

# INŻYNIERIA ROLNICZA

**Seria: Monografie i Rozprawy**

**ISBN 978-83-64377-58-7**

**Emilia Osmólska,  
Agnieszka Starek-Wójcicka,  
Joanna Pawłat**

**Niekonwencjonalne metody utrwalania  
produktów rolno-spożywczych**

**Komitet Inżynierii Rolniczej  
Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej**

**Kraków 2024**

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

**Niekonwencjonalne metody utrwalania  
produktów rolno-spożywczych**

**Emilia Osmólska, Agnieszka Starek-Wójcicka,  
Joanna Pawłat**

Kraków 2024

### **Rada Naukowa Wydawnictwa**

Radomir Adamovsky, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic

Aylin Altan, Mersin University, Turkey

Vlodymyr Bulgakov, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Karl-Heinz Dammer, Leibniz-Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Germany

Dariusz Dziki, University of Life Sciences in Lublin, Poland

Pavol Findura, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Dorota Haman, University of Florida, USA

Zuzana Hlaváčová, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Lisa A. Holden, College of Agricultural Sciences, USA

Ryszard Hołownicki, Research Institute of Horticulture in Skierniewice, Poland

Bruno Huyghebaert, Walloon Agricultural Research Centre, Belgium

Jacek Przybył, Poznań University of Life Sciences, Poland

Alaa Subr, University of Baghdad, Iraq

Bernardo Strasbourg, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil

Muhammad Sultan, Bahauddin Zakariya University, Pakistan

### **Komitet Redakcyjny**

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – redaktor naczelny

Prof. dr hab. inż. Sławomir Kocira – sekretarz

### **Recenzenci:**

Prof. dr hab. inż. Dariusz Choszcz - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Prof. dr hab. inż. Andrzej Dowgiałło - Morski Instytut Rybacki PIB w Gdyni

### **Wydawca:**

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

ISBN 978-83-64377-58-7

### **Druk i oprawa:**

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: [biuro@novasandec.pl](mailto:biuro@novasandec.pl); <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 7,56; ark. druk. 6,75

Nakład: 100 egz.

## Spis treści:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	5
1. WPROWADZENIE .....	7
2. SEKTOR ROLNO-SPOŻYWCZY W POLSCE.....	9
2.1. Rola sektora rolno-spożywczego.....	10
2.2. Pandemia COVID-19 a polski sektor rolno-spożywczy.....	13
2.3. Prawne i organizacyjne wymagania warunkujące funkcjonowanie przemysłu rolno-spożywczego w Polsce.....	15
3. BEZPIECZEŃSTWO I JAKOŚĆ ŻYWNOŚCI PRODUKOWANEJ W POLSCE...	17
4. ZARYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE STOSOWANIA KONWENCJO- NALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI.....	21
5. WPROWADZENIE DO NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWA- LANIA .....	25
6. WYBRANE INNOWACYJNE SPOSOBY PRZEDŁUŻANIA TRWAŁOŚCI PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH.....	27
6.1. Pole elektryczne – pulsacyjne pole elektryczne (PEF).....	27
6.2. Ozonowanie .....	35
6.3. Wysokie ciśnienie hydrostatyczne – technologia HPP .....	43
6.4. Ultradźwięki - sonikacja .....	53
6.5. Plazma nietermiczna.....	61
7. SZANSE I ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI.....	73
8. PODSUMOWANIE .....	75
BIBLIOGRAFIA .....	77
SPIS STRON INTERNETOWYCH.....	99
STRESZCZENIE .....	100
ABSTRACT.....	100
SPIS RYSUNKÓW .....	101
SPIS TABEL.....	102
ZAŁĄCZNIK 1 .....	103



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- HT – wysoka temperatura (ang. *High Temperature*)  
HTST – pasteryzacja łagodna (ang. *High Temperature Short Time*)  
HP – wysokie ciśnienie (ang. *High Pressure*)  
HPP – wysokie ciśnienia hydrostatyczne (ang. *High Pressure Processing*)  
PEF – pulsacyjne pole elektryczne (ang. *Pulsed Electric Field*)  
*Ec* – natężenie pola elektrycznego (ang. *Intensity of the Electric Field*)  
CAP – zimna plazma atmosferyczna (ang. *Cold Atmospheric Plasma*)  
FDA – Agencja Żywności i Leków (ang. *Food and Drug Administration*)  
EFSA – Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (ang. *European Food Safety Authority*)  
USDA – Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych, (ang. ang. *United States Department of Agriculture*)  
RTE – gotowe do spożycia posiłki (ang. *Ready to Eat*)  
SEM – skaningowy mikroskop elektronowy (ang. *Scanning Electron Microscope*)  
RONS – reaktywne formy tlenu i azotu (ang. *Reactive Oxygen and Nitrogen Species*)  
BI – indeks brązowienia (ang. *Browning Index*)  
DPPH – modelowy rodnik 2,2-difenylo-1-pikrylohydrazylowy (ang. *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical*)  
ORAC – zdolność pochłaniania reaktywnych form tlenu przez przeciwutleniacze (ang. *Oxygen Radical Absorbance Capacity*)  
FRAP – zdolności przeciwutleniacza do redukcji żelaza Fe (III) (ang. *Ferric Reducing Antioxidant Power*)  
MDA – wolny aldehyd malonowy (ang. *Malondialdehyde*)



## **1. WPROWADZENIE**

Utrwalanie żywności jest kluczowym aspektem zapewnienia zrównoważonych dostaw żywności i ograniczenia jej marnowania. Pozwala na wydłużenie okresu przydatności do spożycia artykułów spożywczych, zmniejszając tym samym prawdopodobieństwo ich przedwczesnego zepsucia i potrzebę ciągłej produkcji (Żakowska-Biemans, 2009; Sapa, 2010; Adamczyk, 2019).

Na przestrzeni dziejów różne kultury na całym świecie stosowały różnorodne metody obróbki żywności. Do dnia dzisiejszego obejmują one między innymi: suszenie, solenie, wędzenie, kiszenie i marynowanie, a każda z nich ma na celu przedłużenie okresu przydatności do spożycia. Suszenie, na przykład, polega na usuwaniu wilgoci z produktów spożywczych, hamując rozwój bakterii i pleśni. Podobnie, solenie i wędzenie są wykorzystywane do odwadniania i konserwowania mięsa i ryb, podczas gdy kiszenie i marynowanie opierają się na działaniu pożytecznych bakterii w celu utrwalenia między innymi owoców i warzyw (Polak, 2007; Hać-Szymańczuk i in., 2019; Calín-Sánchez i in., 2020).

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój innowacyjnych technik utrwalania żywności, które mają na celu wyeliminowanie użycia ciepła, przy jednoczesnej poprawie ogólnej jakości i bezpieczeństwa artykułów rolnych i żywnościowych. Kluczowe znaczenie ma wartość odżywcza, a także tekstura, smak, konsystencja czy barwa, przyczyniające się do ogólnego wrażenia sensorycznego podczas konsumpcji. Względy bezpieczeństwa dotyczą zaś minimalizowania ryzyka chorób wynikających z zanieczyszczenia żywności (Świdorski i in., 2012; Szosland-Fałtyń i in., 2013). Techniki te obejmują przetwarzanie pod wysokim ciśnieniem, za pomocą pola elektrycznego, ozonu, sonikacji czy plazmy nietermicznej (Zhang i in., 2019; Mahendran i in., 2019; Starek-Wójcicka i in., 2022; Waghmare i in., 2023). Wdrażanie wymienionych nowych metod nie wiąże się zazwyczaj z dużymi kosztami. Przyczynia się za to, do postępu technicznego, obejmującego lepsze gospodarowanie zasobami, które aktualnie są użytkowane. Proces zmian rozwojowych wyrażający się przez wprowadzenie do procesu produkcji udoskonalonych maszyn, urządzeń, technologii oraz nowych produktów indukuje działania proekologiczne i innowacyjne rozwiązania z korzyścią dla wszystkich ludzi na świecie. Zastosowanie niekonwencjonalnych metod obróbki na skalę przemysłową umożliwi również małym i średnim przedsiębiorstwom zwiększenie swojej konkurencyjności na rynku i rozwijanie nowych modeli biznesowych (Amit i in., 2017; Reżek Jambrak i in., 2021; Hassoun i in., 2022).

Szczególnie w obecnych czasach, gdy ludzkość trapi tak wiele trudnych i złożonych problemów, istnieje olbrzymia potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa mikrobiologicznego żywności. Niezmiernie ważna staje się sprawa świadomości, umiejętności tworzenia systemowych mechanizmów gwarantujących zachowanie odpowiedniej jakości surowcom szczególnie nietrwałym. Szybkie psucie się tego typu produktów naraża bowiem zakłady przetwórstwa spożywczego na straty finansowe. Dlatego też, poza dostarczaniem odpowiednich składników odżywczych, zarówno produkty pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego powinny charakteryzować się dużą zdolnością przechowalniczą oraz dyspozycyjnością ułatwiającą obrót w sieciach handlowych.





## 2. SEKTOR ROLNO-SPOŻYWCZY W POLSCE

Sektor rolno-spożywczy w Polsce odgrywa kluczową rolę w gospodarce kraju, obejmując produkcję żywności, przetwórstwo rolnicze, dystrybucję, a także eksport i import artykułów spożywczych. Polska charakteryzuje się bowiem zróżnicowanym krajobrazem rolniczym, umożliwiającym między innymi uprawę zbóż, warzyw, owoców, chów i hodowlę zwierząt (Soczewka i Ginter, 2013; Kiełbasa, 2015). Należy również podkreślić, że wiele polskich zakładów przetwórczych specjalizuje się w produkcji artykułów spożywczych, takich jak wędliny, sery, pieczywo, napoje czy słodycze. Nasz kraj jest również ważnym eksporterem produktów rolno-spożywczych na rynki zagraniczne. Jednocześnie kraj importuje pewne wyroby, aby zaspokoić krajowe potrzeby (Pawlak i Poczta, 2008; Dolata i Hadryjańska, 2013).

Rysunek 1 przedstawia najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego.



Rys. 1. Najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego

Ostatnie lata przyniosły wzrost innowacji i zastosowania nowoczesnych technologii w sektorze rolno-spożywym. Firmy wprowadzają nowe metody produkcji, monitorują jakość żywności, a także skupiają się na ekologii i zrównoważonym rozwoju (Chyłek i in., 2016; Pawlewicz i Brodziński, 2017). Ponadto Polska implementuje różne programy i środki wsparcia dla rolnictwa, mające na celu zwiększenie konkurencyjności sektora, poprawę standardów produkcji oraz wsparcie dla małych gospodarstw rolnych (Duczowska-Małysz, 2009). Bez wątpienia w ostatnich latach w polskim rolnictwie nastąpiła widoczna zmiana jakościowa pod względem poprawy efektywności produkcji oraz modernizacji zaplecza techniczno- produkcyjnego.

Mimo wielu sukcesów w tym zakresie, krajowy sektor rolny oraz przemysł spożywczy wymagają dalszych zmian polegającym na wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań. Można je

osiągnąć poprzez zwiększenie konkurencyjności obu sektorów. Wymaga to efektywnej współpracy pomiędzy kadrami naukowo-badawczą, administracją i przedsiębiorstwami oraz wdrażania praktycznych rozwiązań naukowych. Realizacja polityki państwa w zakresie wdrażania innowacyjności w rolnictwie i przemyśle rolno-spożywczym jest jednym z priorytetowych zadań ujętych w „Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 roku), gdzie jako specjalizację określono: „Biogospodarka rolno-spożywcza, leśno-drzewna i środowiskowa”, a w ramach niej wyodrębniono trzy następujące: KIS 4. Innowacyjne technologie, procesy i produkty sektora rolno-spożywczego i leśno-drzewnego; KIS 5. Zdrowa żywność (o wysokiej jakości i ekologiczności produkcji); KIS 6. Biotechnologiczne procesy i produkty chemii specjalistycznej oraz inżynierii.

Zmiana klimatu również niesie ze sobą wiele wyzwań dla rolnictwa w Unii Europejskiej. Wspólna polityka rolna ma jednak za zadanie zwiększyć odporność rolnictwa i leśnictwa na zmianę klimatu oraz wspierać działania, które pomagają osiągnąć unijne cele klimatyczne. Nie bez znaczenia jest także problematyka związana ze zrównoważonym rozwojem, który odpowiada na obecne potrzeby globalne oraz bierze pod uwagę konieczność zaspokajania potrzeb przyszłych generacji (Chotkowski i Rembeza, 2010; Nosecka i in., 2012; Pawlak i Kołodziejczak, 2020).

## 2.1. Rola sektora rolno-spożywczego

Przemysł spożywczy wyróżnia się jako jeden z głównych i szybko rozwijających się segmentów polskiej gospodarki. Uważany jest za ważne ogniwo łańcucha żywnościowego, ponieważ integruje pozostałe elementy tego łańcucha, takie jak: rolnictwo, skup i handel produktami rolnymi oraz handel żywnością. Specyfika produktów żywnościowych powoduje, że są one absolutnie niezbędne dla konsumentów i w coraz większym stopniu są zdolne zaspokajać ich rosnące wymagania konsumentów. Co więcej, przemysł spożywczy w Polsce ma znaczący udział w gospodarce narodowej, szczególnie w wartości dodanej brutto, liczbie przedsiębiorstw, zatrudnieniu czy produkcji sprzedanej. Sektor ten w produkcji zużywa najwyższej jakości surowce, poziom technologiczny samego przetwórstwa uznać można za jeden z nowocześniejszych, a polska żywność cieszy się coraz większym zainteresowaniem na świecie (Firlej, 2015; Zuba-Ciszewska, 2020).

Era członkostwa Polski w Unii Europejskiej była okresem wyraźnego wzrostu handlu zagranicznego produktami rolno-spożywczymi. Ta wzrostowa trajektoria była widoczna już od akcesji w 2004 roku, kiedy to polski handel produktami rolno-spożywczymi odnotował znaczny wzrost o prawie 30% w porównaniu z rokiem poprzednim. Ta pozytywna dynamika utrzymywała się w kolejnych latach, a wartość handlu stale rosła, napędzana trwałym rozwojem eksportu, jak i importu. Od momentu akcesji Polski do UE dodatnie saldo wymiany handlowej produktami rolno-spożywczymi przeważnie wciąż rosło (z wyjątkiem lat 2008 i 2011). W 2017 roku wartość bilansu handlowego przekroczyła 9,6 mld USD, co oznacza ponad dziewięciokrotny wzrost w porównaniu z 2004 rokiem. Dla porównania, w tym samym okresie skumulowana stopa wzrostu PKB, wyrażona jako wartość stała, wyniosła około 163%. Dynamika eksportu i salda handlu zagranicznego produktami rolno-spożywczymi znacząco przewyższała tempo wzrostu PKB, potwierdzając proeksportowy

charakter rozwoju tego sektora polskiej gospodarki (Kowalski, 2009; Wiśniewska, 2010; Grzelak i Roszko-Wójtowicz, 2015; Mizik, 2021; Szajner i Szczepaniak, 2020).

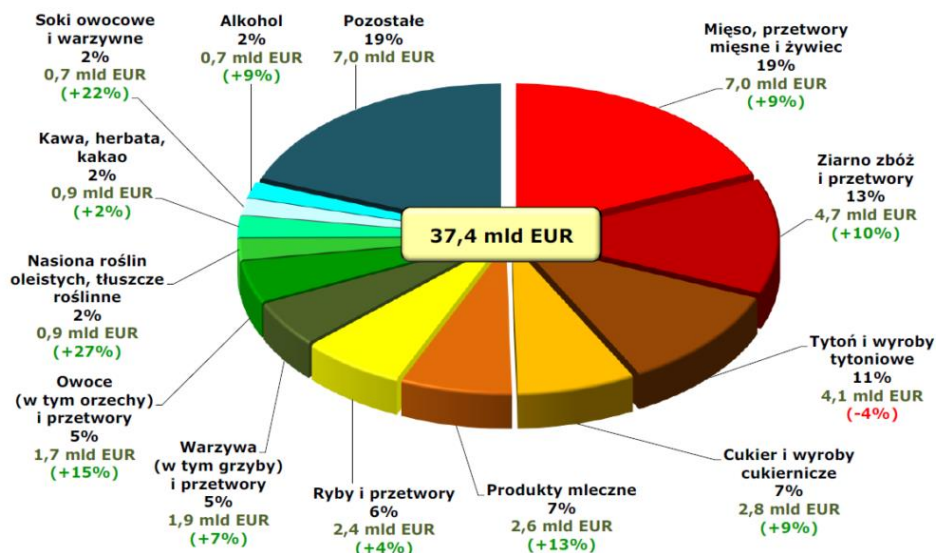
Jedynie odchylenie miało miejsce w 2009 roku, kiedy to w wyniku globalnego kryzysu finansowego prowadzącego do spowolnienia gospodarczego, handel skurczył się o prawie 11% w ujęciu rok do roku. Do 2017 roku całkowita wartość handlu polskimi produktami rolno-spożywczymi wzrosła do prawie 49,6 mld USD, przy eksporcie wynoszącym około 29,6 mld USD i imporcie na poziomie 20,0 mld USD. W porównaniu z 2004 rokiem oznacza to ponad czterokrotny wzrost obrotów, przy czym eksport wzrósł 4,5-krotnie, a import ponad 3,5 – krotnie (PARP – grupa PFR, 2020; PAIiH – grupa PFR, 2021).

Przemysł spożywczy charakteryzuje się znaczącym udziałem w tworzeniu PKB, czego wynikiem jest wartość dodana produkcji żywności, która w 2017 roku wyniosła 44,5 mld zł, stanowiąc 13,2% PKB. Dla porównania, sektor budowlany wniósł w owym okresie około 7% do PKB.

Co więcej, produkcja żywności miała zasadniczy udział w całkowitej wartości przetwórstwa przemysłowego. W 2017 roku stanowiła ona 15,4%, zapewniając 15. pozycję w rankingu produkcji sprzedanej. Silne powiązanie sektora z konkurencyjnymi rynkami eksportowymi, zarówno w UE, jak i w krajach trzecich, podkreśla strategiczne znaczenie produkcji żywności w Polsce dla wspierania inwestycji krajowych i zagranicznych. W szczególności produkcja i przetwórstwo żywności stanowią siłę napędową rozwoju gospodarczego kraju. Globalne trendy w popycie na żywność dodatkowo uwidaczniają znaczny potencjał rozwojowy polskiego przemysłu spożywczego (Pawlak, 2018; Baján i in., 2021).

W strukturze polskiego eksportu produktów rolno-spożywczych dominującą rolę odgrywało mięso i jego pochodne. W 2021 roku przychody wygenerowane ze sprzedaży zagranicznej w tej kategorii odnotowały 9% wzrost w porównaniu z rokiem poprzednim, osiągając łącznie 7,0 mld euro. Stanowiło to 19% ogólnej wartości polskiego eksportu produktów rolno-spożywczych. Największy udział w wartości eksportu posiadały kolejno: mięso drobiowe (39% - 2,7 mld euro), przetwory mięsne (24% - 1,7 mld euro), wołowina (23% - 1,6 mld euro) oraz wieprzowina (11% - 0,8 mld euro). Eksport żywych zwierząt i innych gatunków mięsa stanowiły stosunkowo niewiele - odpowiednio 2% i 1% przychodów z eksportu produktów mięsnych pochodzących z Polski (rys. 2) (Holstein, 2022).

Pod względem wartości, drugą pozycję w polskim eksporcie produktów rolno-spożywczych zajęły zboża i przetwory zbożowe, stanowiąc 13% udziału. Wartość sprzedaży wzrosła o 10% w stosunku do roku poprzedniego i wyniosła 4,7 mld euro. Odnotowano również znaczny wzrost wartości eksportu cukru i wyrobów cukierniczych (9%, łącznie 2,8 mld euro), produktów mleczarskich (13%, osiągając 2,6 mld euro), a także ryb i produktów przetworzonych (4%, łącznie 2,4 mld euro). Zwiększenie wartości eksportu zaobserwowano również w przypadku warzyw i produktów przetworzonych, z 7% wzrostem (osiągając 1,9 mld euro), owoców, w tym produktów przetworzonych, wykazujących 15% przyrost (osiągając 1,7 mld euro), nasion oleistych i tłuszczów roślinnych odnotowujących wzrost o 27% (osiągając 0,9 mld euro), kawy, herbaty i kakao odnotowujących przyrost o 2% (osiągając 0,9 mld euro), soków owocowych i warzywnych wykazujących 22% wzrost (osiągając 0,7 mld euro) oraz alkoholu wykazującego 9% przyrost (osiągając 0,7 mld euro). Przychody z zagranicznej sprzedaży tytoniu i wyrobów tytoniowych spadły natomiast o 4%, osiągając poziom 4,1 mld euro (rys. 2) (Holstein, 2021).



Rys. 2. Struktura towarowa polskiego eksportu rolno-spożywczego w 2021 roku

([www.holstein.pl](http://www.holstein.pl))

Sukces rodzimych przedsiębiorców w eksporcie jest oczywisty, szczególnie w dziedzinie produktów spożywczych, takich jak wędliny, nabiał, owoce i warzywa, pieczywo, wyroby cukiernicze oraz napoje i soki. Polska żywność cieszy się bowiem dobrą opinią wśród europejskich konsumentów, co przyczynia się do jej rozpoznawalności na rynkach międzynarodowych. Krajowa żywność korzystnie konkuruje na rynkach zagranicznych również pod względem ceny, a zmieniający się krajobraz gospodarczy i rosnąca zamożność, zwłaszcza na perspektywicznych rynkach (azjatyckim czy afrykańskim), podkreślają, że jakość produktu będzie odgrywać coraz większą rolę w pozycjonowaniu rynkowym (Poczta i Pawlak, 2011; Bojnec i Fertő, 2015; Kacperska, 2015).

W świetle rosnących kosztów produkcji i nacisku na trendy prozdrowotne, istnieje szansa na utrzymanie istniejących rynków i zdobycie nowych poprzez wzmocnienie marki lokalnej żywności. Wiąże się to z koncentracją na produktach o najwyższej jakości i wartości odżywczej. Osiągnięcie tego celu będzie jednak wymagało zdobycia nowej wiedzy i umiejętności oraz kompetencji społecznych przez osoby zaangażowane w ten sektor gospodarki (Al-Tit, 2015; Popkin, 2017; Kowalczyk i Kwasek, 2020).

Podejście konsumentów do jakości produktów ewoluuje, wykraczając poza zwykłe potrzeby żywieniowe, obejmując zwiększony nacisk na zrównoważoną produkcję. Mowa tutaj również o kwestiach związanych z ochroną środowiska, w tym zmniejszeniu ilości odpadów, zużyciu energii i wody, ograniczeniu emisji CO<sub>2</sub> oraz rosnących preferencji dla opakowań pochodzących z recyklingu (Głodowska i Gałązka, 2017).

Polska produkcja żywności ma duży potencjał, który charakteryzuje się wyjątkową popularnością i wysokim uznaniem wśród klientów. Podkreśla to rosnącą potrzebę strategicz-

nego kształtowania wizerunku naszego kraju jako dostawcy smacznych, bezpiecznych produktów najwyższej jakości, wytwarzanych z zachowaniem rygorystycznych norm sanitarnych.

Branża przetwórstwa spożywczego odgrywa również znaczącą rolę w zatrudnieniu. W 2017 roku w zakładach przetwórstwa spożywczego pracowało 381 tys. osób, co stanowiło 3% ogółu. Biorąc pod uwagę osoby zaangażowane w produkcję surowców rolnych i dystrybucję, ogólną liczbę pracowników bezpośrednio lub pośrednio związanych z sektorem produkcji i przetwórstwa żywności szacuje się na około 2 miliony osób (PARP-grupa PFR, 2020).

Sektor produkcji żywności w Polsce wyróżnia się zaawansowanymi standardami technicznymi, technologicznymi i organizacyjnymi, wymagającymi siły roboczej wyposażonej w wysokie umiejętności technologiczne, organizacyjne i menedżerskie. Polska stała się wiodącym i innowacyjnym producentem żywności w Europie. Uznając ten potencjał, konieczne jest nadanie priorytetu strategicznym inwestycjom w rozwój sektora, w tym w kształceniu wykwalifikowanej kadry. Nacisk na rozwój umiejętności ma kluczowe znaczenie dla wspierania wszechstronnego rozwoju polskiej gospodarki (Płaza, 2017).

Szereg wyzwań, obejmujących popyt, podaż, uwarunkowania technologiczne, prawne i formalne, stanowi istotną barierę dla wielu firm aspirujących do wejścia na rynek. W związku z tym, istnieje pilna potrzeba ciągłej edukacji wśród specjalistów z branży, obejmującej zarówno krajowe, jak i międzynarodowe przepisy, pojawiające się trendy w technologii produkcji żywności i pakowania, a także zmieniający się krajobraz strategii marketingowych. W obliczu silnej konkurencji sukces operatorów sektora spożywczego w znacznym stopniu zależy od ich zdolności adaptacyjnych do przepisów określających standardy jakości zatwierdzone dla rynku europejskiego.

