Agrotechnology, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran (marzie.ghorbani@ut.ac.ir)
2. Professor, Department of Agrotechnology, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran (kianmehr@ut.ac.ir)
3. Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran (ahosseini@ut.ac.ir)
4. Ph.D. Student, Department of Agrotechnology, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran (e.sarlaki685@ut.ac.ir)
5. Assistant Professor, Department of Animal and Poultry Science, University of Tehran, Pakdasht, Iran (a.alamouti@ut.ac.ir)
6. Associate Professor, Department of Entomology and Plant Pathology, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran (rsadeghi@ut.ac.ir)

Abstract

The objective of this work is to demonstrate the potential technoeconomic benefits of employing ozone in the food industry to facilitate increased industry adoption. In this work, current state of the art and reviews emerging uses of ozone technology is provided. The Physicochemical properties of ozone and principles of ozonation, process control parameters, reaction mechanism in deactivation of microorganisms and their effects of nutritional value and food quality are scrutinized and outlined. Finally, health and safety aspects of the applying ozone in food processing as well as industrial future trend of ozonation in food treatment are reviewed and discussed.

Keywords: Ozone, Physicochemical properties, Food processing, health and safety aspects

***Corresponding author**
E-mail: marzie.ghorbani@ut.ac.ir