## **2.2. Pandemia COVID-19 a polski sektor rolno-spożywczy**

Pandemia COVID-19 wywarła znaczący wpływ na polski sektor rolno-spożywczy, oddziałując na różne aspekty produkcji, dostaw i konsumpcji. Jednym z głównych obszarów zakłóceń była zmiana międzynarodowego łańcucha dostaw, co negatywnie wpłynęło na możliwości dystrybutorów surowców i produktów gotowych. Ograniczenia w przemieszczaniu się i zamknięcia granic doprowadziły do wielu problemów w transporcie i handlu międzynarodowym (Szczepaniak i in., 2020; Drożdż i in., 2021).

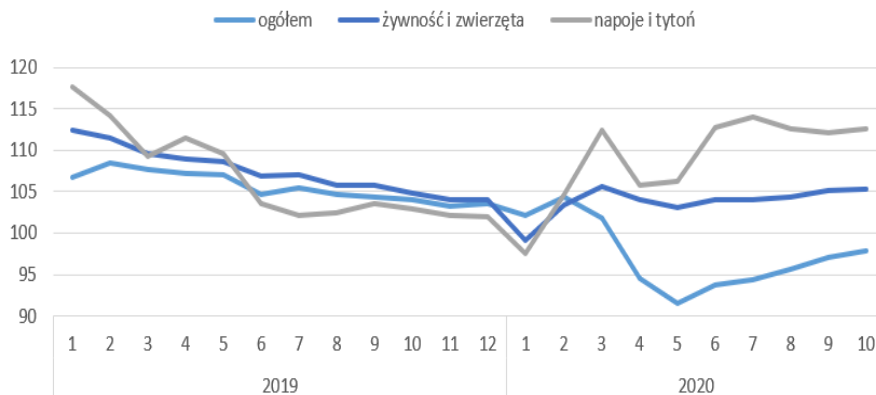
W 2020 roku Polska doświadczyła najbardziej znaczącego spadku PKB we współczesnej historii. Gospodarka skurczyła się realnie o 8,2% w porównaniu z rokiem poprzednim (GUS, 2020a). Spowolnienie rynkowe było jeszcze bardziej widoczne wśród naszych zachodnioeuropejskich konkurentów, a wahania koniunktury rok do roku przekroczyły w niektórych przypadkach 20%, na przykład w Hiszpanii (21,6%) i Wielkiej Brytanii (21,7%). W szerszej skali UE średni spadek w drugim kwartale 2020 r. wyniósł 14%. Pomimo przewidywanego ożywienia w drugiej połowie roku, globalny PKB za cały rok miał według prognoz zmniejszyć się o 5 procent (Spożywcze Technologie, 2021).

Z danych wynika, że polski sektor przetwórstwa spożywczego wykazał się dużą odpornością podczas początkowych skutków kryzysu związanego z Covid-19. Podczas gdy średnia produkcja przemysłu w UE spadła w 2020 r. o 2,6% (z wyłączeniem grudnia), Polska

odnotowała niewielki, ale dodatni wzrost rok do roku na poziomie 0,8%. Redukcja w drugim kwartale była także w Polsce mniej dotkliwa (5,3%) w porównaniu do całej UE (8,3%).

Pandemia Covid-19 w różnym stopniu oddziaływała na segmenty branży spożywczej w Polsce. W czasie kryzysu najlepiej zareagowali producenci trwałej żywności, takiej jak kasze i makarony, ze względu na ich przydatność do długotrwałego przechowywania i domowego przygotowania (rys. 3) (Spożywcze Technologie, 2021).

Co więcej, wyzwania związane z dostępnością siły roboczej stały się widoczne, szczególnie w sektorach związanych z produkcją rolną, gdzie praca dorywcza odgrywa kluczową rolę. Wywołane pandemią ograniczenia w przemieszczaniu się pracowników sezonowych wpłynęły na efektywność procesów rolniczych. Jednocześnie, ze względu na zamknięcie restauracji, ograniczenia w handlu detalicznym i zmiany w zachowaniach konsumentów, zauważalne były również przekształcenia w popycie na różnorodne produkty spożywcze. Wzrosło zainteresowanie produktami o wydłużonym okresie przydatności do spożycia, a konsumenci coraz częściej wyrażali chęć wspierania lokalnych producentów i artykułów spożywczych. Trend ten przyczynił się do zwiększenia znaczenia rynku lokalnego (Kowalczyk, 2020; Drożdż i Mroczek, 2022; Jezierski, 2022).



Rys. 3. Procentowy wskaźnik wolumenu w obrotach handlu zagranicznego w Polsce w latach 2019-2020 ([www.spozywcze Technologie.pl](http://www.spozywcze Technologie.pl))

Niektóre segmenty sektora rolno-spożywczego, napotkały znaczące wyzwania finansowe wynikające z zamknięć i ograniczeń operacyjnych podczas pandemii. Krajowy sektor napojów odczuł osłabienie popytu ze strony sektora Hotel, Restaurant, Catering, natomiast przemysł tytoniowy odnotował znaczne zyski, rosnąc o 6,4% w tym samym okresie i o 9,5% w najbardziej dotkliwym drugim kwartale. Negatywne skutki odczuły sektory produkujące świeżą żywność, pieczywo, silnie uzależnione od eksportu oraz branża HoReCa. Jednak w wielu segmentach nastąpiło odwrócenie negatywnych trendów wraz ze złagodzeniem ograniczeń dotyczących dystansu społecznego i częściowym otwarciem restauracji. Od czerwca w kilku poważnie dotkniętych segmentach ponownie odnotowano roczny

wzrost produkcji. Wpływ na te zmiany miało zniesienie ograniczeń i częściowe „odmrożenie” restauracji w Polsce i większości krajów UE (Spożywcze Technologie, 2021).

Podsumowując, pandemia COVID-19 zmusiła sektor rolno-spożywczy w Polsce do przystosowania się do zmieniających się warunków rynkowych, wdrożenia norm sanitarnych i modyfikacji strategii biznesowych w celu dostosowania się do zmieniającej się dynamiki związanej z pandemią.

### **2.3. Prawne i organizacyjne wymagania warunkujące funkcjonowanie przemysłu rolno-spożywczego w Polsce**

Przemysł rolno-spożywczy ma ogromne znaczenie dla stabilności gospodarczej każdego narodu, będąc istotnym elementem funkcjonowania społeczeństw zarówno w krajach wysoko rozwiniętych, jak i tych rozwijających się. W Polsce sektor ten był świadkiem znaczących przemian, zwłaszcza od 1989 roku, kiedy to kraj przeszedł transformację ustrojową nazwaną liberalizacją, stabilizacją i kompleksowymi reformami gospodarczymi zwanymi „Planem Balcerowicza” (Szczepaniak i Wigier, 2020).

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej wywarło głęboki wpływ na wzrost i rozwój polskiego przemysłu spożywczego, jednak wiązało się z koniecznością przestrzegania wielu nowych praw i rozporządzeń. Codex Alimentarius, utworzony przez FAO i WHO, jest światowym aktem prawnym regulującym dokumenty związane z bezpieczeństwem żywności. Jednakże w Unii Europejskiej głównymi rozporządzeniami kontrolującymi bezpieczeństwo żywności są m.in. Rozporządzenie (WE) nr 178/2002, Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 i Rozporządzenie (WE) nr 882/2004. Rozporządzenie (WE) nr 178/2002 ustanawia ogólne zasady i wymagania dotyczące prawa żywnościowego. Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 określa wymagania higieniczne dla przedsiębiorstw spożywczych, a rozporządzenie (WE) nr 882/2004 wyznacza zasady dotyczące kontroli urzędowych w celu zapewnienia zgodności z prawem żywnościowym i zdrowiem zwierząt. Akty te pomagają w definiowaniu bezpieczeństwa i jakości żywności na terenie Unii Europejskiej (Garlińska-Bielawska i Jakóbiak, 2006; Bryła, 2017; Sokołowski, 2018; Szajner i Szczepaniak, 2020).

Produkty żywnościowe podlegają ścisłym regulacjom, aby zapewnić gwarancję zdrowotności i nieszkodliwości dla społeczeństwa. Przepisy te obejmują normy krajowe i międzynarodowe, których celem jest ochrona zdrowia ludzkiego. W Polsce podstawowym aktem prawnym regulującym sektor spożywczy jest ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 roku o bezpieczeństwie żywności i żywienia (Dz. U. z 2018 r., poz. 1541 ze zm.). Zapewnia ona kompleksowe ramy przestrzegania bezpieczeństwa żywności w całym łańcuchu, od produkcji po konsumpcję. Jednym z kluczowych wymogów określonych w tym ustawodawstwie jest wdrożenie systemu analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli (HACCP) w zakładach zajmujących się produkcją i marketingiem żywności. System ten pomaga identyfikować i kontrolować potencjalne zagrożenia, aby zapobiegać chorobom przenoszonym w trakcie konsumpcji żywności (Rye i Scott, 2018; Szajner i Szczepaniak, 2020; Karwacka i in., 2020).

W okresie integracji polskiego prawa żywnościowego z UE, początkowa faza działań dostosowawczych doprowadziła do powołania Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Podstawowym celem tej komisji było wytyczenie kierunków i wspieranie rozwoju normali-



zacji. W ramach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego stworzono Komitety Techniczne, których zadaniem było zapewnienie zgodności polskich standardów żywności z unijnymi (Nowastowski, 2020).

Ponadto, aby zabezpieczyć się przed wprowadzeniem na rynek niebezpiecznej żywności, Unia Europejska w 2002 roku wdrożyła System Wczesnego Ostrzegania o Niebezpiecznej Żywności i Paszach (RASFF – *The Rapid Alert System for Food and Feed*). Każde państwo członkowskie ma obowiązek uczestniczyć w tym systemie, który odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu niekorzystnym skutkom wynikającym ze spożycia żywności niskiej jakości. Jeżeli produkt spożywczy na którymkolwiek etapie łańcucha żywnościowego zostanie uznany za mogący negatywnie wpłynąć na zdrowie i samopoczucie konsumentów, może zostać szybko wycofany z całej sieci handlowej. W systemie RASFF wyróżnia się trzy podstawowe typy powiadomień dotyczących nieprawidłowości w obrocie żywnością na rynku wspólnotowym: komunikaty alarmowe i informacyjne oraz powiadomienia o zatrzymaniu na granicy. Polska stała się częścią systemu RASFF w 2003 roku, zaś w latach ubiegłych istniał inny system-Krajowy System Informacji o Niebezpiecznych Produktach Żywnościowych, ułatwiający przekazywanie informacji o nieprawidłowościach występujących w procesie obrotu żywnością (Djekic i in., 2017; Majewski i Dziubdziela, 2018; Alshannaq i Yu, 2021).

W tabeli 1 (załącznik 1) przedstawiono wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu.

Ponadto, istnieją jeszcze akty dotyczące żywności dla określonych grup, suplementów diety, żywności wzbogacanej, naturalnych wód mineralnych, wód źródłanych, wód stołowych, grzybów, napromieniania żywności, zanieczyszczeń żywności i pobierania próbek, materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu z żywnością oraz kontroli granicznej.

### **3. BEZPIECZEŃSTWO I JAKOŚĆ ŻYWNOŚCI PRODUKOWANEJ W POLSCE**

Zapewnienie bezpieczeństwa i jakości żywności jest priorytetem w dzisiejszym, ciągle zmieniającym się świecie. Ma to wpływ zarówno na konsumentów, organy regulacyjne, jak i producentów. Troska ta wykracza poza zwykłą etykę i ma bezpośredni wpływ na zdrowie publiczne. Wraz ze wzrostem złożoności globalnych łańcuchów dostaw produktów spożywczych wdrożenie rygorystycznych środków gwarantujących bezpieczeństwo i jakość żywności stało się ważniejsze niż kiedykolwiek wcześniej (Käferstein i Abdussalam, 1999; King i in., 2017; Fung i in., 2018).

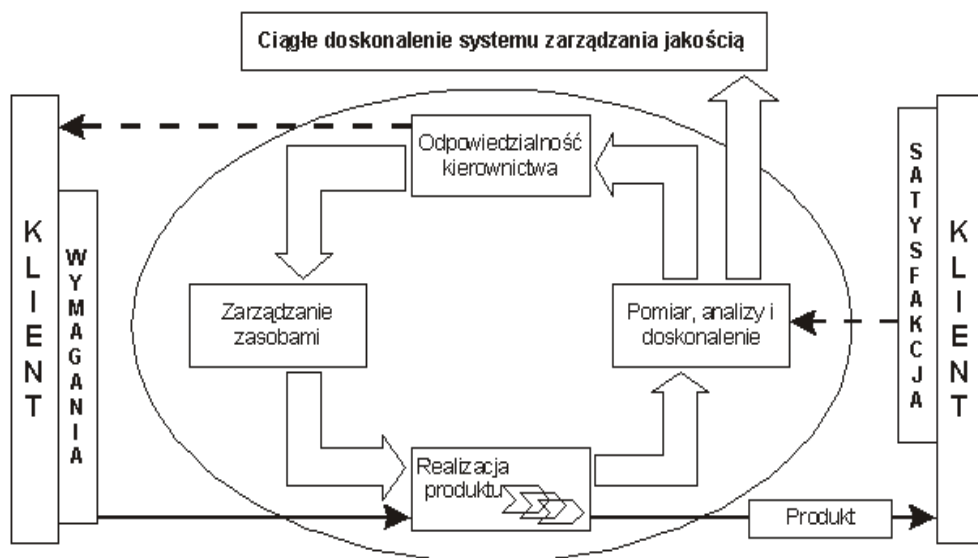
Normy ISO, znane również jako standardy Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej, to kompleksowy zestaw wytycznych i specyfikacji opracowanych przez ekspertów branżowych. Ich celem jest zagwarantowanie jednolitości, bezpieczeństwa i doskonałości produktów, usług i procesów. Przestrzegając tych dokumentów, organizacje mogą ustawić ustrukturyzowane ramy spełniające wymagania klientów, zwiększające efektywność operacyjną i ograniczające ryzyko. Normy ISO obejmują różne dziedziny, w tym zarządzanie jakością, zarządzanie środowiskiem, bezpieczeństwo informacji i bezpieczeństwo żywności. Uznanie znaczenia norm ISO jest niezbędne dla przedsiębiorstw dążących do sukcesu na dzisiejszym niezwykle konkurencyjnym rynku globalnym (Kotsanopoulos i Arvanitoyannis, 2017; Panghal i in., 2018; Agus i in., 2020).

Jedną z najbardziej znanych norm ISO jest norma ISO 9001, czyli wysoce uznawany dokument, który kładzie nacisk na systemy zarządzania jakością. Jest szeroko wdrażany przez organizacje, których celem jest konsekwentne spełnianie wymagań klientów i zwiększanie ich zadowolenia. ISO 9001 dostarcza cennych wskazówek dotyczących ustanawiania i utrzymywania skutecznych procesów, identyfikowania ryzyka i zarządzania nim, poprawy efektywności operacyjnej oraz wspierania ciągłego doskonalenia. Przestrzegając norm ISO 9001, organizacje mogą poprawić swoją ogólną wydajność i zapewnić skupienie się na kliencie w swoich działaniach (Rogala, 2012; Cholewicka-Goździk, 2016; Szkiel, 2016; Natarajan, 2017; Başaran, 2021).

ISO 9001 obejmuje szereg podstawowych zasad, które są kluczowe dla organizacji w celu osiągnięcia i utrzymania wysokich standardów jakości. Zasady te obejmują duży nacisk na satysfakcję klienta, skuteczne przywództwo, angażowanie pracowników, przyjęcie podejścia procesowego, podejmowanie decyzji w oparciu o dowody oraz wspieranie silnych relacji. Wdrożenie ISO 9001 wymaga od organizacji ustalenia jasnych celów jakościowych, regularnego monitorowania wyników i podejmowania działań naprawczych, jeśli zajdzie taka potrzeba. Stosując tę normę, przeprowadzane są regularne audyty i oceny, aby zapewnić przestrzeganie standardów i prowadzić do ciągłego doskonalenia (Purwanto, 2019; Echour i Nbigui, 2021).

Warto również wspomnieć o normie ISO 22000, która jest międzynarodowym standardem określającym wymagania dotyczące ustanawiania, wdrażania, utrzymywania i ciągłego doskonalenia. ISO 22000 to system zarządzania bezpieczeństwem żywności określający kryteria, które organizacja (dowolnej wielkości i o dowolnej pozycji) musi spełnić, aby wykazać skuteczną kontrolę nad zagrożeniami pojawiającymi się na wszystkich etapach produkcji. Norma ta obejmuje cały łańcuch żywnościowy i zawiera elementy zarówno ISO 9001, jak i HACCP.

Na rysunku 4 zobrazowano ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego.



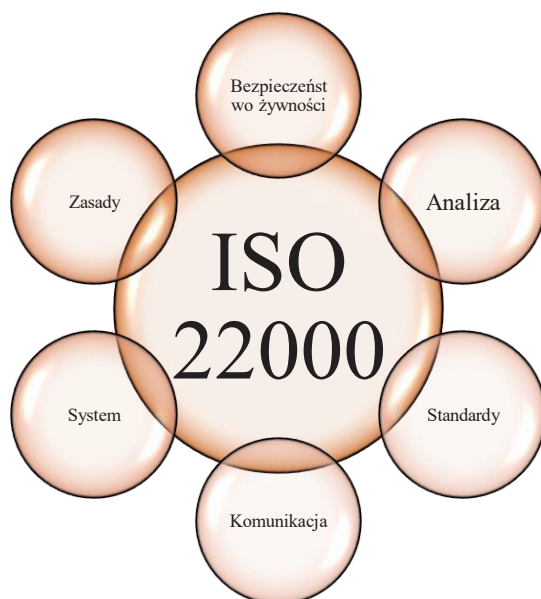
Rys. 4. Ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego

([www.mfiles.pl](http://www.mfiles.pl))

ISO 22000 odgrywa kluczową rolę we wspieraniu organizacji w ulepszaniu i ustanawianiu ich systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności, zapewnianiu zgodności z przepisami i udoskonalaniu różnych aspektów operacyjnych, takich jak kontrola zagrożeń i zarządzanie łańcuchem dostaw. Norma dotyczy komunikacji interaktywnej, zarządzania systemem, programów wprowadzających, zasad HACCP i innych kluczowych elementów znajdujących się w normach systemów zarządzania ISO. Organizacje są zobowiązane do ustanowienia wstępnych programów redukcji zanieczyszczeń, zawierających szczegółowe kryteria dostosowane do wyjątkowej sytuacji każdej organizacji (Psomas i Kafetzopoulos, 2015; Soares i in., 2016; Allata i in., 2017; Chen i in., 2020).

Korzyści wynikające z normy ISO 22000 obejmują globalne uznanie, podejście do zarządzania oparte na ryzyku oraz zaangażowanie w ciągłe doskonalenie.

Na rysunku 5 przedstawiono kluczowe obszary normy ISO 22000.



Rys. 5. Kluczowe obszary normy ISO 22000

HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Point*), znany również jako Analiza Zagrożeń i Krytycznych Punktów Kontroli to systematyczna i proaktywna metoda zapewniania bezpieczeństwa żywności. Poszczególne postępowania zawarte w tym systemie dotyczą identyfikacji, oceny i zarządzania potencjalnymi zagrożeniami na różnych etapach procesu produkcji żywności. System kieruje się zasadami obejmującymi weryfikację zagrożeń, identyfikację krytycznych punktów kontroli (CCP, *Critical Control Point*), ustalanie limitów krytycznych, bieżący monitoring i kontrolę oraz prowadzenie szczegółowej dokumentacji. Kluczowe zalety HACCP skupiają się na bieżącym charakterze, globalnej akceptacji jako podstawowego wymogu bezpieczeństwa żywności oraz nacisku na ciągłe monitorowanie (Soman i Raman, 2016; Rosak-Szyrocka i Abbase, 2020; Awuchi, 2023).

Rysunek 6 prezentuje siedem głównych zasad HACCP.

Oprócz względów bezpieczeństwa, ważna jest również jakość. Żywność o najwyższych walorach nie tylko spełnia normy, ale także zachowuje swoje wartości odżywcze i posiada atrakcyjne cechy sensoryczne. Zachowanie składników odżywczych i poprawa właściwości organoleptycznych odgrywają kluczową rolę w promowaniu ogólnego stanu zdrowia i zaspokojeniu preferencji konsumentów. Konsekwentne dostarczanie żywności wysokiej jakości buduje zaufanie wśród klientów, wzmacniając w ten sposób lojalność wobec marki i reputację przedsiębiorstwa. W dobie postępu technologicznego i wzmoczonych globalnych powiązań zaangażowanie w zapewnienie zarówno bezpieczeństwa, jak i właściwości fizykochemicznych, z uwzględnieniem wartości odżywczych jest zbiorową odpowiedzialnością dzieloną w całym łańcuchu dostaw (Balon i in., 2016; Brečić i in., 2017; Nagyová i in., 2019).



*Rys. 6. Zasady systemu HACCP*

Podsumowując, wspólny wysiłek producentów, organów regulacyjnych i konsumentów jest niezbędny do utrzymania standardów gwarantujących ogólną wysoką jakość żywności spożywanej przez ludzi. Zaangażowanie to zapewnia bezpieczniejszą przyszłość w obliczu wyzwań stale zmieniającego się globalnego krajobrazu żywnościowego.

#### **4. ZARYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE STOSOWANIA KONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOSCI**

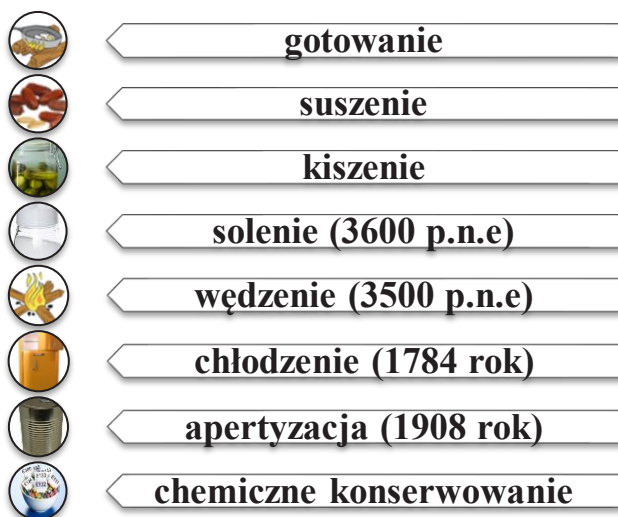
Podstawową funkcją jedzenia jest żywienie organizmu i zapewnienie mu odpowiednich ilości składników odżywczych, aby mógł nie tylko przetrwać, ale również funkcjonować i rozwijać się. Jedzenie określane jest mianem potrzeby niższego rzędu, co oznacza, że należy jeść aby żyć.

W czasach prehistorycznych zdobywanie jedzenia nie było sprawą prostą. Trudność polegała na znalezieniu oraz zebraniu korzeni i jagód lub polowaniu (najczęściej na mamuta). Ludzie odczuwali potrzebę przechowywania i konserwowania żywności, co ułatwiało im przetrwanie w okresie niedoboru świeżej. Ponadto możliwość przetwarzania wyrobów uwalniała człowieka od ciągłego poszukiwania pożywienia. Większość metod konserwacji żywności została zapoczątkowana przypadkowo, jednak z czasem udoskonalana i wraz z doświadczeniem przekazywana z pokolenia na pokolenie. Różne kultury, w różnych czasach i miejscach, stosowały tradycyjne techniki utrwalania produktów spożywczych, a część z nich jest nadal używana w wielu częściach świata.

Ponieważ procesy, które zachodzą w żywności podczas przechowywania obniżają jej jakość oraz wartości odżywcze i technologiczne, konserwowanie pozostaje dziś równie konieczne, jak w przeszłości. W większości krajów produkcja ma charakter sezonowy, co sprawia, że wiele surowców jest dostępnych tylko przez krótkie okresy w roku. W tym czasie wytwarza się większą ilość produktów, niż rynek jest w stanie wchłonąć, dlatego nadwyżki wielu z nich muszą zostać przetworzone w bardziej stabilną formę. Pozwala to uniknąć marnowania żywności oraz utraty dochodów producentów i przedsiębiorców. Zatem główny nacisk w przetwarzaniu żywności kładzie się na konserwację lub przedłużanie okresu przydatności do spożycia poprzez zapobieganie niepożądanym zmianom w wartości odżywczej i sensorycznej, kontrolując aktywność chemiczną, biochemiczną, fizjologiczną i mikrobiologiczną (Krzywinski i Tokarczyk, 2013; Joardder, i in., 2019; Aydin i Yildirim, 2021).

Metody przetwarzania i konserwacji żywności można podzielić na kilka kategorii, w tym między innymi suszenie, solenie, wędzenie i kiszenie (rys. 7). Każda z nich ma swoje unikalne zalety i przyczynia się do zapewnienia bezpiecznej, pożywnej i aromatycznej żywności przez dłuższy czas.

Początki gotowania sięgają czasów, gdy człowiek nauczył się kontrolować ogień. Istnieją dowody na to, że prehistoryczni ludzie zaczęli gotować mięso i stopniowo inne rodzaje żywności. Techniki gotowania znacznie się rozwinęły wraz z wynalezieniem ceramiki do gotowania wody. Większość praktykowanego obecnie gotowania wykorzystuje ciepło z wrzącej wody, a nie z bezpośredniego płomienia. Podczas tego procesu białka zawarte w potrawie ścinają się, skrobia zaś rozkleja, co powoduje, że składniki te stają się przyswajalne przez układ pokarmowy człowieka. Stosunkowo niska temperatura tego procesu, nieprzekraczająca stu stopni Celsjusza, sprawia iż w potrawie nie powstają szkodliwe dla zdrowia produkty rozkładu składników pokarmowych.



Rys. 7. Tradycyjne metody konserwacji żywności

Suszenie to jedna z najstarszych metod utrwalania, która polega na usunięciu wody z żywności, co hamuje rozwój bakterii i innych mikroorganizmów powodujących psucie. Suszenie można osiągnąć kilkoma technikami, w tym suszeniem na słońcu, suszeniem w piekarniku/suszarce z obiegiem powietrza lub poprzez odwodnienie. Suszona żywność nie traci wartości odżywczych i ma wydłużony okres przydatności do spożycia.

Kiszenie to proces wykorzystujący mikroorganizmy, takie jak bakterie lub drożdże, do rozkładu cukrów w żywności. W efekcie tym powstaje kwas mlekowy, który hamuje rozwój szkodliwych mikroorganizmów i wydłuża okres przydatności do spożycia artykułów spożywczych. Fermentowana żywność jest również bogata w probiotyki, które korzystnie wpływają na zdrowie jelit.

Solenie to kolejna tradycyjna metoda konserwacji żywności stosowana od wieków. Sól działa jako środek konserwujący, hamując rozwój bakterii i zapobiegając psuciu się. Wzmacnia również naturalny aromat produktów i poprawia ich smak.

Wędzenie polega na wystawianiu żywności na działanie dymu pochodzącego ze spalania drewna lub innych materiałów. Dym pomaga konserwować produkty, hamując rozwój niepożądanych drobnoustrojów. Ten sposób utrwalania poprawia także smak potraw i nadaje im niepowtarzalny wędzony zapach, pochodzący ze składników dymu otrzymanego ze spalania trocin z odpowiednich gatunków drewna, na przykład olchy czy buka.

Podczas chłodzenia zachodzi proces wymiany ciepła pomiędzy produktami, a środkiem chłodzącym. Stosowanie temperatur w granicach od 0°C do +10°C, umożliwia przedłużenie okresu przydatności do spożycia produktów mniej trwałych-do kilku dni, i bardziej trwałych – do kilku tygodni. Chłodzenie pozwala na eliminację tylko niewielkiej liczby drobnoustrojów, a te które przeżyją mogą rozwijać się w konserwowanej tym sposobem żywności po jej ogrzaniu. Natomiast mrożenie prowadzone od 0 do -30°C powoduje śmierć

większej liczby komórek drobnoustrojów, wskutek wzrostu kryształów lodu, a także zwolnienie przebiegu reakcji chemicznych, głównie utleniania.

Rodzaj sterylizacji, która polega na utrwalaniu żywności w hermetycznie zamkniętych opakowaniach w autoklawach to apertyzacja. Dzięki zastosowaniu procesów podgrzewania i odpowietrzania następuje całkowite (lub częściowe) zniszczenie mikroflory znajdującej się wewnątrz danego naczynia. Tym samym niemożliwy jest dalszy rozwój bakterii odpowiedzialnych za psucie się jedzenia. Konserwy poddane procesowi apertyzacji w temperaturze powyżej 100°C zazwyczaj w przedziale od 110 do 120°C w okresie od kilkunastu minut do nawet kilkunastu godzin można przechowywać przez długi czas i stanowią one wygodne źródło pożywienia (Żywica i in., 2017; Amit i in., 2017; Sharif i in., 2017; Augusto i in., 2018; Ariyamuthu i in., 2022).

Należy wspomnieć, że w dzisiejszych czasach stosowanie konserwantów jako dodatku do żywności stało się nieodzowne w procesie produkcyjnym spożywanej żywności. Pomimo wielu wątpliwości dotyczących ich bezpieczeństwa, rosnące zapotrzebowanie na większy wybór, łatwość i wygodę spożywania oraz wysokie standardy bezpieczeństwa sprawiają, że są one istotnym elementem systemów żywnościowych. Konserwanty stosowane obecnie w produkcji żywności są pozyskiwane ze źródeł naturalnych lub wytwarzane syntetycznie. Na przykład natamycyna (E235), która jest wykorzystywana w obróbce powierzchniowej sera i kiełbas, może być pozyskiwana w sposób naturalny z bakterii powszechnie występujących w glebie. Źródłem naturalnych konserwantów mogą być rośliny, zwierzęta, grzyby i algi. Kwas wanilinowy, monochlorooctowy, dehydrooctowy, propionowy, sorbinowy i glikole należą do związków organicznych stosowanych jako środki konserwujące. Syntetyczny konserwant, taki jak benzoosan sodu (E 211), w odpowiednim otoczeniu chemicznym (pH kwasowym) również przeciwdziała rozwojowi drobnoustrojów, jakimi są bakterie i pleśnie. Najczęściej stosuje się go przy produkcji słodzonych napojów kolorowych, majonezu, ketchupu, sosów, przecierów owocowych czy dżemów. Azotyn sodu (E250) jest również syntetycznie pozyskiwanym konserwantem, używanym powszechnie jako składnik mieszanki peklującej do mięs. Zaś dwutlenek siarki i siarczyny służą odpowiednio do konserwowania owoców i warzyw oraz win. Podobnie jak w przypadku większości innych środków konserwujących, należy zachować szczególną ostrożność, aby utrzymać niskie stężenia tych substancji i uniknąć niekorzystnych efektów smakowo-zapachowych (Pawlikowska i Kręgiel, 2018; Ochwanowska i in., 2019).

Generalnie tradycyjne metody przetwarzania i konserwacji żywności są niezbędne do utrzymania bezpiecznych, pożywnych i aromatycznych dostaw żywności. Jedną z głównych ich zalet jest to, że są naturalną formą obróbki nie wymagającą stosowania chemicznych konserwantów. Dzięki temu są zdrowszą i naturalną alternatywą dla nowoczesnej żywności przetworzonej. Stanowią ważną część wielu tradycyjnych kuchni, a także pomagają zachować dziedzictwo kulturowe i zapewniają nawiązanie do przeszłości. Ponieważ w dalszym ciągu zachowanie bezpieczeństwa żywności zgodnego ze zrównoważonym rozwojem jest wyzwaniem, tradycyjne metody przetwarzania i konserwacji zarówno produktów pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego pozostają istotnym elementem systemu żywnościowego.





## **5. WPROWADZENIE DO NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA**

Cechą wartościującą bezpieczną żywność jest jej wysoka jakość. Istnieje wiele definicji jakości żywności, lecz najogólniej można stwierdzić, że pod tym pojęciem rozumie się pozytywną kombinację wartości odżywczej i atrakcyjności sensorycznej przy uwzględnieniu bezpieczeństwa określonego produktu spożywczego.

Konwencjonalne procesy utrwalania żywności wystawiają ją często na działanie bardzo wysokiej temperatury, co niewątpliwie zmniejsza zanieczyszczenie lub obciążenie mikrobiologiczne, ale powoduje także pewne niepożądane zmiany w żywności, takie jak utrata składników odżywczych wrażliwych na temperaturę, zmianę tekstury czy właściwości organoleptycznych. Niekiedy techniki termiczne przyczyniają się do powstawania w żywności substancji toksycznych, które są rakotwórcze i szkodzą organizmowi ludzkiemu. Gotowanie w kuchence mikrofalowej i smażenie w głębokim tłuszczu skutkuje tworzeniem heterocyklicznych amin aromatycznych, które mogą nawet powodować zmiany mutagenne w organizmie. Obróbka termiczna może również skutkować utratą wody z pożywienia, utlenianiem lipidów i zmianą w składzie kwasów tłuszczowych. Grillowanie mięsa powoduje utratę soków mięsnych, które zawierają głównie lipidy nasycone (magazynowane w organizmie postaci tkanki tłuszczowej), co prowadzi do zmniejszenia zawartości kwasów tłuszczowych nasyconych i wzrostu zawartości kwasów tłuszczowych wielonienasyconych w produkcie końcowym. Obecność wielonienasyconych kwasów tłuszczowych sprawia, że wyrób jest bardziej podatny na utlenianie, a także mniej przyjemny w smaku czy zapachu (Lee i in., 2016; Augusto i in., 2018; Wu i in., 2020).

Wszystkie te negatywne czynniki skłoniły specjalistów ds. żywności aby poszukiwali lepszych alternatyw. Oprócz tego, w zglobalizowanym środowisku charakteryzującym się wysoką konkurencją we wszystkich sektorach, a w szczególności przemyśle rolno-spożywczym innowacje stanowią ważne źródło umożliwiające utrzymanie i zwiększanie przewagi w skali globalnej. Ponadto zmiany w stylu życia i większa świadomość konsumentów w zakresie ochrony środowiska i poszanowania praw człowieka drastycznie zmodyfikowały wymagania społeczeństw, sprawiając, że innowacje w zakresie zrównoważonych produktów stają się coraz bardziej istotne dla firm rolno-spożywczych. W rezultacie rozwój zrównoważonych linii produktów (np. organicznych, bio, funkcjonalnych) dla szerokiej gamy towarów (takich jak herbata, kawa, soja, owoce i warzywa, soki, mleko, mięso itp.) w ostatnich latach uległ wzmocnieniu. Wybuch pandemii COVID-19 na początku 2020 roku w sposób istotny zmienił również uwarunkowania rozwoju wymiany handlowej wyrobami rolno-spożywczymi. Żywność stała się produktem pierwszej potrzeby, tak jak leki czy suplementy diety. Wciąż nie bez znaczenia jest fakt, iż ludność świata boryka się z różnymi problemami, a jednym z nich jest brak żywności. Często pod wpływem czynników fizykochemicznych lub biologicznych dochodzi do psucia się artykułów spożywczych na wielu etapach łańcucha, a także ich braku lub mniejszej dostępności w różnych miejscach i poza sezonem. Z powodu wahań temperatury podczas transportu, nieracjonalnego zarządzania, źle dobranej technologii i infrastruktury, niewłaściwie przeprowadzonego procesu utrwalania, następuje ogromna strata jakościowa i ilościowa, a produkty nie mogą odpowiednio dotrzeć do konsumenta (Amit i in., 2017; Petrescu i in., 2020; Bhat, 2021; Chitrakar i in., 2021; Burlacu i in., 2022).

W rezultacie te wszystkie wydarzenia, zachęcają do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań, które są odpowiedzią na obecne dylematy i przyszłe wyzwania. Nowatorskie technologie nietermicznego przetwarzania i konserwacji odgrywają kluczową rolę w minimalizowaniu problemów. Stanowią one alternatywę dla tradycyjnych technik termicznych (pasteryzacji, sterylizacji), które chociaż pozostają podstawowymi metodami utrwalania w przemyśle spożywczym, mogą wpływać na wygląd, smak, wartość odżywczą żywności i niekoniecznie spełniać zapotrzebowanie współczesnego społeczeństwa. Konsumentci oczekują bowiem świeżych i wygodnych produktów spożywczych o najwyższej wartości żywieniowej, a dodatkowo o określonych właściwościach prozdrowotnych.

W technologiach nietermicznych wykorzystywane są nietradycyjne formy energii, między innymi podwyższone ciśnienie, pole elektryczne, zimna plazma, jako czynniki umożliwiające inaktywację patogenów przenoszonych przez żywność i organizmów powodujących psucie się, jednocześnie zmniejszając ekspozycję termiczną produktu. Żywność jest przetwarzana w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej, więc nie następuje uszkodzenie wrażliwych na ciepło składników odżywczych. Różne intensywności tych form energii i ich selektywne połączenia są unikalne, ponieważ sprawiają, że artykuły dłużej zachowują większość substancji aktywnych biologicznie. Technologie nietermiczne są ekologiczne, bezpieczne i przyjazne dla środowiska, stąd też istnieje duże pole do ich zastosowania w produkcji żywności zgodnej z Agendą 2030 i Celami Zrównoważonego Rozwoju. Aby jednak efektywnie zastosować te innowacyjne techniki utrwalania należy kontrolować parametry procesów (ciśnienie, natężenie ultradźwięków, system dystrybucji gazu procesowego, czas obróbki), które mają znaczący wpływ na jakość finalnie przetworzonych wyrobów (Picart-Palmade i in., 2019; Chakka i in., 2021; Galanakis, 2021).

## 6. WYBRANE INNOWACYJNE SPOSOBY PRZEDŁUŻANIA TRWAŁOŚCI PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH

Konsumenci coraz bardziej preferują żywność naturalną i świeżą, wygodną, zdrową, smaczną, bezpieczną mikrobiologicznie, wolną od konserwantów i dodatków z czystą etykietą i wydłużonym terminem przydatności do spożycia. Aby produkt zachował pożądaną jakość, należy go poddać obróbce, zatrzymując fizjologiczne starzenie się i zmiany enzymatyczne oraz rozwój mikroorganizmów.

Tradycyjnie techniki przetwarzania stosowane w przemyśle spożywczym mogą powodować niekorzystne zmiany zapachu, barwy czy smaku. W niektórych produktach wysoka termotolerancja mikroorganizmów, głównie zarodników bakterii pociąga za sobą stosowanie ekstremalnych obróbek cieplnych, które zmieniają właściwości odżywcze, fitochemiczne i organoleptyczne żywności (Daher i in., 2017; Dwivedi i in., 2017; Knorr i Augustin, 2021).

Pomimo szerokiej wiedzy na temat utrwalania artykułów rolno-spożywczych poprzez użycie wysokich temperatur i ciągłych prób poprawy jakości przetworzonej żywności, w dalszym ciągu istnieje zapotrzebowanie na technologie minimalizujące destrukcyjny wpływ ciepła na cenne składniki żywności. Coraz większe zainteresowanie środowiska naukowego i przemysłu poświęca się wdrażaniu niekonwencjonalnych metod konserwacji żywności, takich jak: ozonowanie, obróbka wysokociśnieniowa, pulsacyjne pole elektryczne czy zimna plazma.

Ich użycie daje szansę na spełnienie trendu w kierunku koncepcji zrównoważonego rozwoju, oferującej korzyści w postaci krótkiego czasu obróbki, nietermicznych, opłacalnych operacji, nietoksycznych efektów, zmniejszonego zużycia wody i możliwości zwiększania skali procesów. Generalnie wprowadzanie unowocześnień produktowych czy procesowych na rynek to wynik zmieniających się trendów rynkowych oraz wymagań i preferencji klientów. Stąd też, nowe technologie, muszą zdobyć zaufanie konsumentów, aby ich finalna realizacja komercyjna była możliwa i opłacalna (Chemat i in., 2017; Martindale, 2017).

### 6.1. Pole elektryczne – pulsacyjne pole elektryczne (PEF)

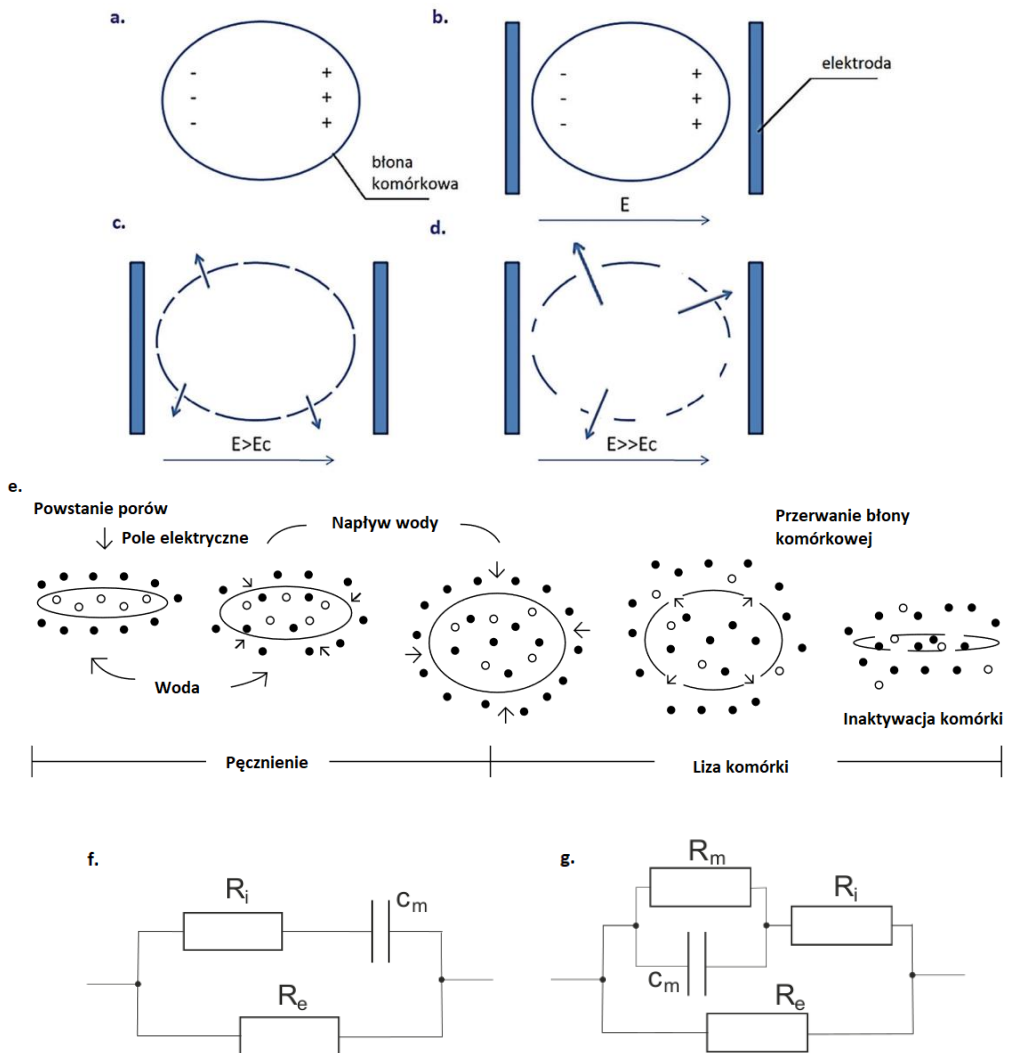
Historia prób zastosowania prądu elektrycznego do obróbki żywności liczy ponad 100 lat. „ElectroPure Process” z 1920 roku polegał na wykorzystaniu prądu zmiennego o niskiej częstotliwości do pasteryzacji mleka (Anderson i Finkelstein, 1919). W latach 60. tego ubiegłego wieku wpływem pola elektrycznego na materiał biologiczny, w tym na żywność zainteresowało się wiele grup badawczych (Stampfli, 1958; Doevenspeck, 1960; Lazarenko i Reshetko, 1968; Sitzmann i in., 2016). Od ponad dwu dekad rozwiązania technologiczne oparte o zastosowanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF- *Pulsed Electric Field*) na stałe zagościły w przemyśle spożywczym i stosowane są między innymi do inaktywacji mikroorganizmów i wydłużenia przydatności do spożycia, ekstrakcji, tłoczenia, odwadniania osmotycznego, suszenia i zamrażania, kontroli aktywności enzymatycznej, i tym podobne (Toepfl i in., 2006).

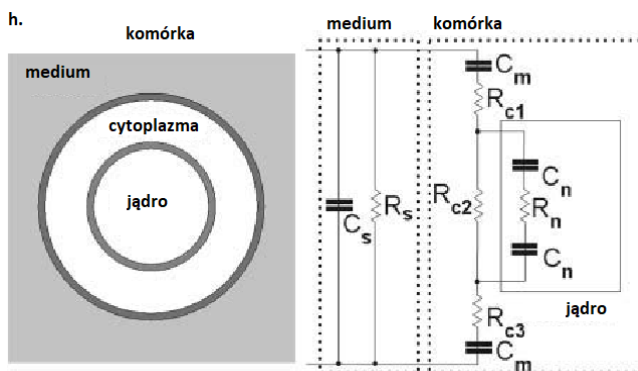
W przypadku komórek biologicznych, można założyć, że stanowią one kondensator o niskiej wartości stałej dielektrycznej. Cytoplazma zawarta w komórkach jest przewodnikiem elektrycznym, otoczonym cienką warstwą dielektryka w postaci błony komórkowej. Jeśli komórka zostanie umieszczona w polu elektrycznym (w ośrodku przewodzącym między dwoma elektrodami) i zadany zostanie impuls napięciowy jednopolarny do elektrod – powstanie ruch jonów zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola – zarówno wewnątrz komórki, jak i na zewnątrz. Co za tym idzie, po obu stronach błony komórkowej zaczną gromadzić się wolne, przeciwnie naładowane ładunki elektryczne powodując napięcie transbłonowe prowadzące do lokalnych zmian ciśnienia i grubości błony. Przy jego odpowiedniej wysokości przekraczającej wartość krytyczną (~0,5 - 1V) może dojść do zmiany układu cząsteczek fosfolipidów i w efekcie do modyfikacji struktury błony komórkowej, zmian jej ciągłości, powstania lub powiększenia się już istniejących porów, co prowadzi do zwiększenia przepuszczalności i do utraty jej funkcji barierowej (Zimmerman, 1986; Weaver, 1995; Deng i in., 2003; Ngadi i in., 2003, Frey i in., 2013, Wiktor i Witrowa-Rajchert, 2012). Proces ten nazywany jest elektroporacją (elektroporabilizacją, elektroprzepuszczalnością), zaś jego przebieg schematycznie zobrazowano na rysunku 8.

Kluczowymi parametrami mającymi wpływ na przebieg obróbki materiału biologicznego przy użyciu PEF oraz na odwracalności elektroporacji są:

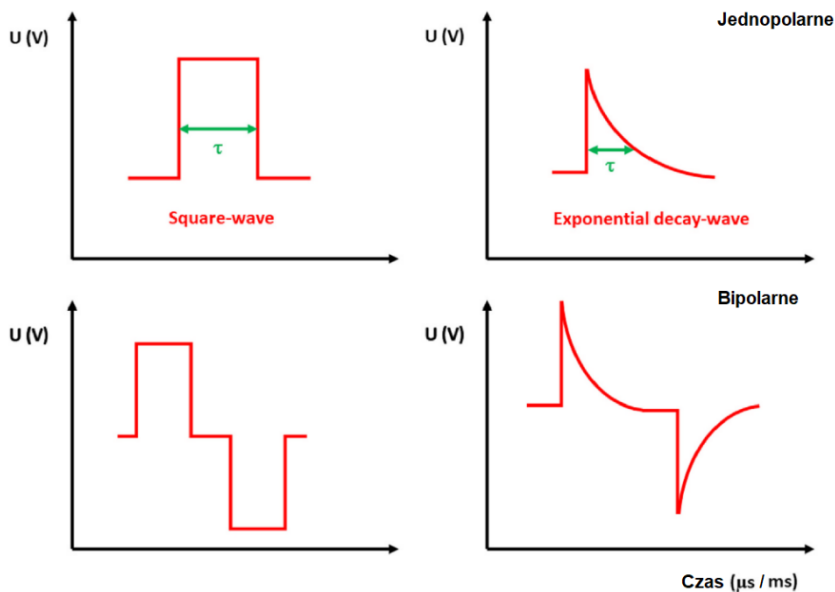
- natężenie pola elektrycznego,
- liczba zastosowanych impulsów
- czas trwania impulsu i ekspozycji próbki,
- kształt impulsu (rys. 9),
- energia dostarczona do obrabianego materiału,
- właściwości fizykochemiczne obrabianego materiału,
- przewodność i skład ośrodka (elektrolitu)
- geometria reaktora (odległość pomiędzy elektrodami, wielkość komory/kanalu)
- sposób obróbki (stacjonarny/w przepływie)
- temperatura otoczenia.

W zależności od celu obróbki PEF odpowiednio dobierane są parametry procesu. Przekroczenie pewnej krytycznej wartości potencjału błony komórkowej (około 1V) podczas tego typu traktowania może powodować trwałe uszkodzenie i utratę ciągłości błony komórkowej, wypływ materii wewnątrzkomórkowej do ośrodka, czyli nieodwracalne skutki prowadzące do śmierci komórkowej. Zwykle proces taki stosowany jest w przypadku dekontaminacji mikrobiologicznej, ekstrakcji cennych z punktu widzenia przemysłu substancji chemicznych czy ablacji guzów nowotworowych. W przypadku podkrytycznych wartości natężenia pola elektrycznego i ograniczonego czasu trwania impulsu zwiększona przepuszczalność błony może być odwracalna, a komórka przetrwa. Ten efekt jest często wykorzystywany w zastosowaniach biomedycznych (w elektrochemioterapii, używaniu wektorów chemicznych i wirusowych podczas modyfikacji genetycznych) (Deng i in., 2003, Aycock i Davalos, 2019; Dev i in., 2000; Brooks i in., 2022).





Rys. 8. Zobrazowanie wpływu pola elektrycznego na komórki ( $E$  - natężenie pola elektrycznego,  $E_c$  - krytyczne natężenie pola elektrycznego) (a-e); uproszczone elektryczne schematy zastępcze komórki (f-g); Przekrój poprzeczny znajdującej się w danym ośrodku kulistej komórki z jądrem umieszczonym centralnie wraz ze schematem zastępczym  $C_m$  - kondensatory reprezentujące zewnętrzną błonę komórkową;  $C_n$  - błonę jądrową,  $R_{c1-3}$  - rezystory reprezentujące cytoplazmę; oraz  $R_n$ -nukleoplazmę,  $C_s$  i  $R_s$  reprezentują pojemność i opór ośrodka (h) (Tsong, 1990; Foster, 2000; Deng i in., 2003; Vega-Mercado i in., 2007; Wiktor i Witrowa- Rajchert, 2012; Zelmat i in., 2017; Skowron i Wantuch, 2020)



Rys. 9. Najczęściej stosowane kształty impulsów podczas obróbki PEF w mleku i przetworach mlecznych (Cavalcanti i in., 2023)

Nieodwracalna elektroporacja zachodzi gdy powodujące ją krytyczne natężenie pola elektrycznego  $E_c$  wyniesie (Zimmerman i in., 1974; Zimmerman, 1986; Schoenbach i in., 1997):

$$E_c = \frac{V_c}{f_{kom} r_{kom}} \text{ (kV/cm)}$$

gdzie:

- $V_c$  – napięcie krytyczne, (V)
- $f_{kom}$  – współczynnik kształtu komórki, (-)
- $r_{kom}$  – promień komórki, ( $\mu\text{m}$ )

W przypadku komórek sferycznych/kulistych  $f_{kom}$  wynosi 1,5 zaś dla komórek wydłużonych obliczany jest on z następującego wzoru:

$$f_{kom} = l_{kom} \left( l_{kom} - \frac{d_{kom}}{3} \right) \text{ (-)}$$

gdzie:

- $l_{kom}$  – długość komórki, (m)
- $d_{kom}$  – średnica komórki, (m)

Przyjmując wartość krytycznego napięcia na błonie komórkowej w wysokości 1V, dla komórek prokariotycznych o wymiarach 1- 10  $\mu\text{m}$  krytyczne natężenie pola elektrycznego  $E_c$  wyniesie około 12-50 kV/cm dla impulsów o czasie trwania od kilkunastu mikrosekund do milisekund. Większe komórki eukariotów o wymiarach 10 do 40  $\mu\text{m}$  są znacznie bardziej podatne na pola elektryczne w porównaniu do bakterii (Huelsheger i in., 1981; Fellows, 2000; Oziembłowski i in., 2016; Skowron i Wantuch, 2020). Dla komórek roślinnych o rozmiarach 40 – 200  $\mu\text{m}$  wartość natężenia krytycznego wynosi 1- 3 kV/cm. Uproszczone elektryczne schematy zastępcze komórki przedstawiono na rysunku 8. W celu porównania różnych geometrii i reżimów układu PEF można obliczyć parametr  $PPV$  odzwierciedlający liczbę impulsów na jednostkę objętości:

$$PPV = \frac{nfV}{v}$$

gdzie:

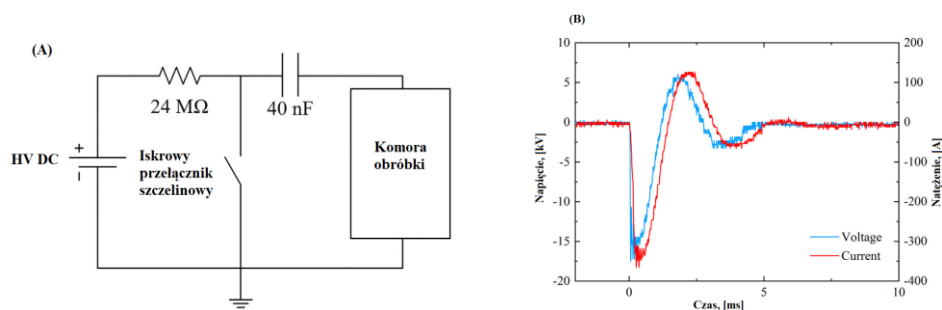
- $n$  – liczba komór oddziaływań PEF,
- $f$  – częstotliwość impulsów PEF, (Hz)
- $V$  – objętość komory oddziaływań, (ml)
- $v$  – przepływ produktu, (ml/s)

Zazwyczaj stosowane są częstotliwości do 1 kHz, w niektórych przypadkach jednak są one wyższe. W celu obróbki PEF wykorzystywane są różne rozwiązania konstrukcyjne, takie jak: elektroplazmolizery zbudowane w oparciu o generatory pulsacyjnych pól elektrycznych wraz z baterią kondensatorów, układem elektrod w komorze reakcyjnej/kanale, elementami opomiarowania i kontroli procesu (jednostka sterująca, oscyloskop, sondy prądowo-napięciowe, kontrolery przepływu, termopary, itp.) (Ngadi i in., 2003).



W związku z wieloletnią obecnością technologii PEF na rynku w dalszej części podane zostaną przykłady nowych kierunków badań z wykorzystaniem PEF z ostatnich lat.

Qin i in. (2023) badali wpływ różnych parametrów PEF posługując się układem schematycznie zaprezentowanym na rysunku 10 na kiełkowanie zarodników *Aspergillus niger*, wytwarzającego szereg istotnych gospodarczo enzymów np. glukoamylazę, lipazę, pektynazę, oksydazę glukozową i biorącego udział w produkcji kwasu cytrynowego i glukonowego. Dla próbki zawierającej  $3,5 \times 10^6$  jtk/ml, pole elektryczne o natężeniu od 5 do 15 kV/cm aplikowane przez 1 - 7,5 ms powodowało zwiększenie szybkości kiełkowania oraz aktywności lipazy i glukoamylazy. W przypadku 10 kV/cm natężenia pola elektrycznego i 5 ms aplikacji uzyskano wzrost powyższych parametrów o odpowiednio 217%, 25,6% i 31,3%. Pole elektryczne o maksymalnym natężeniu 20 kV/cm spowodowało wzrost temperatury próbki średnio o 5,9°C w czasie 10 ms aplikacji.



Rys. 10. Schemat obwodu układu generującego PEF (A), wykres przebiegu napięcia i prądu podczas eksperymentu z systemem PEF (B) (Qin i in., 2023)

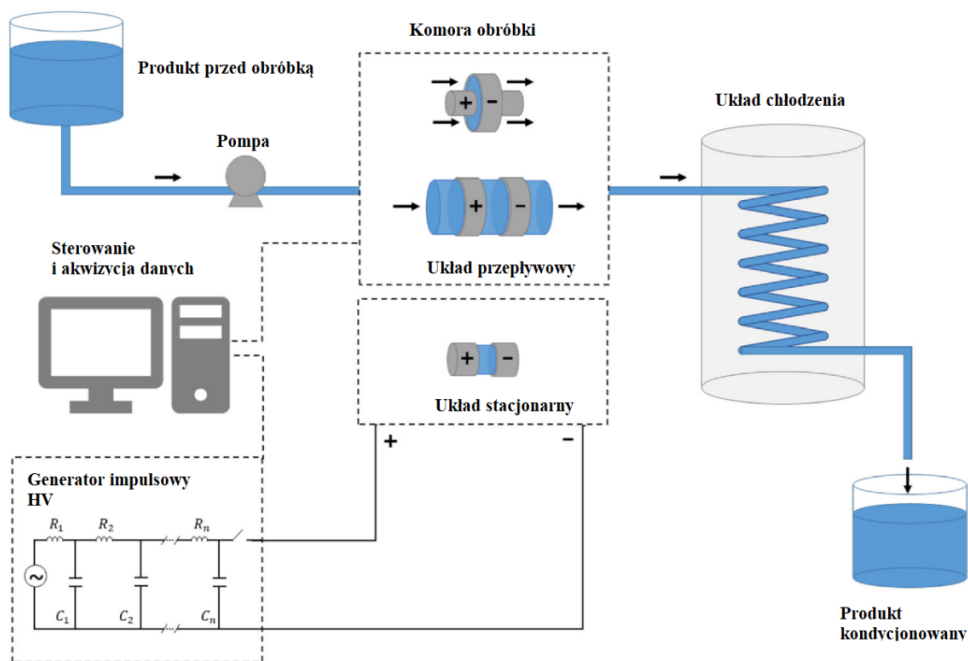
Obróbka produktów mlecznych była jednym z pierwszych historycznych zastosowań PEF w sektorze żywnościowym. Cavalcanti i in. (2023) przeprowadzili krytyczną analizę dotychczas prowadzonych prac w celu dalszego udoskonalenia tej technologii. Podstawowy schemat układu do obróbki materiałów płynnych przedstawiono na rysunku 11.

Morais i in. (2023) użyli PEF o natężeniu 16 kV/cm przez 6 lub 31  $\mu$ s w temperaturze 4°C i 23°C w celu modyfikacji struktury kazein w izolacie micelarnym kazeiny uzyskując istotne zmiany w strukturze (reorganizację miceli) w zależności od zastosowanych parametrów, co zwiększyło wartość odżywczą i możliwość pozyskania bioaktywnych peptydów.

Zastosowana obróbka poprawiła również właściwości emulgujące wysoko stabilnych białek-koniugatów albuminy surowicy bydlęcej/glukozy poprzez przyspieszenie reakcji glikacji podczas ogrzewania do 90°C, przy zmniejszonych brunatnieniu i zawartości wolnych związków tiolowych (Xu i in., 2024).

Yao i in. (2023) badała wpływ odpowiednio stałoprądowego (CC-T) oraz stałonapięciowego (CV-T) pulsacyjnego pola elektrycznego na charakterystyki elektryczne, rozkład temperatury i jakość mięśnia najdłuższego grzbietu świń w aspekcie rozmrażania powietrzem (AT) i rozmrażania w zanurzeniu w wodzie (WT) używając świeżego mięsa (FM) w charakterze kontroli. Wyższa częstotliwość sprzyjała obniżeniu impedancji i przyspieszeniu rozmrażania. PEF skrócił czas rozmrażania o max. 85%. Bardziej jednorodny roz-

kład temperatury, istotne ograniczenie migracji wody, uszkodzeń mięśni, utleniania białek i tłuszczów w trakcie procesu, wiązań krzyżowych, agregacji i sedymentacji białek miofibrilli przy jednoczesnym zachowaniu barwy, zdolności zatrzymywania wody i właściwości teksturalnych mięśni uzyskano stosując CC-T PEF. Co ważne, metoda nie miała istotnego wpływu na straty w procesie gotowania.



Rys. 11. Schemat układu przepływowego i stacjonarnego wykorzystującego PEF

(Cavalcanti i in., 2023)

Wstępną obróbkę pulsacyjnym polem elektrycznym w charakterze wspomagającej fazy przy suszeniu świerszczy domowych w temperaturze 60°C w celu pozyskania z nich mączki zastosowali (Psarianos i in., 2023). PEF pozwolił na skrócenie czasu suszenia i zmniejszenie zużycia energii o 14,22%. Skojarzenie obróbki elektrohydrodynamicznej (EHD) oraz konwencjonalnego suszenia zredukowało nakłady energetyczne o ponad 50%. W porównaniu do próbki kontrolnej, PEF zwiększyło rozpuszczalność białka oraz aktywność przeciwutleniającą o odpowiednio 53,07% i 24,05% dla próbek suszonych w piekarniku oraz zmniejszyło zawartość histaminy w próbkach suszonych metodą EHD (o 25,87%).

Badania nad dekontaminacją mikrobiologiczną wody kokosowej przy użyciu PEF o natężeniu 22,5 kV/cm przy gęstości energii 119 kJ/l, połączonego z łagodnym ogrzewaniem do 40°C prowadzili Tongdonyod i in. (2023). Osiągnięto redukcję kolonii bakterii *Escherichia coli* K12 i *Listeria innocua* o odpowiednio 6,60 i 5,90 log jtk/ml spełniając założone

dla produktu wymagania stawiane przez normy (U.S. FDA). Otrzymane rezultaty były porównywalne do pasteryzacji termicznej ( $85\pm 2^{\circ}\text{C}$  przez 10 minut), co skutkowało przedłużeniem okresu przydatności do spożycia o ponad 35 dni w temperaturze  $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , przy jednoczesnym zachowaniu właściwości fizykochemicznych (szczególnie polifenoli i profilu związków lotnych), sensorycznych, podobnych do tych zaobserwowanych w próbce nieutrwalanej.

Zespół Morales'a (2023) zastosował PEF o umiarkowanym natężeniu (1-10 kV/cm, 30 jednopolarnych impulsów o długości 4  $\mu\text{s}$  i częstotliwości 0,1 Hz) do kondycjonowania napoju roślinnego na bazie mleka sojowego i soku z opuncji figowej. Przy niskich natężeniach pola (1 kV/cm) zaobserwowano wzrost stężenia związków fenolowych (16%), betalain (7,2%) i izoflawonów (7,4%) w stosunku do próbki kontrolnej. PEF o tych parametrach nie wpłynęło negatywnie na pozostałe atrybuty fizykochemiczne napoju.

PEF wykorzystano również do efektywnego odzyskiwania związków funkcjonalnych, poprawy kinetyki i selektywności ekstrakcji chlorofilu z mikroalg *Chlorella pyrenoidosa* (Katsimichas i in., 2024). Porównano efektywność ekstrakcji biomas alg: poddanej wstępnej obróbce PEF (4,6 kV/cm, 0–179,2 kJ/kg) oraz kontroli, które zostały zawieszone w roztworach etanolowych i inkubowane w temperaturze 30–60°C przez maksymalnie 6 godzin. Wyższe gęstości energii PEF prowadziły do większego odzysku barwników i przeciwutleniaczy (chlorofilu i luteiny).

Lin i in. (2024) zaproponowali obróbkę PEF o natężeniu 25, 50 i 100 kV/m w celu zbadania potencjału redukcji mięknięcia persymonów po zbiorze. Po 28 dniach zaobserwowano 87,6% utratę jędrności grupy kontrolnej w porównaniu do 58,40% przy zastosowaniu PEF o natężeniu 50 kV/m. PEF wpłynęło na zmniejszenie respiracji o 12,5–31,22 ml  $\text{CO}_2/\text{h/kg}$ , co zahamowało proces deterioracji teksturalnej owoców i wydłużyło ich okres przydatności do spożycia w temperaturze chłodniczej o nawet 14 dni w porównaniu z próbką nieobrabianą tym sposobem.

Z kolei Kim i in. (2023) analizowali wpływ PEF na marynaty solankowe (10 g/ml i 15 g/ml NaCl) na bazie kapusty pekińskiej przechowywanej w temperaturze 25°C przez 12 godzin. Stwierdzili, iż PEF skróciło czas marynowania, zmniejszyło straty wody i pomogło zoptymalizować zużycie soli, znacząco wpływając na kinetykę transferu masy oraz mikrostrukturę próbek. Co więcej, autorzy pracy zaobserwowali poprawę tekstury wyrobu, co umożliwiło uzyskanie lepszej jakości kimchi. PEF (1,5 kV/cm i 2,0 kV/cm) zastosowano również do kondycjonowania zasolonych kiszzonek z rzodkwi (Kim i in., 2023a) skracając czas potrzebny na ten proces o około 56,6% dla PEF 1,5 kV/cm i 70% dla PEF 2,0 kV/cm w porównaniu z kontrolą. PEF wpłynęło hamująco (o około 1-2 log CFU/ml w porównaniu z kontrolą) na tempo wzrostu bakterii kwasu mlekowego, skutkując wydłużeniem okresu przechowywania tak przygotowanych warzyw o 2-5 dni.

Skojarzona metoda z wykorzystaniem PEF (1,33 kV/cm, 100 Hz) i ogrzewania omowe go została zastosowana do poprawy szybkości i homogeniczności podgrzewu podczas blanszowania marchwi (Astráin-Redín i in., 2023).

Czas blanszowania został skrócony o 60% bez wpływu na teksturę marchwi przy wzroście (3,9%) biodostępności  $\beta$ -karotenu.

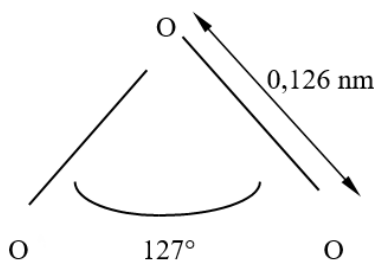
Shoqairan i in. (2023) porównywali skuteczność zastosowania PEF, mikrofal (MW) oraz promieniowania UV-C na poziom ochratoksyny A (zawartość początkowa 51,36  $\mu\text{g/kg}$ ) w sproszkowanej papryce. PEF, UV i MW wykazały detoksyfikację tego związku

odpowiednio o 42,31%, 39,19% i 37,05%. PEF poprawił także aktywność antyoksydacyjną, wykazał również mniejszy wpływ na parametry fizykochemiczne proszku paprykowego w porównaniu do kontroli i innych metod obróbki.

Podczas obróbki PEF w zależności od stosowanych parametrów może dojść do generowania reaktywnych form tlenu i azotu, co wielorako wpływa na obrabiany materiał (np. zwiększa efektywność dekontaminacji, wpływa na wartość odżywczą). PEF pozwala na stosunkowo szybką i elastyczną obróbkę żywności, zarówno w systemie stacjonarnym, jak i przepływowym. Technika ta uważana jest za jedną z bezpieczniejszych i łagodnych form utrwalania żywności. Wzrost temperatury próbki może być ograniczany dzięki sterowaniu parametrami procesu. Korzystnym skutkiem jest brak wymogu stosowania dodatkowych czynników chemicznych, co zapobiega zanieczyszczeniu próbki i sprzyja zachowaniu pierwotnych własności obrabianego materiału.

## 6.2. Ozonowanie

Ozon będący trójatomową, alotropową odmianą tlenu o gęstości  $2,14 \text{ kg/m}^3$  jest jednym z najpotężniejszych znanych utleniaczy i często stosowany jest jako dezynfektant. Został odkryty w 1839 roku przez Schoenbeina, a w 1953 roku grupa Trambarulo ustaliła geometrię cząsteczki zaś Tanaka i Morino (1970) zmierzili długość wiązań w cząsteczce ozonu. Podstawowa struktura molekuly ozonu jest przedstawiona na rysunku 12, zaś wybrane właściwości ozonu zestawiono w tabeli 2 i 3.



Rys. 12. Podstawowy model cząsteczki ozonu

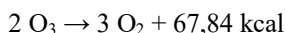
Tabela 1. Porównanie niektórych właściwości fizycznych ozonu i tlenu (Ozonek, 1993)

Parametr	Ozon	Tlen
Masa cząsteczkowa, (u)	48	32
Gęstość w temp.0°C, (kg/m <sup>3</sup> )	2,14	1,429
Gęstość w temp.~180°C, (kg/m <sup>3</sup> )	1,57	1,118
Temperatura zamarzania, (°C)	-192,8	-218,9
Temperatura wrzenia, (°C)	-111,9	-182,9
Barwa kondensatu	ciemnoniebieska	błękitna

Tabela 2. Barwa ozonu w zależności od fazy

Faza	Barwa
stała	czerwonopurpurowy
ciekła	ciemnoniebieski (nieprzezroczysty)
gazowa	błękitny (przezroczysty w cienkich warstwach)

Ozon w postaci gazowej jest niestabilny, a proces jego rozkładu przebiega bardzo szybko. Tempo procesu rozkładu wzrasta z rosnącym pH, temperaturą, obecnością zanieczyszczeń i stężeniem ozonu w roztworze. Ten proces jest znacznie wolniejszy w powietrzu niż w wodzie. Ozon degraduje w zależności od pH, pozostając dość stabilnym w pewnych warunkach przy pH 6 i natychmiastowym rozpadzie przy pH 10. Rozkład ozonu powoduje powstanie rodnika hydroksylowego, który jest jeszcze silniejszym czynnikiem utleniającym niż sam ozon (potencjał utleniający 2,80V w porównaniu do 2,07V) (Nalepa, 1997). Czysty ozon (bez zanieczyszczeń organicznych) podczas spalania (niebieski kolor płomienia) prowadzi do powstania czystego tlenu molekularnego, zgodnie z poniższą reakcją.



Ozon w stanie gazowym jest tylko częściowo rozpuszczalny w wodzie (do dziesięciu razy lepiej niż tlen). Rozpuszczalność ozonu w wodzie związana jest z ilością ozonu w strumieniu nośnym gazu. Dlatego ważne jest wytworzenie strumienia gazu zawierającego stosunkowo dużą ilość ozonu. Na przykład maksymalne rozpuszczalności przy 25°C dla strumieni gazowych zawierających 1% i 3% ozonu wynoszą odpowiednio 2,7 i 8,1 mg/dm<sup>3</sup>. Te maksymalne poziomy nie są osiągnięte w praktyce z powodu opuszczających układ gazów nośnych, które usuwają część rozpuszczonego ozonu. Rozpuszczalność ozonu maleje również wraz ze wzrostem temperatury (rys. 13) (Nalepa, 1997). Maksymalne teoretyczne stężenie ozonu w wodzie jest określane wzorem:

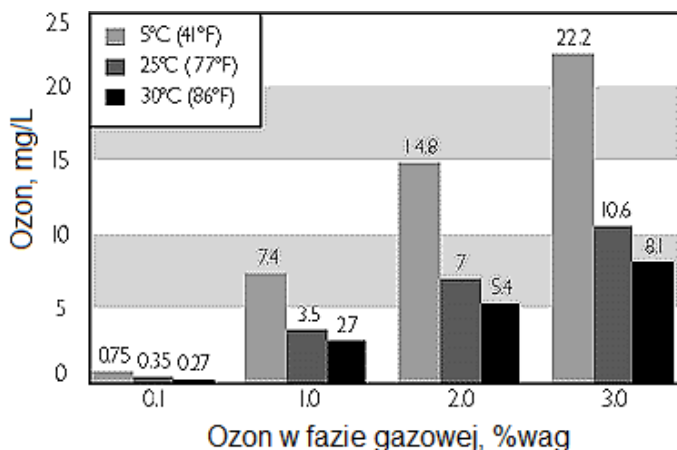
$$C_{nt} = \frac{D_1 R_z 100}{R_z + Q_0}, (\%)$$

gdzie:

- $D_1$  – dawka ozonu
- $Q_0$  – objętość gazu wprowadzonego do 1 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O
- $R_z$  – współczynnik rozpuszczalności

W warunkach normalnych przy niskich stężeniach (do 0,04 ppm) zapach ozonu kojarzy się ze świeżością, w wyższych stężeniach staje się on dość charakterystyczny i ostry (Ozonek, 1993). Wysokie stężenie ozonu troposferycznego (powyżej 0,1 mg/m<sup>3</sup>) jest bardzo niebezpieczne i mutagenne dla ludzi, zwierząt, roślin oraz powoduje korozję. Podwyższone stężenie ozonu w powietrzu może powodować senność, bóle głowy i znużenie oraz spadek ciśnienia tętniczego krwi; prowadzić do reakcji zapalnych oczu czy chorób dróg oddechowych, w tym do nasilenia chorób układu krążenia (Tseng, 2008; www.powietrze.gios.gov.pl). W Polsce w ramach działalności wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska funkcjonuje około 100 stanowisk do pomiaru ozonu przyziemnego. Pomiary jego stężenia

odbywają się w sposób zautomatyzowany, przez analizatory wykorzystujące metodę fotometrii w ultrafiolecie. Progowa wartość informowania o możliwości wystąpienia podwyższonych stężeń ozonu występuje gdy średnie jednogodzinne stężenie osiąga wartość  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , zaś poziom alarmowy stanowi średnie jednogodzinne stężenie  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

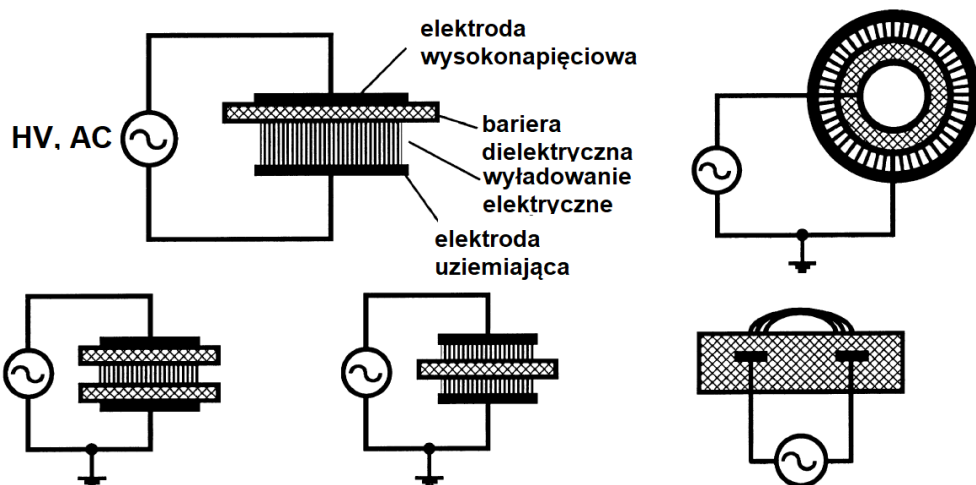


Rys. 13. Rozpuszczalność ozonu w zależności od temperatury (Nalepa, 1997)

Ozon w warunkach naturalnych powstaje w niewielkich ilościach ( $0,05 \text{ mg}/\text{L}$ ) w górnej warstwie atmosfery zwanej ozonosferą, znajdującej się ona około 40 km nad ziemią i odgrywa bardzo ważną rolę. Ozon stratosferyczny posiada bowiem zdolność do absorpcji promieniowania w szerokim zakresie długości fal, dlatego ozonosfera pełni funkcję ochronną przed promieniowaniem UV dla dolnych warstw atmosfery. Warstwa ozonowa na tej wysokości ma 25 km grubości, ale pod wpływem ciśnienia atmosferycznego grubość ozonu w ozonosferze nie przekroczyłaby 3 mm. Przy powierzchni ziemi ozon powstaje w czasie smogu fotochemicznego jako jeden z niepożądanych, wtórnych produktów reakcji fotochemicznych.

Ozon może powstawać w czasie użytkowania lamp UV oraz podczas reakcji katalitycznych, jednak do celów przemysłowych stosuje się głównie generatory ozonu (ozonatory). Stanowią one szczególny rodzaj reaktorów, w których zazwyczaj w wyniku wyładowań barierowych lub koronowych pod ciśnieniem atmosferycznym generowany jest ozon. Pierwszy ozonator został skonstruowany w 1875 roku przez Siemens.

Do generowania wyładowań barierowych w klasycznych konfiguracjach (rys. 14) wykorzystuje się płaskie lub cylindryczne układy elektrod z co najmniej jedną warstwą dielektryka umieszczoną między nimi. Typowe, wykorzystywane w ozonatorach materiały dielektryczne to szkło, kwarc, ceramika, a także polimery. Rozmiar szczeliny wyładowczej wynosi do około 1 mm. Zakresy częstotliwości źródła barierowych wyładowań elektrycznych wynoszą około 50-60 Hz lub 0,5-5,0 kHz (Kogelschatz, 1992; Kogelschatz i in., 1999; Kogelschatz, 2003). W takich ozonatorach gazem substratowym jest powietrze lub czysty tlen. Przykład wysokowydajnego generatora ozonu ( $60 \text{ kg O}_3/\text{h}$ ) przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 14. Podstawowe typy ozonatorów z wyladowaniami barierowymi

(Kogelschatz i in., 1999)



Rys. 15. Wysokowydajny generator ozonu (Ozonía Ltd.; Kogelschatz i in., 1999)

Jednym z największych atutów technologii ozonowej jest jej korzystny wpływ na środowisko. Ozon rozkłada się na tlen, który sam w sobie nie jest szkodliwy. Podczas dekompozycji cząsteczki ozonu powstaje cząsteczka i atom tlenu, który szybko reaguje z różnymi związkami chemicznymi prowadząc do ich neutralizacji. Produkty reakcji ozonu z zanie-

czyszczeniami są zazwyczaj nietoksyczne i łatwo biodegradowalne. W celu zwiększenia skuteczności obróbki ozonowanie może być łączone z innymi technikami wykorzystującymi procesy katalityczne lub inne utleniające np. nadtlenek wodoru ( $H_2O_2$ ) stanowiąc tym samym technologie zaawansowanego utleniania (AOT- *Advanced Oxidation Technology*) (Beltran, 1996; Pawłat, 2001; Kopacki i in., 2021).

Ze względu na łatwą w aplikacji formę gazową ozon jest często stosowany do oczyszczenia powietrza (inaktywacja mikroorganizmów, dezodoryzacja, rozkład zanieczyszczeń np. pochodzących z dymu papierosowego) w systemach wentylacji i klimatyzacji, głównie w budynkach użyteczności publicznej np. szpitalach, przychodniach, szkołach, hotelach i biurach oraz w samochodach (Bursa i in., 1985; Ozonok 1993).

Jednym z pierwszych i podstawowych zastosowań ozonu było oczyszczanie i dezynfekcja wody pitnej, przemysłowej i basenowej. Ozon reaguje ze związkami żelaza, manganu, amoniaku, siarkowodoru i innymi obecnymi w wodzie oraz eliminuje nieprzyjemne zapachy, smaki i barwę (Biń, 1995; Bai i in., 1997; Hoigne, 1998).

Ozonowanie może być jednym z etapów podczas oczyszczania ścieków. Ozon jest używany do eradykacji zanieczyszczeń, które nie mogą być usuwane tradycyjnymi metodami. Potrafi rozkładać duże cząsteczki (np. leków, pestycydów, pigmentów, detergentów) na mniejsze, łatwiejsze do przetworzenia w kolejnych etapach oczyszczania i możliwe do usunięcia. Może również prowadzić do zmniejszenia dawek innych stosowanych w procesach oczyszczania lub uzdatniania wody substancji np. koagulantów oraz zwiększenia trwałości filtrów. Ozon stosowano również do dezynfekcji gleby oraz w rekultywacji do rozkładu zanieczyszczeń po katastrofach przemysłowych (Ebihara i in., 2011).

Ozon oddziałuje na usuwane związki dwiema drogami:

- pośrednio, przez rozkład i produkcję nioselektywnych, silnie utleniających wolnych rodników oraz dalsze reakcje tych rodników z zanieczyszczeniami,
  - bezpośrednio jako słabszy, ale selektywny  $O_3$ .
  - Wiadomo wiele o reakcjach ozonu z substancjami organicznymi i nieorganicznymi. Ozon reaguje szybko z następującymi substancjami (Nalepa, 1997):
  - substancje organiczne (etylen, fenol, związki poliaromatyczne),
  - substancje nieorganiczne (siarczki, siarczyny, nitryle, bromki).
- Zaś wolno wchodzi w reakcje z:
- prostymi związkami aromatycznymi i alifatycznymi (benzen, propan),
  - niektórymi chlorowcopochodnymi.

W przypadku przemysłu rolno-spożywczego ozon wykorzystuje się w formie gazowej; w postaci wody ozonowanej stosowanej do mycia, zanurzania, jako dodatek do rozcieńczenia lub rozpylanej w formie aerozolu. Technologia ozonowa znalazła zastosowanie głównie do obróbki mięsa i owoców morza, nabiału, ziarna, owoców i warzyw, soków, napojów alkoholowych, przypraw, orzechów oraz w kondycjonowaniu wody, do usuwania pestycydów i szkodliwych środków chemicznych, w dezynfekcji, dezynsekcji i deratyzacji pomieszczeń, narzędzi, obszarów przygotowawczych i linii produkcyjnych oraz przy pakowaniu żywności.

Na przebieg procesu ozonowania i jego skuteczność ma wpływ szereg parametrów m.in. metoda ozonowania, czas ekspozycji, stężenie utleniacza, prędkości przepływu, rodzaj zanieczyszczenia (stan fizjologiczny kultury) i produktu poddanego ozonowaniu,



obecność dodatków (cukry, surfaktanty), pH, temperatura, wilgotność. Ozon może mieć wpływ ma właściwości sensoryczne i teksturę żywności dlatego należy zawsze odpowiednio dobrać warunki prowadzenia procesu by osiągnąć pożądaný efekt.

Ozonowanie w przypadku produktów mięsnych pozwala na ich konserwację dzięki eliminacji szkodliwych mikroorganizmów i degradację nienasyconych lipidów, białek i enzymów, kwasów nukleinowych, peptydoglikanów w otoczce komórkowej, kapsydów wirusowych i osłon przetrwalników (Pandiselvam i in., 2022).

Giménez i in. (2021) w trakcie schładzania wołowiny zastosowali ozon gazowy o stężeniu  $280 \text{ mg/m}^3$  w celu redukcji *Listeria monocytogens*. Skuteczniejsze w porównaniu do stałej 40 minut ekspozycji było ozonowanie impulsowe przez 5–10 minut w odstępie co 0,5 godziny. Dłuższe od 10 minut czasy obróbki wpływały niekorzystnie na barwę (utlenianie mioglobiny i oksymoglobiny do metmioglobiny) i jęczenie. Grupa Gertzou (2016) badała wpływ godzinnej ekspozycji na ozon gazowy o stężeniach 2–10 mg a następnie pakowania (poliamid/polietylen) w atmosferze powietrza lub próżniowo na okres trwałości i świeżość tekstury mięsa z nóżek kurczaka. W przypadku pakowania w atmosferze powietrza próbki traktowane dawką 10 mg/L zachowały odpowiednie parametry przez 8–10 dni, o 4 dni dłużej w porównaniu do kontroli. Pakowanie próżniowe wydłuża okres przechowywania po ozonowaniu do 16 dni w porównaniu do 12 dni w przypadku kontroli (Gertzou i in., 2016; 2017). Schłodzony, ozonowany kurczak miał porównywalne wartości organoleptyczne pod względem tekstury z krojonym na świeżo kurczakiem nawet w dziewiątym dniu przechowywania według El-Dahshan i in. (2013).

Cantalejo i in. (2016) dzięki ozonowaniu dwukrotnie (do 8 miesięcy) wydłużyli okres przechowywania w temperaturze  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  liofilizowanego i pakowanego próżniowo kurczaka, jednak dłuższy czas ekspozycji na ozon powyżej 30 minut spowodował nieakceptowalne, bo około 50% pogorszenie procesu rehydratacji. Sugerowane optymalne parametry procesu to stężenie  $0,6 \text{ mgO}_3/\text{L}$  i 10 minutowa ekspozycja.

Owoce morza bogate w białka i lipidy posiadają relatywnie krótki okres przydatności do spożycia i szybko tracą swoją jakość z powodu działania drobnoustrojów i zachodzących procesów enzymatycznych (Liao i in., 2018). Mycie wodą ozonowaną hamuje aktywność proteazy i enzymów proteolitycznych (Zhang i in., 2013), zabezpieczając produkt przez zbytnim zmiękczeniem. Grupa Okpała (Okpała, 2014, 2015; Okpała i in., 2016) badała teksturę mrożonych krewetek pacyficznych poddanych myciu wodą ozonowaną i periodycznemu ozonowaniu w okresie przechowywania. Zastosowana obróbka nie wpłynęła negatywnie na parametry teksturalne, takie jak twardość, kleistość, sprężystość i kruchość produktu. Woda ozonowana i następnie pakowanie w modyfikowanej atmosferze krewetek pacyficznych pozwoliły na wydłużenie okresu przydatności do spożycia z 9 do 24 dni (Gonçalves i Santos, 2019). Ketkaew (2012) zaproponował wykorzystanie ozonu do zmniejszenia stężenia amoniaku w produkcji krewetek.

Ozon jest często wykorzystywany do całorocznej dezynfekcji powierzchni skorupki jaj w celu ochrony przed salmonellozą powodowaną przez *Salmonella enterica*. Ziyaina i Rasco (2021) nie stwierdzili negatywnego wpływu obróbki ozonem na jakość całego jajka, żółtka i białka jaj. Według Yüceer i in. (2016), 2–4  $\text{mgO}_3/\text{L}$  wpłynęło pozytywnie na stabilność pH i lepkość oraz zdolność ubijania białka jaj, zaś dawki powyżej 6  $\text{mg/L}$  miały działanie negatywne. Ozonowanie zwiększyło również zdolność zatrzymywania wody i zmniejszyło straty podczas gotowania (Khemakhem i in., 2019; Sun i in., 2021). Twar-

dość, żujność i gumowatość żółtka kurzego traktowanego ozonem ( $1 \text{ gO}_3/\text{h}$ ) wzrosły wraz z czasem obróbki (max. do 20 minut) (Sun i in., 2021). Doniesienia grup badawczych dotyczące wpływu ozonowania na wytrzymałość skorupki jaj nie są jednoznaczne. Podczas 20 minutowej fumigacji ozonem o stężeniu 5-10 mg/L wytrzymałość na złamanie skorupki jaj wzrosła o 2,25% (Clímaco i in., 2018). Natomiast Yüceer i in. (2016) stwierdzili, że średnia wytrzymałość na złamanie i przebicie jajek zmniejszała się wraz ze wzrostem stężenia ozonu, czasem traktowania i okresem przechowywania.

Ozon stosowany był do konserwacji i poprawy parametrów spożywczych, takich jak mleko, serwatka, sery, kazeina, albumina, inwertaza, pektynaza, papaina, trypsyna, żelatyna, methemoglobina (Cataldo, 2003, 2004, 2007). Ozonowanie żelatyny może znaleźć zastosowanie do jej dekontaminacji lub bielenia przy niskiej dawce ozonu (stosunku molowym ozonu/do żelatyny między 0,1 a 0,35) powodując wtedy jedynie znikome zmiany w jej strukturze.

Segat i in. (2014) stosowali gazowy ozon produkowany z wydajnością 36 g/h do obróbki sproszkowanego izolatu białka serwatkowego w czasie od 30 do 480 minut. Wykazano zmiany w strukturze białka m.in. spadek wolnych grup sulfohydrylowych i wzrost hydrofobowości powierzchni. Powstała struktura bardziej elastyczna, wzrosła zdolność pianotwórcza i stabilność piany, zmalała jednak rozpuszczalność. W swej pracy Smith (2012) badał wpływ ozonu na odbarwianie serwatki. Suprpto i in. (2021) analizowali zaś wpływ ozonu o stężeniu 0,702 mg/L na właściwości fizykochemiczne oraz aktywność mikrobiologiczną świeżego mleka krowiego podczas różnych czasów ekspozycji (do 30 minut). Nie stwierdzono istotnego wpływu na gęstość, białko i tłuszcz w mleku krowim. Odnotowano wzrost wartości oporu elektrycznego oraz znaczący wzrost stężenia dialdehydu malonowego (z 0,0137 do 0,2809  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) oraz 30% spadek ogólnej liczby kolonii mikroorganizmów.

Długotrwałe ozonowanie zwiększyło twardość (rosła wraz z koncentracją ozonu) i poprawiło konsystencję ubitego masła. Jakość teksturalna i parametry barwy długotrwałego ozonowania poprawiły również jego konsystencję. Analiza kolorymetryczna wykazała zwiększenie współczynnika  $L^*$  i  $a^*$ , zaś zmniejszenie się udział barwy żółtej  $b^*$ . Dłuższa ekspozycja na ozon zwiększyła agregację tłuszczu. W przypadku ubijania z wodą ozonowaną wraz z koncentracją ozonu wielkość cząstek tłuszczu oraz stabilność oksydacyjna zmniejszyła się (Sert i in., 2020; Sert i Mercan, 2020).

Pozytywny wpływ ozonowania komory dojrzewalniczej podczas dojrzewania miękkiego sera na wzrost niekorzystnych mikroorganizmów na powierzchni produktu raportowali Tabla i Roa (2022). Ozon w stężeniu  $2 \text{ mg}/\text{m}^3$  znacząco zredukował liczbę grzybów nitkowatych w skórce sera po 30 i 45 dniach dojrzewania w porównaniu z próbką kontrolną. Powierzchniowe działanie fungistatyczne nie wpływało na inne ogólne parametry mikrobiologiczne oraz sensoryczne sera. Ozon poprawiał wygląd skórki i zapobiegał jej przebarwieniom.

Zwalczanie różnego rodzaju mikroorganizmów i szkodników jest bardzo istotne w przypadku przechowalności ziarna, a fumigacja ozonem gazowym jest w tym przypadku jednym z rekomendowanych rozwiązań (Verma, 2018). Skrobia jest głównym składnikiem wielu ziaren. Niewielkie dawki ozonu wpływają na zdolność spęcznienia i zwiększenie przezroczystości i lepkości masy skrobiowej (Zhu, 2018), wysokie dawki przynoszą jednak odwrotny efekt. W przypadku ozonowania skrobi z batatów nie zanotowano istotnych zmian na poziomie granul (rozmiar, morfologia, struktura lamelarna), jednak potwierdzono

ogromne zmiany na poziomie molekularnym, w tym przekształcenia grup hydroksylowych w grupy karbonylowe i karboksylowe oraz depolimeryzację cząsteczek skrobi, co implikowało znaczące zmiany właściwości technologicznych, na przykład wzrost rozpuszczalności w wodzie i przejrzystości masy oraz spadek zdolności do pochłaniania wody, lepkości i sprężystości (He i in., 2023).

Obadi i in. (2018) badali wybrane własności mąki pełnoziarnistej po obróbce ozonem gazowym (5 g/h) w czasie od 5 do 45 minut. Wchłanianie wody i oleju, zdolność spęczniania oraz rozpuszczalność znacząco wzrosły wraz z wydłużaniem czasu ozonowania. Istotnej zmianie uległa również średnia wielkość cząstek mąki, zaś chleb przygotowany z mąki ozonowanej miał lepsze cechy jakościowe (większą objętość właściwą oraz jaśniejszą barwę).

Obróbka wodą ozonowaną podczas przygotowania oraz modyfikowana atmosfera pakowania wpłynęła pozytywnie na przedłużenie trwałości podsuszanych świeżych makaronów gryczanych (zawartość wilgoci  $22,5 \pm 0,5\%$ ) przechowywanych w temperaturze  $25^\circ\text{C}$ . Zastosowanie wody zawierającej 2,21 mg/l ozonu powodowało spadek początkowych obciążenia mikrobiologicznych o  $1,8 \log_{10}$  jtk/g, zmniejszenie tempa zakwaszania przy jednoczesnym utrzymaniu cech teksturalnych i sensorycznych przez cały okres badań (Bai i in., 2017). Również Guo i in. (2020) potwierdziła, że użycie wody ozonowanej zmniejszyło ilość bakterii, zawartość pleśni i drożdży w obrabianych makaronach odpowiednio o  $1,26 \log_{10}$  jtk/g,  $0,34 \log_{10}$  jkt/g i  $0,39 \log_{10}$  jtk/g. Trwałość podsuszanych świeżych makaronów w temperaturze pokojowej została wydłużona o prawie 24 godziny bez pogorszenia właściwości teksturalnych.

Ziarna parzonego ryżu traktowane ozonem wykazywały znaczną redukcję zanieczyszczenia mikotoksynami (do 60%), niezależnie od czasu i okresu aplikacji oraz badanej mikotoksyny. Pod względem właściwości technologicznych próbki traktowane ozonem przez 5 godzin moczenia wykazywały wyższą jasność, a także twardość, zdolność do pęcznienia i spoistość przy jednoczesnym skróceniu czasu gotowania, procentu wadliwych ziaren oraz rozpuszczalności białka (da Luz i in., 2022).

Ozon chętnie stosowany jest podczas przechowywania oraz obróbki owoców i warzyw by usunąć lub uniknąć zanieczyszczenia produktów spożywczych na różnych etapach cyklu produkcyjnego (Perez i in., 1999; Tzortzakis i in., 2007, Carletti i in., 2013; Kopacki i in., 2021). Mycie wodą ozonowaną może zredukować drożdże i pleśnie występujące w mrożonych truskawkach nawet o 98% (Krosowiak i in., 2007), pozwala na ograniczenie skali zakażeń powodowanych przez *Botrytis cinerea* w przypadku gruszek (Mari i in., 2003) i winogron nie wpływając negatywnie na barwę i zawartość chlorofilu (De Simone i in., 2020).

Celem badań Duarte-Sierra i zespołu (2022) było zbadanie wpływu ekspozycji różyczek brokułów na ozon o różnych stężeniach. Najlepsze wyniki, skutkujące aktywacją genów szlaku glukozynolanów oraz wzrostem poziomu metabolitów wtórnych, to jest kwasów hydroksycynamonowych i glukobrassicyny osiągnięto przy użyciu  $5 \mu\text{LO}_3/\text{L}$  przez 60 minut.

Ozon pomógł wydłużyć okres przechowywania świeżych owoców i warzyw np. jabłek, winogron, pomarańczy, gruszek, malin, truskawek oraz brokułów, ogórków oraz sałaty (Beuchat, 1992). Chwaszcz i in. (2015) stosując technologie ozonowania wydłużyli także okres przechowywania malin do czterech dni.

Ozon często wykorzystuje się do eliminacji pozostałości pestycydów. Według Ong i in. (1996) mycie jabłek w wodzie zawierającej ozon (25 ppm) przez 30 minut znacząco zmniejszyło poziom pestycydów na ich powierzchni. de Souza i in. (2018) zdołali usunąć ponad 98% difenokonazolu i 95% linuronu z korzeni marchwi przy użyciu ozonu. W pracy Al. Dabbas i in. (2014) zbadano korzystny wpływ obróbki ozonowej przez 3, 5, 10, 15 i 30 minut przy stężeniu 0,4 ppm na usuwanie pozostałości pestycydów karbaminowych: metomilu, oksamylu i karbosulfanu w sztucznie zanieczyszczonym soku pomidorowym, zaś efekt był silnie uzależniony od czasu obróbki.

Laika i in. (2024) wykorzystali pozytywny wpływ obróbki gazem plazmowanym zawierającym głównie ozon, generowanym w reaktorze plazmowym z wyładowaniem powierzchniowym do dekontaminacji inokulowanych mikotoksynami (aflatoksynami B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG2) oraz ochratoksyną A (OTA)) pistacji. Zaobserwowano dość nieoczekiwany rozkład mikotoksyn: AFB1: 5%, 20% i 20% odpowiednio dla pistacji całych, krojonych i miazgi pistacjowej. Natomiast OTA, 9%, 23% i 31% w stosunku do tak samo przygotowanych wyrobów. Wpływ matrycy żywnościowej miał więc znaczący wpływ na przebieg eksperymentu.

Chen i in. (2014) stwierdzili, że aflatoksyny w orzeszkach ziemnych o wilgotności na poziomie 5% (w/w) łatwo ulegały degradacji podczas 30 minutowej ekspozycji na 6,0 mg/L ozonu w temperaturze pokojowej. Podczas oceny jakości odżywczej orzeszków ziemnych po ozonowaniu nie stwierdzono istotnych różnic między próbkami ozonowanymi, a kontrolą pod względem zawartości polifenoli, resweratrolu, liczb kwasowej i nadtlenkowej.

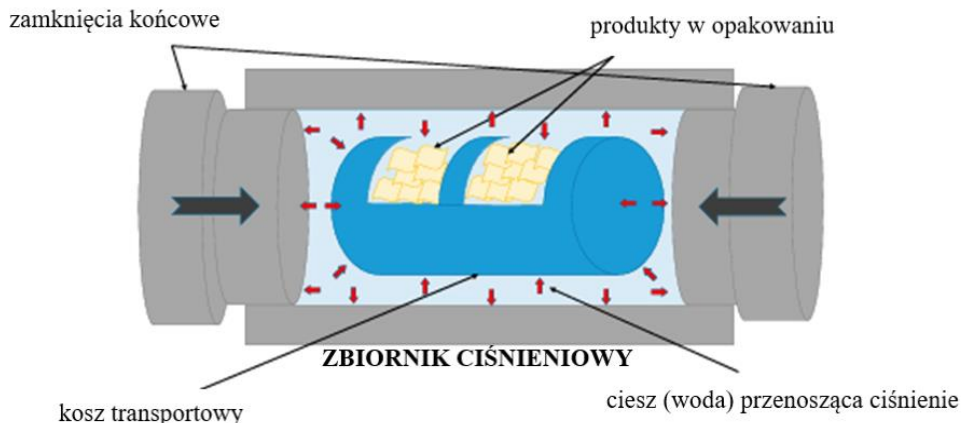
Na podstawie doniesień licznych grup badawczych można stwierdzić, że ozonowanie żywności pozytywnie wpływa na poprawę jego bezpieczeństwa i jakości, może przynieść wiele korzyści wpływając na wydłużenie trwałości i minimalizację strat, polepszenie właściwości mikrobiologicznych, sensorycznych oraz funkcjonalnych. Może też pomóc w dekontaminacji żywności z pozostałości związków chemicznych (pestycydów). W każdym przypadku należy prowadzić proces w kontrolowanych warunkach, po odpowiednich działaniach optymalizacyjnych (dobór dawki, czasu kontaktu oraz warunków ekspozycji na ozon) w celu uniknięcia rozkładu pożądaných substancji odżywczych.

### 6.3. Wysokie ciśnienie hydrostatyczne – technologia HPP

Obróbka wysokociśnieniowa (*High Pressure Processing*, HPP), pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym (*High Hydrostatic Pressure*, HHP) lub też proces znany jako utrwalanie pod ultrawysokim ciśnieniem (*Ultra High Pressure*, UHP) to terminy opisujące poddawanie żywności działaniu podwyższonego ciśnienia (6000 atmosfer, czyli 600 MPa) w temperaturze otoczenia lub schłodzonej.

Technika ta została nazwana na cześć Blaise'a Pascala, XVII-wiecznego francuskiego naukowca, którego opracowania naukowe obejmowały szczegółowe opisywanie wpływu ciśnienia na płyny. W późniejszym czasie proces ten był również znany jako bridgmanizacja, ponieważ Percy Williams Bridgman, amerykański fizyk, w 1946 roku otrzymał Nagrodę Nobla za pracę nad fizyką wysokich ciśnień ([www.en.wikipedia.org/wiki/Pascalization](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Pascalization)).

Generalnie technologia HPP zrewolucjonizowała sposób utrwalania opakowanej żywności poprzez wykorzystanie wody pod wysokim ciśnieniem, co pozwoliło uniknąć podgrzewania produktu. W tej metodzie produkt pakowany jest w elastyczny pojemnik (worek lub plastikową butelkę), a następnie ładowany do kosza na próbki, jak pokazano na rysunku 16.



Rys. 16. Schemat procesu obróbki metodą HPP (Balakrishna i in., 2020)

Kosz na próbki jest następnie ładowany do komory wysokociśnieniowej wypełnionej płynem przenoszącym ciśnienie, takim jak woda. Płyn przenoszący ciśnienie w komorze jest kolejno poddawany działaniu pompy pod ciśnieniem, a ciśnienie przekazywane jest przez opakowanie do żywności. Podczas zwiększania ciśnienia następuje przejściowy wzrost temperatury żywności ( $3^{\circ}\text{C}/100\text{ MPa}$ ) w wyniku ogrzewania adiabaticznego. Produkt jest utrzymywany pod ciśnieniem przez określony czas, zwykle 2-5 minut, zanim zostanie rozhermetyzowany. Co ważne, wysokie ciśnienie rozchodzi się w objętości produktu równomiernie i natychmiastowo, dzięki czemu nie uszkadza produktu, który powróci do swojego pierwotnego kształtu po zwolnieniu ciśnienia, zwanego izostatycznym. Po dekompresji, również temperatura utrwalonego wyrobu powraca do wartości bliskiej wartości początkowej. W końcowym etapie utrwalony produkt opuszcza komorę w stanie nie naruszonym i jest przechowywany w warunkach chłodniczych.

Pierwotnie wprowadzono orientację pionową tego typu urządzeń, jednak obecnie większość wysokociśnieniowych technologii wykorzystywanych na skalę komercyjną jest zorientowana poziomo. Pomaga to pomieścić większe rozmiary/objętości obrabianych próbek, a także zapewnia wyraźne oddzielenie stref surowców i produktów przetworzonych.

HPP pozwala na zniszczenie drobnoustrojów powodujących psucie się bez użycia ciepła, zachowując oryginalny smak, konsystencję i właściwości odżywcze produktu. Eksperymenty nad wpływem ciśnienia na mikroorganizmy odnotowano już w 1884 roku, a w 1899 roku Benjamin Harrison Hite jako pierwszy niezbicie wykazał inaktywację mikroorganizmów pod wpływem ciśnienia. Po tym czasie, szybko pojawiły się doniesienia na

temat zapobiegania psuciu się mleka, które poddane działaniu wysokiego ciśnienia pozostawało słodsze dłużej niż mleko niepoddane obróbce.

Mięso, owoce i warzywa, soki i napoje, dżemy, galaretki, żywność dla dzieci, to tylko niektóre reprezentatywne kategorie wyrobów poddawanych obróbce ciśnieniowej. Produkty HPP dostępne na całym świecie obejmują również skorupiaki (w tym ostrygi, homary i kraby), połówki awokado i guacamole, szynkę peklowaną, sałatki i dipy (między innymi coleslaw, salsa, hummus) i inne dania gotowe. Przyjmuje się jednak, że technologia HPP jest szczególnie przydatna do przetwarzania produktów kwaśnych ( $\text{pH} < 4,6$ ).

Przepisy dotyczące analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli (HACCP) stosowane przez Agencję ds. Żywności i Leków (FDA) uznają HPP za proces utrwalania zapewniający redukcję o 5 log odpowiednich patogenów w sokach. Podobnie HPP została uznana przez FDA za proces odkażania bakterii *Vibrio* w surowych ostrygach i owocach morza. Służba Inspekcji Bezpieczeństwa Żywności Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA FSIS) uważa metodę HPP za odpowiednią do zwalczania *Listeria monocytogenes* obecna w gotowych do spożycia (RTE) produktach mięsnych. Health Canada, Komisja Europejska i inne agencje regulacyjne również uznały HPP za skuteczny proces dekontaminacji żywności.

Obróbka pod wysokim ciśnieniem stwarza wiele możliwości poprawy jakości żywności. Jedną z nich jest inaktywacja mikroorganizmów występujących w kostkach mango pod wpływem obróbki wysokociśnieniowej prowadzonej przez 1 minutę przy 300 i 600 MPa. Podczas 9 tygodni przechowywania w temperaturze 3°C smak świeżego mango uległ zmianie, zaś barwa i inne cechy sensoryczne były porównywalne do próbek niepoddanych obróbce (Kader, 2008).

W innym doświadczeniu kostki ananasa w syropie cukrowym poddano obróbce wysokociśnieniowej, ogrzewaniu konwencjonalnemu i ogrzewaniu omowemu. Ostatnia z wymienionych metod spowodowała istotne zmiany w mikrostrukturze komórkowej i elektroporacji ściany komórkowej. Konwencjonalne ogrzewanie skutkowało obniżeniem resztkowej aktywności enzymatycznej. Natomiast obróbka HPP sprzyjała obecności rozpuszczalnych substancji stałych w syropie, a także nie wpływała na kształt i mikrostrukturę kostek ananasa. Niestety po jej zastosowaniu wykazano największe różnice kolorymetryczne ( $\Delta E$ ) (Rinaldi i in., 2020).

Rinaldi i in. (2023) ocenili barwę, konsystencję, całkowitą zdolność przeciwutleniającą, liczbę drobnoustrojów i mikrostrukturę kostek dyni poddanych obróbce HPP (100 do 600 MPa przez 3 minuty). Autorzy pracy nie zauważyli znaczących różnic pomiędzy próbkami nietraktowanymi i próbkami poddanymi obróbce w wartościach wilgotności, całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych i pH. Tkanka dyni wykazywała jednak duże modyfikacje strukturalne, takie jak zmiany wielkości i kształtu komórek, uszkodzenie ściany komórkowej, zwiększenie grubości ściany komórkowej, oddzielenie i odwodnienie komórek oraz odkładanie się jonów wapnia, głównie w zakresie HPP od 300 do 600. Zaś próbki kontrolne charakteryzowały się bardziej regularną grubością ścianek komórek. Zauważono zauważalną różnicę barwy  $\Delta E$  i twardości pomiędzy próbkami HPP600 i kontrolnymi, podczas gdy obróbka przy niższych ciśnieniach nie miała aż tak dużego wpływu na rozpatrywane parametry. Co ciekawe kostki dyni poddane ciśnieniu HPP200 i HPP400 posiadały najwyższą całkowitą zdolnością przeciwutleniającą. Obróbka wysoko-

ciśnieniowa od HPP400 do 600 pozwoliła w największym stopniu zniszczyć mikroorganizmy, ale negatywnie wpłynęła na teksturę i mikrostrukturę produktu.

Rastogi i in. (2000) zaobserwowali wyższy współczynnik dyfuzji w kostkach ananasa poddanych obróbce wstępnej pod wysokim ciśnieniem podczas odwadniania osmotycznego w porównaniu z kostkami ananasa niepoddanyymi obróbce ciśnieniowej.

Janowicz i Lenart (2015) stwierdzili, iż suszenie konwekcyjne kostek jabłek po obróbce wstępnej HHP spowodowało statystycznie istotne zmiany barwy tkanki w porównaniu do próbek kontrolnych, z tendencją do ciemnienia. Zastosowanie roztworu hipertonicznego podczas obróbki wstępnej pod ciśnieniami 0,1 i 300 MPa było przyczyną otrzymania niższych odpowiednio o 10,5% i 16% wartości  $\Delta E$  w stosunku do tkanek jabłek poddanych wstępnej obróbce roztworem izotonicznym. Skurcz tkanki jabłek wahał się od 70 do 89% i był zależny od parametrów obróbki wstępnej HHP. Podobnie wartości porowatości próbek zmieniały się w zależności od zastosowanych parametrów procesu i mieściły się w bardzo szerokim zakresie od 1 do 66%.

Wpływ obróbki wstępnej wysokociśnieniowej (300-500 MPa przez 5-15 minut) na charakterystykę odwodnienia kostek aloesu suszonych w temperaturze 50-70°C i przy prędkości powietrza 1-2 m/s, był analizowany przez Swami Hull i Rao (2016). Autorzy pracy stwierdzili, że zastosowany proces doprowadził do skrócenia czasu suszenia w porównaniu z produktami niepoddanyymi obróbce. Na szybkość i czas suszenia największy wpływ miała temperatura, a następnie prędkość powietrza, poziom ciśnienia i czas przetwarzania. HPP zwiększyło twardość kostek aloesu maksymalnie o 21% dla próbki poddanej działaniu ciśnienia 500 MPa przez 15 minut. Analiza mikrostruktury przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wykazała niejednorodne struktury we wstępnie obrobionych i wysuszonych próbkach.

Badanie zmian tekstury i szybkości suszenia plasterków ananasa poddanych wstępnej obróbce pod wysokim ciśnieniem przeprowadzili Kingsly i in. (2009). Autorzy zaobserwowali, że wysokie ciśnienie zmniejsza twardość, sprężystość i żujność próbek, natomiast na spójność nie wpływa znacząco. Badania wskazały, że obróbka wstępna plasterków owoców pod wysokim ciśnieniem może zminimalizować czas suszenia i utrzymać jakość produktów końcowych.

Obróbkę wysokociśnieniową można również stosować jako nietermiczną metodę utrwalania soków w celu zwiększenia ich stabilności poprzez inaktywację drobnoustrojów przy stosunkowo niewielkich zmianach jakości sensorycznej i odżywczej.

Świadczą o tym chociażby badania przeprowadzone przez McKay i in. (2011), którzy zauważyli zmniejszenie całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych, bakterii kwasu mlekowego, drożdży i pleśni w soku jabłkowym, stosując ciśnienie 300 MPa przez 1 minutę w temperaturze 20°C. Natomiast chcąc uzyskać całkowitą redukcję (poniżej granicy wykrywalności) rozpatrywanych drobnoustrojów zastosowali ciśnienia rzędu 500 - 600 MPa (1 minuta, 20°C).

Abid i in. (2014) stwierdzili, że sok jabłkowy poddany obróbce HPP (450 MPa, 10 minut, 20°C) charakteryzował się wyższą zawartością związków fenolowych i przeciwutleniaaczy, w porównaniu do próbki kontrolnej i soku poddanego obróbce pod ciśnieniem 350 MPa.

Barbara i in. (2013) ocenili z kolei wpływ obróbki wysokociśnieniowej (200, 400 i 600 MPa) i czasu jej trwania (5, 9 i 15 minut) na wartości fizykochemiczne soku jagodowego.

Niezależnie od zastosowanych parametrów procesu, nie zaobserwowali znaczących zmian w pH i °Brix, a także barwie ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  i  $\Delta E$ ). Zabiegi HPP spowodowały nieznaczną redukcję witaminy C nieprzekraczającą 8%. Natomiast całkowita zawartość polifenoli w soku uległa zwiększeniu, głównie po zastosowaniu HPP przy ciśnieniu 200 MPa dla wszystkich czasów obróbki. Wartości pojemności antyoksydacyjnej nie różniły się statystycznie istotnie dla zabiegów przy ciśnieniu 200 MPa przez 5-15 minut w porównaniu wartości otrzymanych dla świeżego soku. Natomiast pod wpływem zwiększonego ciśnienia (400 i 600 MPa) nastąpiła redukcja rozpatrywanej cechy w granicach od 8 do 16%.

Sok grejpfrutowy Aadil i in. (2017) poddali zmiennym procesom obróbki HPP (0, 150, 200 i 250 MPa), temperaturze (40, 50 i 60°C) i czasie przetwarzania trwającym 3 minuty. Autorzy pracy nie zaobserwowali różnic w wartościach °Brixa, pH i kwasowości pomiędzy próbkami kontrolnymi, a poddanymi różnym zabiegom z użyciem HPP. Po obróbce wysokociśnieniowej (250 MPa, 60°C, 3 minuty) prowadzącej do znacznej redukcji mikroorganizmów, zauważono wzrost wartości karotenoidów ogółem, antocyjanów ogółem, aktywności DPPH, całkowitej zdolności przeciwutleniającej, a także całkowitej zawartości polifenoli w porównaniu z próbką kontrolną. Średnie wartości współczynników barwy  $L^*a^*b^*$  dla wyrobu niepoddanego obróbce wynosiły odpowiednio 6,65; 3,80 i 4,95. Odnotowano natomiast pociemnienie (zmniejszenie wartości parametru  $L^*$ ) wyrobów poddanych przetwarzaniu. Współczynnik chromatyczności  $a^*$ , zmieniał się wraz ze zmianą parametrów procesu i zawierał się w granicach od 3,51 do 3,65. Zastosowana obróbka, wpłynęła również na obniżenie współczynnika charakteryzującego barwę żółtą  $b^*$ , którego wartości kształtowały się na poziomie 4,67-4,79.

Ze względu na to, iż tradycyjna metoda pasteryzacji ma zwykle negatywny wpływ na jakość soków, w kolejnym badaniu porównano obróbkę wysokociśnieniową (500 MPa, 10 minut) i termiczną (95°C, 3 minuty) monitorując ich wpływ na fizykochemiczne i mikrobiologiczne właściwości soku ananasowego podczas jego przechowywania w temperaturze 4°C. Zastosowane zabiegi pozwoliły wydłużyć okres przydatności do spożycia świeżo przygotowanego napoju do co najmniej 21 dni. Generalnie umożliwiły inaktywację ogólnej liczby drobnoustrojów, w tym drożdży i pleśni, a także bakterii z grupy coli. Obróbka HPP nie miała istotnego wpływu na właściwości fizykochemiczne soku ananasowego, natomiast stwierdzono wyraźną zmianę barwy i znaczne zmniejszenie zawartości fruktozy i glukozy w soku owocowym poddanym pasteryzacji (Wu i in., 2021).

W wielu badaniach donoszono również o zaletach HPP w porównaniu do tych poddanych pasteryzacji, w zachowaniu aromatu świeżych soków, w związku z tym soki HPP cieszyły się większą ogólną akceptacją (Chang i in., 2017; Aaby i in., 2018; Bansal i in., 2019; Hu i in., 2020; Song i in., 2023). Przedmiotem badań Sreedevi i in. (2020) był sok z trzciny cukrowej, który ma krótki okres przydatności do spożycia ze względu na szybkie psucie się enzymatyczne i fermentację mikrobiologiczną. Zmiany cech jakościowych soku przetworzonego pod wysokim ciśnieniem (523 MPa, 50°C, 11 minut) porównano z sokiem konwencjonalnie pasteryzowanym (90°C, 5 minut), pakowanym w dwa różne materiały opakowaniowe, takie jak alkohol etylenowo-winyłowy (EVOH) i wielowarstwowy (ML-PET) politereftalan etylenu. Akceptowalność sensoryczna soku poddanego HPP była lepsza niż próbek pasteryzowanych. W warunkach chłodniczych napoje umieszczone w butelce wykonanej z ML-PET i poddane działaniu wysokiego ciśnienia wykazywały trwałość do



100 dni w porównaniu z sokiem pasteryzowanym, dla którego okres przydatności do spożycia wynosił 45 dni.

Jeśli chodzi o patogeny występujące w sokach, bakteria *Escherichia coli* jako organizm wskaźnikowy, wymaga redukcji o co najmniej 5 log w połączeniu z czasem i ciśnieniem, aby zapewnić bezpieczeństwo wyrobom końcowym. W sokach owocowych i produktach warzywnych obróbka HPP może spowodować skuteczną redukcję tego drobnoustroju (Usaga i in., 2021; Nema i in., 2022; Gouvea i in., 2023).

Potwierdzają to badania Gouvea i in. (2020), którzy w soku z acai poddanym działaniu HPP przy 400 MPa przez 3 minuty zaobserwowali ponad 6-logarytmiczną redukcję bakterii *Escherichia coli*, *Salmonella* i *Listeria monocytogenes*. Najbardziej wrażliwym patogenem wśród analizowanych drobnoustrojów była *Listeria monocytogenes*, u której pomyślnie odnotowano spadek o 6 log przy 400 MPa w ciągu 1 minuty.

Pokhrel i in. (2019) zbadali zaś skuteczność działania wysokiego ciśnienia (200-500 MPa) lub w połączeniu z łagodną obróbką cieplną (35 i 50°C) i niziną (25 i 50 ppm) w inaktywacji *Listeria innocua* i *Escherichia coli* w soku marchwiowym. Przetwarzanie pod ciśnieniem 500 MPa w temperaturze 20°C przez 2 minuty bez nizyny spowodowało redukcję odpowiednio *L. innocua* i *E. coli* o 4 i 5 log<sub>10</sub> jtk/ml, przy włączeniu 25 ppm nizyny pod tym samym ciśnieniem i temperaturą redukcja wynosiła 7 log<sub>10</sub> jtk/ml. Co ważne, po 28 dniach przechowywania w lodówce soku z marchwi traktowanego kombinacją 300 MPa (w temperaturze 35°C) i 25 ppm nizyny całkowita liczba drobnoustrojów wyniosła <2 log<sub>10</sub> jtk/ml. Wszystkie kombinacje spowodowały mniej intensywne wykorzystanie ciśnienia, czyli bardziej energooszczędne i opłacalne procesy przy jednoczesnym uzyskaniu wysokiej jakości soków. Wyniki tego badania sugerują, że stosując odpowiedni poziom ciśnienia, temperatury i dodatku nizyny, można wytwarzać bezpieczne, wysokiej jakości soki z czystą etykietą.

Naukowcy zgodnie z zasadami zrównoważonej produkcji podejmują jeszcze inne działania prowadzące do minimalizacji kosztów przetwarzania. Rodrigues Petrus i in. (2020) sok pomarańczowy zaszczepili bakteriami *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* i *Listeria monocytogenes*, po czym próbki poddawali ciśnieniu w zakresie od 139 do 561 MPa przez czas wynoszący od 39 do 181 sekund. Stosując, ciśnienie powyżej 400 MPa uzyskali redukcję o ponad 5 log wszystkich patogenów, niezależnie od czasu prowadzenia procesu. Zauważyli jednak, że *Listeria monocytogenes* była bardziej wrażliwa na HPP już przy ciśnieniu 350 MPa i czasie przetwarzania równym lub przekraczającym 110 sekund. *Escherichia coli* O157:H7 i *Salmonella enterica* wykazywały podobną oporność, a liczba ich redukcji (350 MPa/110 s) wahała się od 2,2 do 3,7 log. Tym samym autorzy pracy dowiedli, że w celu zapewnienia bezpieczeństwa soku jabłkowego można z powodzeniem stosować stosunkowo umiarkowane ciśnienia, oszczędzając energię i minimalizując koszty utrwalania.

Do ciekawych wniosków doszli również Donsi i in. (2007) wskazując, że większą redukcję *Saccharomyces cerevisiae* w sokach ananasowych i pomarańczowych można uzyskać stosując wielopulsowe niż statyczne HPP. Również da Rocha Ferreira i in. (2009) zaobserwowali, że wieloimpulsowy HPP był bardziej skuteczny w redukcji *Byssoschlamys nivea* w soku ananasowym i nektarze niż statyczny HPP. Największą zaletą wieloimpulsowego HPP jest to, że występuje więcej niż jeden okres kompresji, utrzymywania i dekompresji, w porównaniu do trybu jednoimpulsowego charakteryzującego się kompresją,

utrzymywaniem przez pewien czas pod ciśnieniem docelowym i dekompresją do ciśnienia atmosferycznego.

Szczepańska i in. (2021) ocenili wpływ statycznej i wieloimpulsowej obróbki wysokociśnieniowej (HPP) na jakość świeżo tłoczonego soku jabłkowego podczas przechowywania w warunkach chłodniczych (4°C przez 12 tygodni). Obróbka przy 300 MPa (trzy impulsy po 5 minut każdy), 450 i 600 MPa (pojedynczy impuls przez 5 minut) spowodowała większą redukcję mikroorganizmów niż pojedynczy impuls przy 300 MPa trwający 5 minut. Obróbka HPP i czas przechowywania znacząco zwiększyły pozorną lepkość dynamiczną i zmętnienie. Każdy sok poddany obróbce HPP po 12 miesiącach przechowywania okazał się ciemniejszy w porównaniu do wyrobu kontrolnego, o czym świadczy spadek wartości  $L^*$  i wzrost wskaźnika brązowienia (BI). Odnotowano również spadek ilości witaminy C, kwercetyny, kwasu galusowego i katechin. Jednak ze względu na to, iż po 12 tygodniach przechowywania uzyskano dla soku poddanego działaniu 300 MPa x 3 cykle i 600 MPa porównywalną jakość, uznano, że wieloimpulsowe HPP może być dobrą alternatywą dla utrwalania soku, zwiększającą żywotność sprzętu.

Obróbkę wysokociśnieniową można również wykorzystać do modyfikacji wartości odżywczych przetworzonych produktów z owoców czy warzyw.

Mukhopadhyay i in. (2017) ocenili wpływ HPP (300-400-500 MPa, 5 minut) w dwóch temperaturach (8°C i 15°C) na zdolność przeciwutleniającą (test ORAC) puree z melona kantalupa podczas 10 dni przechowywania w temperaturze 4°C. Nie stwierdzono znaczących różnic w wartościach zdolności przeciwutleniającej pomiędzy próbkami świeżymi i poddanymi obróbce (w różnych badanych zakresach ciśnienia i temperatury). Ponadto wartości  $\mu\text{mol}$  ekwiwalentu troloksu/100 g świeżej masy poddanego obróbce przecieru były bardzo stabilne podczas 10 dni przechowywania.

Shen i in. (2016) stwierdzili, że obróbkę HPP można stosować jako alternatywę dla pasteryzacji termicznej mięszu jujuby. Traktowanie pod ciśnieniem 400 MPa lub wyższym przez 20 minut przyczyniło się do większej retencji kwasu askorbinowego i zwiększenia całkowitej zawartości fenoli, całkowitej zawartości flawonoidów i zdolności przeciwutleniającej. W porównaniu z obróbką cieplną, HPP (600 MPa, 20 min) umożliwiło zachowanie większej ilości składników odżywczych, jednak nieznacznie zmniejszyło zdolność przeciwutleniającą mięszu jujuby. Wraz ze wzrostem ciśnienia retencja kwasu askorbinowego nieznacznie wzrosła do 92,9 i 93,3% odpowiednio w próbkach 500 MPa i 600 MPa. W 40. dniu szybkość degradacji kwasu askorbinowego w próbkach jujuby traktowanych HPP wynosiła 11,9% (4°C) i 32,1% (15°C). Jednakże szybkość degradacji kwasu askorbinowego w próbkach poddanych obróbce termicznej przechowywanych w temperaturze 4°C i 15°C wyniosła odpowiednio 60,2% i 67,3%. Ponadto wyroby przechowywane w temperaturze 4°C zachowały więcej kwasu askorbinowego niż te przechowywane w temperaturze 15°C, a próbki poddane obróbce HPP zachowały więcej kwasu askorbinowego niż próbki poddane obróbce termicznej. Zdolność przeciwutleniająca próbek traktowanych HPP i TP spadła podczas przechowywania w temperaturach 4°C i 15°C. Jednakże w porównaniu do obróbki wysokociśnieniowej, zabieg termiczny spowodował większą zmianę badanego wyznacznika (28% vs. 42%).

Fernández i in. (2018) przygotowali smoothie o następującym składzie: sok pomarańczowy (59%), jabłka (15%), marchew (15%), liście buraków (6%) i łodygi buraków (5%), który potraktowali HPP (630 MPa przez 6 minut). Początkowo próbki poddane obróbce

charakteryzowały się wyższą zawartością kwasu askorbinowego (około 7%) niż próbki kontrolne. Wraz z czasem przechowywania nastąpił spadek zawartości witaminy C, najprawdopodobniej ze względu na jej utlenienie do kwasu dehydroaskorbinowego i nieodwracalną konwersję do kwasu 2,3-diketogulonowego. Produkty owocowo-warzywne poddane działaniu wysokiego ciśnienia początkowo wykazywały również wyższe wartości zdolności przeciwutleniających (5% w DPPH i 38,8% w metodzie FRAP) w porównaniu z próbką kontrolną. Następnie DPPH stopniowo malało w czasie, ale wartość FRAP nawet po 14 dniach utrzymywała się na poziomie zbliżonym do wartości początkowej.

Zaś Bi i in. (2020) zbadali wpływ obróbki wysokociśnieniowej (HPP) na właściwości fizykochemiczne smoothie z mango i inaktywację znajdujących się w nich mikroorganizmów, przy czym próbę kontrolną stanowił wyrób poddany obróbce cieplnej. Przeprowadzono analizę porównawczą zmian mikrobiologicznych w koktajlach z mango poddanych działaniu HPP pod ciśnieniem 400-600 MPa przez 0-15 minut. Stwierdzono, że całkowita liczba mikroorganizmów oraz liczba drożdży i pleśni uległa istotnej inaktywacji w wyniku wzrostu ciśnienia i czasu obróbki. Zatem wybrano warunki 90°C/20 minut (HT), 500 MPa/8 minut (HPP-500) i 600 MPa/5 minut (HPP-600) jako kolejną próbę sprawdzenia zmian jakości smoothie w czasie przechowywania w temperaturze 4°C przez 15 dni. Stwierdzono, że ogólna liczba drobnoustrojów wzrosła o 3,87, 3,54 i 3,36 log<sub>10</sub> jtk/ml w koktajlach z mango poddanych działaniu odpowiednio HT, HPP-500 i HPP-600, podczas gdy (we wszystkich próbkach) liczba drożdży i pleśni była poniżej granicy oznaczalności. Podczas przechowywania, nie wykazano zmian w lepkości czy barwie w próbkach traktowanych HT i HPP-600, w stosunku do produktów obrabianych przy ciśnieniu 500 MPa. Po obróbce HPP ogólna zawartość karotenoidów była lepiej zachowana w czasie przechowywania niż po procesie HT. Zastosowane techniki utrwalania nie miały wpływu na pH ani na całkowitą zawartość rozpuszczalnych substancji stałych (TSS) w próbkach wyrobów. W badaniu ustalono, że HPP-500 jest w stanie zapewnić zarówno bezpieczeństwo mikrobiologiczne, jak i jakość smoothie z mango skuteczniej niż HT i HPP-600.

Surowe mięso i przetwory mięsne uznawane są za żywność łatwo psującą się, o ograniczonym terminie przydatności do spożycia. Przez wiele lat ze spożyciem skażonego mięsa i produktów mięsnych łączono kilka chorób przenoszonych przez żywność i uznawano je za jedną z głównych przyczyn epidemii (*Salmonelli* czy *Escherichia coli* związanych ze spożyciem produktów z wołowiny) ([www.ecdc.europa.eu/en](http://www.ecdc.europa.eu/en)).

HPP, jako technologia inaktywacji bakterii chorobotwórczych, zapewnia przemysłowi mięsnemu doskonałe i niezawodne narzędzie zapobiegające występowaniu podobnych ognisk bez szkody dla jakości produktu. Niemniej jednak reakcja bakterii chorobotwórczych na zabiegi wysokociśnieniowe jest zmienna i zależy od zastosowanej temperatury. Faktycznie zaobserwowano, że bakterie wykazują największą odporność na ciśnienie w temperaturach pomiędzy 20 a 30°C. Inaktywacja *Escherichia coli* O157:H7 przeprowadzona na mięsie drobiowym wykazała redukcję o 1 log, gdy produkt poddano obróbce pod ciśnieniem 400 MPa i 20°C przez 15 minut. Gdy utrwalanie przeprowadzono pod ciśnieniem 400 MPa i połączono z temperaturą 50°C, uzyskano redukcję o 6 log (Patterson i Kilpatrick, 1998).

Największym wyzwaniem w stosowaniu wysokiego ciśnienia jest inaktywacja zarodników bakterii. Często występują różnice w odpowiedzi na tego typu utrwalanie między różnymi gatunkami i szczepami tego samego gatunku. Na przykład zarodniki *Clostridium*

*sporogenes* w świeżej piersi kurczaka wymagały ciśnienia od 680 MPa przez 1 godzinę, aby osiągnąć odpowiednią (5-log) inaktywację (Crawford i in., 1996), podczas gdy inni naukowcy wykazali, że traktowanie *Clostridium sporogenes* pod ciśnieniem 1500 MPa w medium płynnym doprowadziło jedynie do redukcji o 1,5 log. Uważa się, że zarodniki *Bacillus subtilis*, można zredukować przy zastosowaniu ciśnienia od 100 do 600 MPa (Maggi i in., 1996).

Wśród patogenów przenoszonych przez żywność związanych ze spożyciem mięsa, w tym drobiu poważnym problemem jest *Clostridium perfringens* typu A., która okazała się odporna na ciśnienie rzędu 100-200 MPa. Jednak Aktar i in. (2009) z powodzeniem zastosowali strategię, która obejmowała następujące po sobie etapy: pierwotną obróbkę cieplną (80°C, 10 minut) w celu pasteryzacji i denaturacji białek mięsnych oraz aktywacji zarodników *Clostridium perfringens*, chłodzenie produktu do 55°C przez 20 minut i dalszą inkubację w 55°C przez 15 minut w celu utrzymania korzystnych warunków dla zarodników, a także inaktywację zarodników poprzez obróbkę termiczną pod ciśnieniem (586 MPa w 73°C przez 10 minut). Skuteczność tej strategii wymagała biodostępności L-asparaginy i KCl niezbędnej do szybkiego namnażania się zarodników bakterii (Paredes-Sabja i in., 2007).

W ostatnim czasie ustalono, iż skuteczną kontrolę patogenów odpornych na ciśnienie i organizmów powodujących psucie się mięsa można osiągnąć poprzez połączenie wysokiego ciśnienia z zastosowaniem łagodnej temperatury i/lub środków przeciwdrobnoustrojowych i/lub konkurencyjnej mikroflory (Li i in., 2020; Nema i in., 2022; Rajendran i in., 2022).

Obróbka ciśnieniowa ma także wiele zastosowań wykraczających poza konserwację wyrobów spożywczych, ponieważ wspomaga między innymi procesy zmiękczenia mięsa (Bernardo i in., 2023), denaturacji i solubilizacji białek (Chen i in., 2018), infuzji składników odżywczych (Balakrishna i in., 2020), zamrażania i rozmrażania (Cartagena i in., 2020), co przynosi ogromne korzyści w różnych operacjach przetwarzania żywności. HPP zapewnia także wyjątkową możliwość tworzenia nowych tekstur żywności na bazie białka lub skrobi. W niektórych przypadkach można zastosować ciśnienie w celu wytworzenia żeli białkowych i zwiększenia lepkości produktu bez użycia ciepła. Badania sugerują, że zastosowanie HPP (100-500 MPa) powoduje obniżenie temperatury żelowania skrobi. Zazwyczaj skrobia pęcznieje i traci swoją strukturę oraz krystaliczność po podgrzaniu w wodzie, natomiast struktura ziaren skrobi jest utrzymywana poprzez żelatynizację techniką HPP. Co więcej, po obróbce wysokociśnieniowej żele skrobiowe wykazują lepszą stabilność po przechowywaniu w porównaniu z żelami poddanymi obróbce termicznej. Skrobia traktowana HPP posiadała również lepsze właściwości stabilizacji emulsji i wyższą strawność (Balakrishna i in., 2020; Sim i Moraru, 2020; Larrea-Wachtendorff i in., 2022). W zaskakujący sposób zastosowanie HPP w zakresie od 200 do 300 MPa (w temperaturze otoczenia przez 10 minut), poprawiło cechy jakościowe i wydłużyło okres przydatności do spożycia, przy akceptowalnym wpływie na funkcjonalność (żywność mikroorganizmów probiotycznych *Bifidobacterium bifidum* i *Lactobacillus casei*) jogurtu (Tsevdou i in., 2020).

Przetwórcy żywności powinni jednak przeprowadzić odpowiednie badania walidacyjne. Obróbka wysokociśnieniowa modyfikuje morfologię komórkową mikroorganizmów i uszkadza błony komórkowe, rybosomy i enzymy, w tym te biorące udział w replikacji

i transkrypcji DNA. Jednak niewystarczająca intensywność obróbki ciśnieniowej może zredukować jedynie część populacji drobnoustrojów. Uszkodzone bakterie w żywności przetworzonej HPP mogą następnie zregenerować się podczas przechowywania. Ogólnie rzecz biorąc, bakterie Gram-dodatnie są bardziej odporne na wysokie ciśnienie niż bakterie Gram-ujemne, co można przypisać ich grubszym ścianom komórkowym. Co więcej, obróbka HPP działa odmiennie dla różnych mikroorganizmów, na przykład komórki wegetatywne patogenu są rozrywane pod ciśnieniem 300 MPa w temperaturze pokojowej; formy przetrwalnikowe przy 600 MPa w temperaturze 60-70°C, a niektóre enzymy inaktywowane pod ciśnieniem 300 MPa. Należy jednak pamiętać, że redukcja mikroorganizmów w żywności o wilgotności poniżej 40% jest niewielka. Ze względu na to, produkty poddane tego typu przetwarzaniu powinny być dystrybuowane w warunkach chłodniczych (Wang i in., 2013; Huang i in., 2014; da Silva, 2017; Huang i in., 2017; Sehwat i in., 2021; EFSA, 2022).

Jak każda inna metoda przetwarzania, HPP nie może być uniwersalnie stosowana do wszystkich rodzajów żywności. Pokarmy zawierające pęcherze powietrzne, takie jak pieczywo, ciasta, musy, pianki typu marshmallow, mogą odkształcać się pod wpływem ciśnienia. Ponadto, żywność o niskiej wilgotności, taka jak przyprawy, proszki i suszone owoce również nie nadają się do tego typu utrwalań, ponieważ śmiertelność drobnoustrojów pod ciśnieniem zmniejsza się w warunkach niskiej aktywności wody (Nath i in., 2021; Wason i in., 2021; www.hiperbaric.com).

Podczas obróbki ciśnieniowej objętość żywności i opakowań może zostać zmniejszona o około 15%, jednak po rozhermetyzowaniu powróci do swojej pierwotnej postaci. Stąd też, opakowanie musi być wystarczająco elastyczne, aby wytrzymać przejściowe zmniejszenie objętości pod ciśnieniem, a jednocześnie charakteryzować się wysoką barierowością w stosunku do przenikania wilgoci i tlenu. Produkty HPP są zazwyczaj pakowane próżniowo przy użyciu elastycznych torebek lub pojemników wykonanych z politereftalanu etylenu (PET), polietylen (PE), polipropylen (PP) i kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego (EVOH). Do tego typu przetwarzania nie można stosować butelek szklanych lub puszek blaszanych, ze względu na brak możliwości przekazania ciśnienia na produkt spożywczy (Bull i in., 2010; Júnior i in., 2019; Serment-Moreno i Tonello-Samson, 2020).

Inne ograniczenia obejmują konieczność inwestycji w specjalistyczne urządzenia i dostęp do odpowiedniej infrastruktury. Urządzenia HPP są dość kosztowne i wymagają odpowiedniego zaplecza technicznego. Rozwiązaniem dla producentów, którzy nie chcą ponosić kosztów zakupu własnego urządzenia HPP jest korzystanie z usług paskalizacji.

W porównaniu z tradycyjną technologią obróbki cieplnej, HPP przeprowadza się zazwyczaj w temperaturze pokojowej, co zmniejsza zużycie energii związanej z ogrzewaniem i późniejszym chłodzeniem. Dodatkowo żywność występuje w formie opakowanej i nie ma bezpośredniego kontaktu z urządzeniami przetwarzającymi, co zapobiega wtórnemu zanieczyszczeniu żywności po utrwaleniu. Dzięki zaletom niskiego zużycia energii i niskiego ryzyka powtórnej kontaminacji technologia HPP jest przyjazną dla środowiska (Muntean i in., 2016; Jung i Tonello-Samson, 2018; Cacace i in., 2020).

Najwcześniejszym produktem komercyjnym był szeroko dostępny w Japonii dżem poddany obróbce wysokociśnieniowej. Następnie w Europie i Ameryce Północnej wprowadzono na rynek różne produkty spożywcze HPP. W Czechach dużym zainteresowaniem konsumentów cieszą się soki owocowo-warzywne pod nazwą REFIT (brokułowy z jabłkiem,

marchwiowy, z czarnej rzepy, kapuściany z jabłkiem) utrwalane metodą HPP. Na polski rynek technologia HPP została wprowadzona pioniersko przez firmę Victoria Cymes. Tłoczone na zimno soki, utrwalone tym sposobem i przechowywane w warunkach chłodniczych są zdatne do spożycia nawet do 2 miesięcy. Wysokie ciśnienie działa więc niszcząco na niepożądane mikroorganizmy, jednocześnie zachowując wiele cennych właściwości odżywczych czy smakowych użytych warzyw i owoców. Napoje dostępne są obecnie w sześciu smakach pod nazwami: SUCKES (jabłko, ananas, truskawka i limonka), SZCZĘŚCIE (jabłko, mango, marchew), PASJA (jabłko, ogórek, seler naciowy, nać pietruszki), RADOŚĆ (jabłko, gruszka, wiśnia), ORZEŻWIENIE (jabłko, gruszka, szpinak i mięta), HARMONIA (jabłko, gruszka, borówka) (Chotyakul i Rungpichayapichet, 2018; [www.stavyrefit.cz](http://www.stavyrefit.cz); [www.cymes.pl](http://www.cymes.pl)).

W ostatnich latach coraz większa liczba producentów maszyn na całym świecie angażuje się w badania, rozwój i produkcję sprzętu HPP, co prowadzi do poprawy wydajności produkcji oraz długoterminowej, stabilnej pracy produkcyjnej. Avure Technologies Inc. (USA) i Hiperbaric Espana (Hiszpania), które zdobyły większość udziału w rynku, opracowały urządzenia HPP o pojemności 525 l i rocznej zdolności produkcyjnej około 60 mln ton. Inni znani producenci sprzętu HPP to Quintus Technologies i ThyssenKrupp (Stratakos i in., 2019; Tonello-Samson i in., 2020; Yamamoto, 2021; [www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com](http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com)).

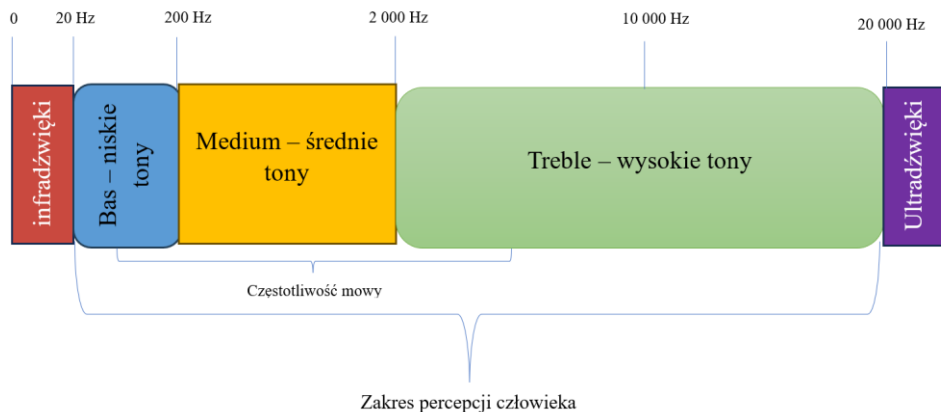
Podsumowując, wydłużenie trwałości produktów poddanych działaniu HPP zależy od parametrów procesu (ciśnienia, temperatury i czasu przetwarzania) oraz własności wyrobów (kwasowości, aktywności wody i składu chemicznego). Ze względu na to, iż HPP nie rozrywa wiązań kowalencyjnych w żywności, ma ograniczony wpływ, w porównaniu z procesami termicznymi, na związki o niskiej masie cząsteczkowej, takie jak związki smakowe, witaminy i barwniki. W rezultacie jakość żywności poddanej działaniu wysokiego ciśnienia jest podobna do świeżych produktów spożywczych, a na pogorszenie jej właściwości sensorycznych, jak i odżywczych większy wpływ ma przechowywanie i dystrybucja po przetworzeniu. Należy również wziąć pod uwagę wybór materiałów opakowaniowych. Co ważne, obróbka ciśnieniowa może wyeliminować lub zmniejszyć potrzebę stosowania syntetycznych dodatków w składzie produktu. Pomaga to przetwórcom żywności zaspokoić zapotrzebowanie konsumentów na produkty o czystej etykietce.

## **6.4. Ultradźwięki - sonikacja**

Nauka o dźwięku jest stale rozwijającą się i obszerną dziedziną wiedzy. Zostało udokumentowane, że już w VI wieku p.n.e., grecki filozof i matematyk Pitagoras opracował matematyczne właściwości instrumentów strunowych. Fale dźwiękowe badano z wielu różnych powodów przez setki lat, ale rozwój ultradźwięków rozpoczął się w 1790 roku wraz z odkryciem echolokacji wykorzystywanej przez nietoperze. Biolog Lazzaro Spallanzani zauważył, że nawet jeśli nietoperz był oślepiony, nadal mógł pewnie latać w przestrzeni, jednakże gdy ogłuchł nawet na jedno ucho, w środowisku eksperymentalnym nie potrafił się bezpiecznie poruszać. Na podstawie tych ustaleń naukowiec postawił hipotezę, że nietoperze podczas nawigacji opierają się na dźwięku, a nie na wzroku. Najbardziej znaczący przełom nastąpił w 1880 roku, kiedy fizyk Pierre Curie i jego brat Jacques Curie

pogłębili swoją wiedzę na temat piroelektryczności, czyli potencjału elektrycznego generowanego przez materiał w odpowiedzi na zmianę temperatury. Zbadali także właściwości struktury kryształu, aby zademonstrować efekt piezoelektryczny, który był nauką podstawą pierwszego przetwornika. Urządzenie to generowało dźwięk o wysokiej częstotliwości, a następnie odbierało jego echo. W 1938 roku Donald Griffin i Robert Galambos ukończyli Harvard University i rozpoczęli badania nad metodą nawigacji nietoperzy, którą następnie nazwali echolokacją w 1944 roku. Podczas pierwszej wojny światowej technologia ultradźwiękowa była przedmiotem szczególnego zainteresowania wojska. Urządzenie sonarowe było pierwszym praktycznym zastosowaniem technologii ultradźwiękowej i piezoelektrycznej, opracowanej do wykrywania zanurzonych łodzi podwodnych.

Potencjał tej gałęzi fizyki i inżynierii obecnie znajduje zastosowanie w wielu różnych dziedzinach. Fale dźwiękowe, czy to słyszalnie, czy o tak wysokiej częstotliwości, że nie są słyszalne przez ludzkie ucho (rys. 17), od lat są przedmiotem ciągłych badań naukowców, inżynierów, lekarzy i indywidualnych przedsiębiorców (Kaproth-Joslin i in., 2015; Ranjha i in., 2021).

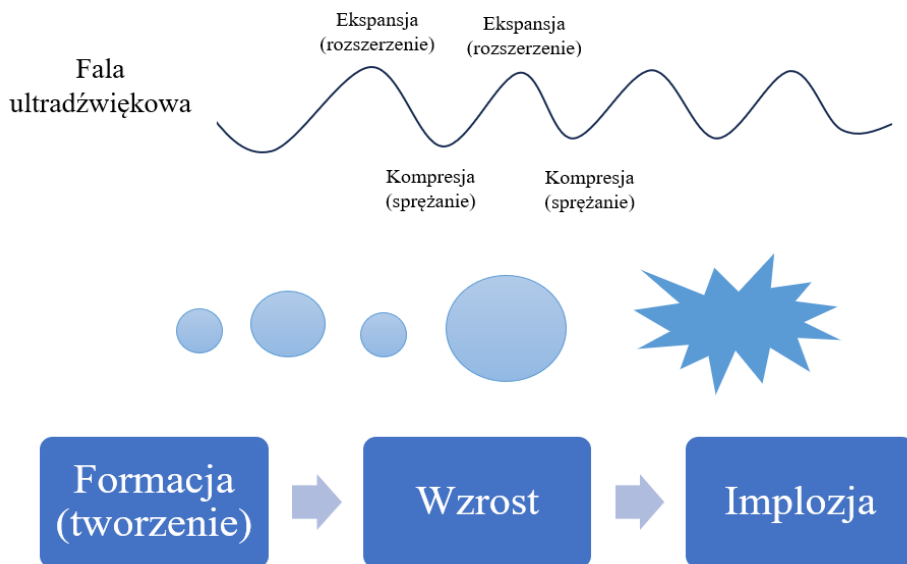


Rys. 17. Rodzaje dźwięków wyróżnione ze względu na ich częstotliwość

Typowe urządzenie ultradźwiękowe składa się z trzech głównych elementów: generatora, przetwornika i emitera. Generator przekształca sygnał elektryczny na określoną częstotliwość; przetwornik zmienia ten sygnał elektryczny o wysokiej częstotliwości w drgania mechaniczne, natomiast emiter generuje i wypromieniowuje drgania mechaniczne (Dolotowski i Stasiak, 2003; Mehta i in., 2022).

Funkcjonalność aparatu ultradźwiękowego opiera się na wytwarzaniu i uwalnianiu fal ultradźwiękowych o dużym natężeniu, przekraczającym częstotliwość 16 kHz. Operacje można prowadzić przy małej mocy ( $<1 \text{ W/cm}^2$ ), skorelowanej z wysoką częstotliwością (100 kHz lub wyższą), jak również przy dużej mocy ( $>1 \text{ W/cm}^2$ ), obejmującej niskie częstotliwości 20-100 kHz (Huang i in., 2020; Chavan i in., 2022). Tego typu parametry pozwalają w głównej mierze na dezaktywację mikroorganizmów (Pinela i in., 2019; Onyeaka i in., 2023). Generalnie skuteczność dekontaminacji wiąże się z procesem kawitacji, obejmującym powstawanie, powiększanie i zapadanie się pęcherzyków (Koshani i Jafari, 2019).

Emitowane fale ultradźwiękowe indukują naprzemienne strefy kompresji i rozszerzania. W cyklu sprężania cząstki są odpychane od siebie pod wpływem dodatniego ciśnienia wywieranego w środku (rys. 18).



Rys. 18. Przebieg procesu kawitacji ([www.kierunekpompy.pl](http://www.kierunekpompy.pl))

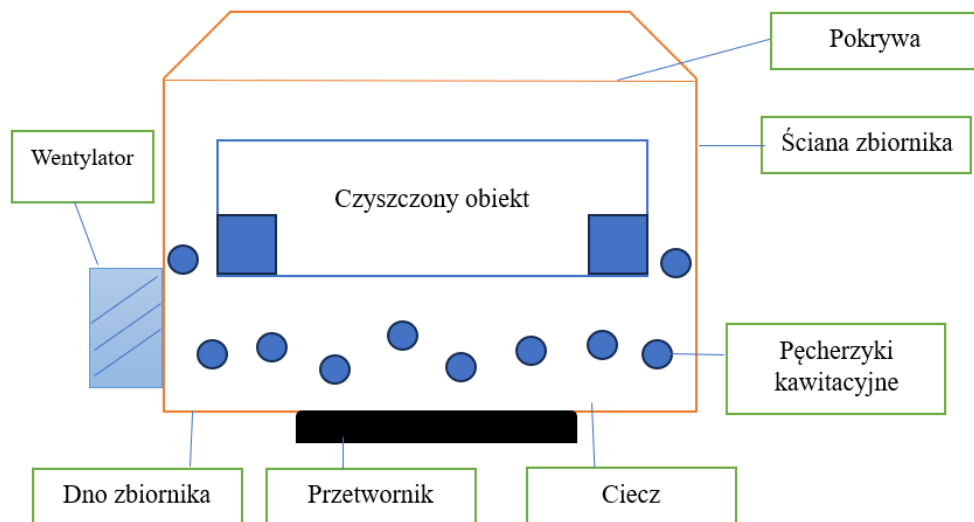
Dodatkowo generowane są wolne rodniki, takie jak  $H^+$  i  $OH^-$ , które dyfundują do pęcherzyków, uwalniając się po zapadnięciu (Dai i in., 2020). Podczas wytwarzania ultradźwięków, pojawiają się naprężenia mechaniczne, a także następuje dyssypacja energii wraz z całą gamą zjawisk pochodnych, a w szczególnych przypadkach, tak zwany rezonans komórkowy (Vernes i in., 2019; Córdova i in., 2020).

Na rysunku 19 przedstawiono schemat budowy myjki ultradźwiękowej, która służy głównie do skutecznego oczyszczania i utrzymania higieny podczas procesów przetwarzania produktów spożywczych.

Składa się ona z kilku kluczowych elementów, czyli zbiornika, przyjmującego postać wanny i pełniącego rolę komory roboczej, w którym odbywa się proces sonikacji. Kolejno generatory, przekształcającego standardowy prąd elektryczny na prąd o ultradźwiękowej częstotliwości, dostarczany do przetwornika. Ta część myjki ultradźwiękowej odpowiada za przetwarzanie energii elektrycznej w fale ultradźwiękowe. Przetwornik generuje fale o wysokiej częstotliwości, które tworzą obszary wysokiego i niskiego ciśnienia w cieczy, co inicjuje proces sonikacji. Podgrzewacz, umożliwi utrzymywanie roztworu w odpowiednio wysokiej temperaturze. Timer tradycyjnie pozwala na ustawienie czasu trwania cyklu czyszczenia, zaś zawór spustowy ułatwia opróżnianie zużytego płynu po zakończeniu cyklu mycia. Pokrywy, stosowane w zależności od potrzeb procesów, zapobiegają parowaniu roztworu czyszczącego oraz zmniejszaniu hałasu generowanego przez fale ultradźwiękowe. Inna część, czyli wentylator zapobiega przegrzewaniu się urządzenia podczas



długotrwałych cykli pracy. Dzięki panelowi sterowania użytkownik może dostosowywać różne ustawienia, takie jak czas trwania cyklu, temperaturę obróbki itp. (He i in., 2021; Starek i in., 2021; Yusoff i in., 2022; Kobus i in., 2023).

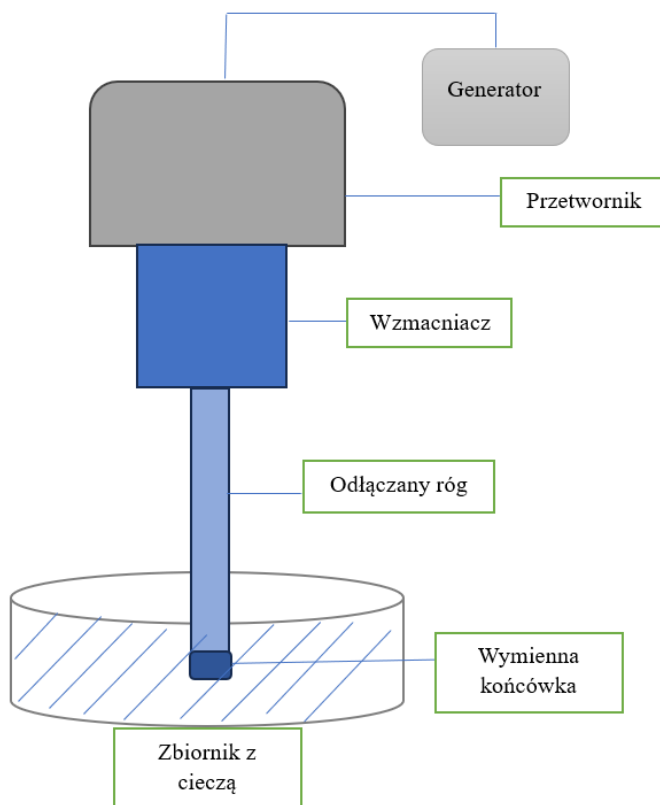


Rys. 19. Schemat myjki ultradźwiękowej

Sonda ultradźwiękowa to wyspecjalizowane urządzenie używane do przykładania wibracji ultradźwiękowych bezpośrednio do próbek (rys. 20) (Shen i in., 2019). Składa się ona z różnych elementów, w tym generatora, wytwarzającego sygnały elektryczne o określonej częstotliwości, które są następnie przekazywane do przetwornika ultradźwiękowego. Ta część z kolei przekształca energię elektryczną w wibracje mechaniczne o stałej częstotliwości, zwykle 20 kHz. Natomiast sonda przekazuje energię ultradźwiękową do próbki, a booster służy do zwiększenia intensywności wibracji ultradźwiękowych (Bhatta i in., 2018; Kobus i in., 2023).

Poza konstrukcją urządzeń ultradźwiękowych, na skuteczność działania tego typu przetwarzania wpływ ma stopień odporności drobnoustrojów na zadane parametry obróbki. Zarodniki trudniej wyeliminować w porównaniu do form wegetatywnych, znów bakterie Gram-dodatnie wykazują większą odporność na działanie ultradźwięków niż bakterie Gram-ujemne (Alarcon-Rojo i in., 2019; Nunes i in., 2022). Wiąże się to z grubością i strukturą ich ścian komórkowych. Dodatkowo obecność mostków międzypeptydowych lub krzyżowych wiązań bezpośrednich w peptydoglikanie ścian komórkowych bakterii warunkuje stopień ich usieciowania. W przypadku bakterii Gram-dodatnich wynosi on blisko 100%, zaś gorzej usieciowana jest ściana bakterii Gram-ujemnych (20-30%). Z kolei chemiczne związki wielkocząsteczkowe w polu ultradźwiękowym mogą ulegać przyśpieszonej degradacji i depolimeryzacji. Ultradźwięki mogą katalizować lub wywoływać reakcje, w których wyniku powstają nowe, złożone związki chemiczne. Zatem na całokształt zjawisk i efektów wynikających z oddziaływania fal ultradźwiękowych wpływać będą

parametry pola ultradźwiękowego (między innymi częstotliwość fal ultradźwiękowych, natężenie) oraz początkowe cechy fizykochemiczne materiałów (struktura i skład).



Rys. 20. Schemat sondy ultradźwiękowej

Istnieje wiele doniesień naukowych, które informują o pozytywnym wpływie tej nietermicznej metody obróbki na różne produkty spożywcze. Na przykład, Ruiz-De Anda i in. (2019), analizowali wpływ mocy ultradźwięków na właściwości fizykochemiczne i mikrobiologiczne mieszanki świeżego soku pomarańczowego i selera. Próbkę napojów zostały poddane sonikacji w kąpeli ultradźwiękowej (20 kHz,  $5,57 \pm 0,87$  kW/m<sup>3</sup>,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) przez różne okresy czasu: 0, 15, 30, 45, 60, 75 i 90 minut. W ten sposób obrobione wyroby przechowywano w zaciemnionym miejscu przez 24 godziny w temperaturze  $4^\circ\text{C}$ . Uzyskane wyniki wskazują, że obróbka ultradźwiękowa miała istotny wpływ na jakość soków już po najkrótszym czasie sonikacji (15 minut). Najlepsze wyniki osiągnięto jednak po 45 minutach działania ultradźwięków, gdzie zaobserwowano 13% wzrost zawartości polifenoli ogółem, dwukrotny wzrost zawartości flawonoidów oraz 17% wzrost aktywności antyoksydacyjnej. Zastosowana technika nie wpłynęła na wartości pH, kwasowości miareczkowej i rozpuszczalnych substancji stałych. Początkowa ilość tlenowych bakterii mezofilnych

w soku kontrolnym wynosiła  $4,47 \pm 0,02$  jtk/ml, natomiast drożdży i pleśni  $2,53 \pm 0,05$  jtk/ml. W końcowym czasie obróbki (90 minut) nastąpiło zmniejszenie rozpatrywanych mikroorganizmów, osiągając procent inaktywacji wynoszący odpowiednio 8% i 13%.

Badano również (Hasheminya i Dehghannya, 2022) wpływ procesu ultradźwiękowego (0, 4, 8 i 12 minut, 24 kHz) na cechy jakościowe świeżo tłoczonego soku z czarnej marchwi podczas przechowywania przez 15 dni w temperaturze otoczenia. Ustalono, iż zastosowana obróbka pozwoliła na zwiększenie ogólnej zawartości polifenoli, kwasu askorbinowego i właściwości przeciwutleniających. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego wykazały bardziej nieregularną strukturę komórek ze zwiększoną liczbą dziur i mikroskopijnych kanałów w sokach poddanych obróbce ultradźwiękowej, co mogło przyczynić się do zwiększenia transferu tych dobroczynnych związków do homogenatu napoju. W przypadku pH, całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych ( $^{\circ}$ Brix), lepkości i zmętnienia próbek poddanych działaniu ultradźwięków nie zauważono znaczących zmian. Ogólna liczba drobnoustrojów, w tym drożdży i pleśni pod wpływem sonikacji wykazała znaczny spadek. Co ważne, podczas przechowywania efekt dekontaminacyjny został utrzymany, dzięki kawitacji, prowadzącej do wzrostu przepuszczalności i osłabienia błony komórkowej mikroorganizmów (Chitgar i in., 2017). Siły ścinające powstałe w wyniku ruchu pęcherzyków lub lokalne zmiany temperatury i nagły wzrost ciśnienia w wyniku marszczenia się pęcherzyków mogły być główną przyczyną przerwania komórek. Co więcej, wolne rodniki powstałe w wyniku sonolizy cząsteczek wody obecnych w sokach są współodpowiedzialne za powodowanie uszkodzeń oksydacyjnych, rozbijanie ścian komórkowych drobnoustrojów i hamowanie wzrostu drobnoustrojów poprzez inaktywację aktywności enzymatycznej mitochondriów (Kobus i in., 2023).

Kalsi i in. (2023) określili natomiast wpływ sonikacji na jakość soku z guawy poddane obróbce przy stałej częstotliwości 40 kHz i mocy ultradźwięków wynoszącej 200 W dla różnych czasów przetwarzania (2, 6 i 10 minut) w łaźni ultradźwiękowej. Po obróbce wartości pH i kwasowości miareczkowej różniły się nieistotnie, natomiast 6-minutowa sonikacja skutkowała znacznym spadkiem całkowitych rozpuszczalnych substancji stałych. Wartość zmętnienia, parametry barwy ( $a^*$  i  $b^*$ ), wzrosły po tym czasie, natomiast brązowienie nieenzymatyczne uległo znacznemu zmniejszeniu. Ponadto obróbka ultradźwiękowa znacząco zwiększyła ilość kwasu askorbinowego (2,45%-4,70%) i ogólną zawartość polifenoli (3,50-4,35%), niezależnie od czasu przetwarzania. Zastosowana metoda utrwalania miała również znaczący wpływ na inaktywację ogólnej liczby drobnoustrojów oraz drożdży i pleśni, wynoszącą odpowiednio 38,18% i 33,20% po 10 minutach traktowania. Test sensoryczny wykazał, że sonikowane próbki soku z guawy charakteryzowały się dobrą akceptacją, podobnie jak świeży sok.

Zespół Margean'a (2020) analizował wpływ pasteryzacji (80°C, 2 minuty) i obróbki ultradźwiękowej dużej mocy (o amplitudzie 50% i 70% przez 5 i 10 minut) na jakość soku z czerwonych winogron. Badania obejmowały oznaczenia fizykochemiczne, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości związków polifenolowych czy kwasu L-askorbinowego. Ponadto, autorzy zweryfikowali próbki pod względem mikrobiologicznym. Wyniki analiz wykazały, że napoje poddane pasteryzacji i sonikacji przez 10 minut z amplitudą 70% miały podobny poziom ogólnej zawartości polifenoli. Natomiast sonikowany sok wyróżniał się wyższą zawartością kwasu L-askorbinowego w porównaniu z sokiem utrwalonym termicznie. Podobne wyniki uzyskano w przypadku pH, całkowitej zawartości rozpuszczalnych

substancji stałych oraz kwasowości miareczkowej. Przeprowadzone analizy wskazały również, że sonikacja wpływała na inaktywację mikroorganizmów, co może stanowić alternatywną metodę zastępując tradycyjną pasteryzację w przemyśle sokowniczym. Ponadto, udowodniono, że w porównaniu z pasteryzacją, zabiegi ultradźwiękowe o amplitudzie 70% były bardziej efektywne niż te z amplitudą 50% pod względem inaktywacji rozpatrywanych drobnoustrojów. Generalnie autorzy pracy ustalili, że dla osiągnięcia wyższego poziomu flawonoidów, takich jak rutyna, kwercetyna, epikatechina, kempferol i resweratrol, zalecana jest obróbka z amplitudą 70% przez 5 minut. Natomiast proces ultradźwiękowy prowadzony przy amplitudzie 70% przez 10 min okazał się najskuteczniejszy w redukcji mikroorganizmów oraz osiągnięciu najwyższej zawartości kwasu L-askorbinowego i polifenoli ogółem, w tym kwasów hydroksycynamonowych (ferulowego i kawowego).

Sonikacji przy mocy 100 W i 140 W (przez 5, 10 i 15 minut) oraz obróbce cieplnej w temperaturach 70°C, 80°C i 90°C (przez 1 minutę) poddano również sok ananasowy. Wyniki wykazały niewielkie zmiany we właściwościach fizykochemicznych po sonikacji i obróbce termicznej, jednak obróbka z wykorzystaniem ultradźwięków pozwoliła lepiej zachować barwę napoju, w tym ograniczyć stopień zbrązowienia (browning index-BI). Co więcej, sonikacja znacząco zwiększyła zawartość związków bioaktywnych (całkowitą zawartość karotenoidów, polifenoli oraz kwasu askorbinowego) oraz aktywność przeciwutleniającą soku ananasowego w porównaniu z sokiem poddanym obróbce cieplnej. Chociaż wraz ze wzrostem czasu ekspozycji zmiany mikrobiologiczne zostały znacznie ograniczone, nie uzyskano całkowitej inaktywacji mikroorganizmów, tak jak podczas pasteryzacji (Hoque i in., 2024).

Choo i in. (2022) wskazują natomiast, że niezależnie od metody przetwarzania soku z owoców noni, czyli działaniu ultradźwięków przez 60 minut w stałej temperaturze 30°C i częstotliwości 37 kHz czy pasteryzacji w temperaturze 90°C przez 60 sekund poziom drobnoustrojów może mieścić się w zadowalającym zakresie. Przez 8 tygodni przechowywania w lodówce (4°C) nie wykryto drożdży i pleśni, podczas gdy całkowita liczba tlenowych bakterii mezofilnych utrzymywała się na poziomie poniżej  $10^4$  jtk/ml, co wskazuje, że sok nadawał się do spożycia. Jednak co ważne, w porównaniu ze świeżą próbką (kontrolną, niepoddaną obróbce), ilość kwasu jabłkowego i askorbinowego uległa zwiększeniu w próbce sonikowanej, ale została obniżona w próbce pasteryzowanej.

Zadawalające rezultaty badań uzyskali również Khandpur i Gogate (2016), kiedy oceniali skuteczność działania ultradźwięków w przetwarzaniu soków z pomarańczy, słodkiej limonki oraz marchwi i szpinaku, pod kątem wzrostu mikroorganizmów i zmian parametrów jakościowych podczas przechowywania. Jako optymalne parametry procesu przyjęli pracę ze stałą częstotliwością wynoszącą 20 kHz przez 15 minut w temperaturze poniżej 30°C.

Bhat i in. (2011) świeżo wyciśnięty sok z owoców limonki kasturi poddali obróbce ultradźwiękowej przez 0, 30 i 60 minut w temperaturze 20°C i częstotliwości wynoszącej 25 kHz w celu oceny mikrobiologicznej produktu poprzez analizę ogólnej liczby drobnoustrojów oraz drożdży i pleśni. Po 60 minutach przetwarzania uzyskali znaczącą redukcję większości drobnoustrojów w porównaniu z próbkami traktowanymi przez 30 minut i próbkami kontrolnymi (nietraktowanymi) wraz z osiągnięciem standardów bezpieczeństwa i jakości produktu finalnego-do 5 log redukcji, co jest obowiązkowym poziomem ustalonym przez FDA dla soków owocowych i warzywnych.

Sonikacyjna jest techniką przetwarzania, która charakteryzuje się zdolnością do dezaktywacji mikroorganizmów w płynnych produktach, unikając jednocześnie powszechnych skutków ubocznych związanych z tradycyjną obróbką cieplną. Potwierdzeniem tego są badania Monteiro i in. (2018), którzy przeprowadzili obróbkę ultradźwiękową o wysokiej intensywności ( $0,3-3,0 \text{ kJ/cm}^3$ ) jako alternatywę dla tradycyjnej, krótkotrwałej pasteryzacji w wysokiej temperaturze (HTST;  $72^\circ\text{C}$ ; 15s) dla czekoladowego napoju mlecznego. Stosując ultradźwięki przy gęstości energii  $3,0 \text{ kJ/cm}^3$ , uzyskano redukcję całkowitej liczby tlenowych bakterii mezofilnych o 3,56 log. Dodatkowo, zastosowany proces ultradźwiękowy wpływał na cechy fizyczne napoju, takie jak rozkład wielkości kuleczek tłuszczu, reologię, a także na właściwości chemiczne, w tym aktywność przeciwtleniającą czy profil kwasów tłuszczowych. Stosowanie sonikacji tego typu jako nietermicznej metody utrwalaenia napoju, okazało się skuteczniejsze niż konwencjonalna pasteryzacja HTST. Poprawiła się jakość mikrobiologiczną, a także zachowały się związki bioaktywne i wartość odżywcza wyrobu.

Ze względu na to, że mięso należy do szybko psujących się produktów, coraz chętniej podlega utrwaleniu poprzez sonikację. Piñon i in. (2019) próbki mięsa kurczaka poddali różnym zabiegom ultradźwiękowym (20 kHz i  $27,6 \text{ W/cm}^2$ ; 40 kHz i  $10,3 \text{ W/cm}^2$ ; 850 kHz i  $24,1 \text{ W/cm}^2$ ). Analizę liczby drobnoustrojów przeprowadzono przed zastosowaniem obróbki ultradźwiękowej, bezpośrednio po niej oraz po siedmiu dniach przechowywania w temperaturze  $4^\circ\text{C}$ . Wyniki wskazują, że ultradźwięki o wysokiej intensywności pomagają hamować rozwój bakterii kwasu mlekowego oraz bakterii mezofilnych i psychrofilnych obecnych w mięsie kurcząt przy poziomach częstotliwości ultradźwięków zastosowanych w tym badaniu. Podczas użycia sondy ultradźwiękowej o częstotliwości 20 kHz i mocy  $27,6 \text{ W/cm}^2$  liczba bakterii mezofilnych uległa większej redukcji, w porównaniu do zabiegu z większą częstotliwością i mniejszą intensywnością. Dlatego tego typu zabiegi mogą być przydatne w utrwalaeniu produktów mięsnych i tym samym odgrywać ważną rolę w przemyśle spożywczym.

W ostatnim czasie nastąpił postęp techniki ultradźwiękowej w zakresie zależności pomiędzy modyfikacją struktury, a właściwościami funkcjonalnymi białek spożywczych. Wyniki badań wykazały (Gómez-Salazar i in., 2021; Chen i in., 2022), że proces sonikacji znacząco wpływa na konformację i strukturę białek poprzez efekt kawitacji, powodując poprawę rozpuszczalności, lepkości, żelowania itp. Podczas przetwarzania mięsa tym sposobem można modyfikować strukturę, a tym samym poprawiać właściwości funkcjonalne białka miofibrylarnego, prowadząc do poprawy jakości, rozwoju produktów o niskiej zawartości tłuszczu i/lub soli oraz wydłużenia okresu przydatności do spożycia. Zou i in. (2018) udowodnili, że rozpuszczalność i hydrofobowość powierzchniową aktomiozyny z kurczaka można znacznie poprawić poprzez obróbkę ultradźwiękową w zakresie  $1,15-2,36 \text{ W/cm}^2$ , podczas gdy polimery białkowe mogą tworzyć się przy intensywności wynoszącej  $11,43 \text{ W/cm}^2$ , prowadząc do zmniejszenia rozpuszczalności białka i hydrofobowości powierzchni. Dlatego sugeruje się, że grupy hydrofobowe wbudowane w białko można „odsłonić” poprzez umiarkowaną sonikację poprawiając hydrofobowość białka i interakcję białko-woda (Deng i in., 2021). Warto zauważyć, że nadmierna obróbka może powodować denaturację i agregację białek i skutkować utratą ich rozpuszczalności (Kang i in., 2021).

Fale ultradźwiękowe stosowane w badaniach ryb to zazwyczaj fale o wysokiej energii i niskiej częstotliwości w zakresie 20-100 kHz. Mikš-Krajnik i in. (2017), badali przeciw-

drobnoustrojowe działanie ultradźwięków w stosunku do filetów z łosia. Wyniki wykazały różne skutki dla każdego mikroorganizmu; *Listeia monocytogenes* i bakterie z grupy coli uległy zmniejszeniu odpowiednio o 0,4 i 0,3 log jtk/g, podczas gdy nie zaobserwowano znaczącego zmniejszenia całkowitej liczby bakterii oraz drożdży i pleśni. Jako przyczynę tych różnic spekulowano obecność nierówności na powierzchni filetu rybnego. W zakresie wskaźników jakościowych zaobserwowano podwyższoną wilgotność i nieznaczną zmianę barwy.

Co więcej, w przemyśle rybnym sugeruje się stosowanie ultradźwięków do odkażania noży używanych podczas operacji cięcia. Można to postrzegać jako kompleksowe podejście do poprawy jakości produktów rybnych (Brasil i in., 2017).

Połączenie ultradźwięków z innymi metodami przetwarzania zwiększa ich skuteczność działania, przy czym preferowane kombinacje obejmują termosonikację (Sotelo-Lara i in., 2023), a także zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego i ultradźwięków (Ostermeier i in., 2021) czy ozonowania i sonikacji (González-Balderas i in., 2020).

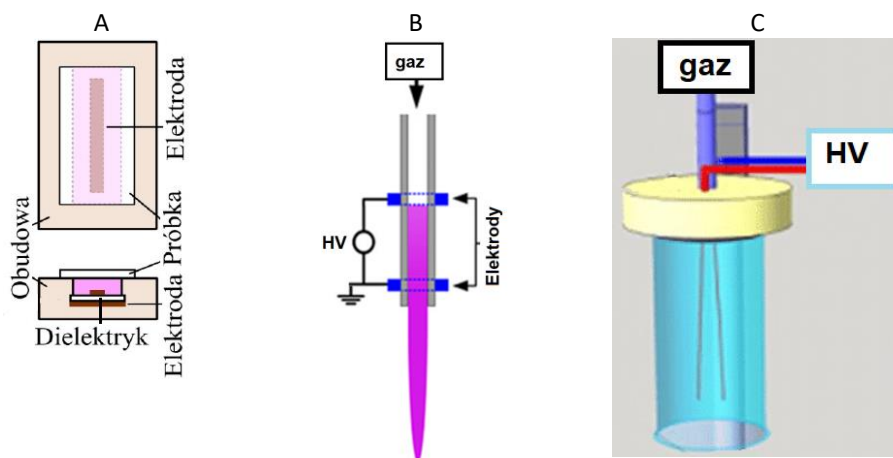
Biorąc pod uwagę znaczny potencjał technologii ultradźwiękowej, wydaje się, że jest ona obiecująca w zakresie zachowania jakości produktów rolno-spożywczych. Zalety tego podejścia wiążą się ze skróceniem czasu przetwarzania, skuteczną inaktywacją enzymów i mikroorganizmów oraz stabilnością składników bioaktywnych podczas przechowywania. Tego typu obróbka może skrócić czas przetwarzania, w porównaniu do tradycyjnych technologii. Sonikację charakteryzują niskie koszty operacyjne ze względu na niewielkie zużycie energii, dlatego też uznawana jest za zieloną technologię (More, i in., 2022; Nonglait i in., 2022).

## 6.5. Plazma nietermiczna

Plazma to zjonizowany gaz, w którym występują swobodne nośniki ładunków elektrycznych: jony dodatnie i elektrony (przy czym ładunek wypadkowy jest równy zeru) oraz szereg innych potencjalnie użytecznych w obróbce materiałowej czynników, takich jak aktywne formy tlenu i azotu, promieniowanie w różnym zakresie spektrum zaś przepływ gazu może powodować naprężenia materiału.

Plazma do celów przemysłowych generowana jest w reaktorach plazmowych zwanych plazmotronami, o różnej konstrukcji, zazwyczaj pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym lub obniżonym. Wyładowania elektryczne (na przykład iskrowe, barierowe, koronowe, ślizgowe) mogą być wytwarzane przez zmienne, impulsowe i stacjonarne pola elektryczne. Stosuje się też inne układy zasilania, wykorzystujące m.in. mikrofałę, częstotliwości radiowe i sprzężenia indukcyjne bądź pojemnościowe układu (Brandenburg i in., 2018).

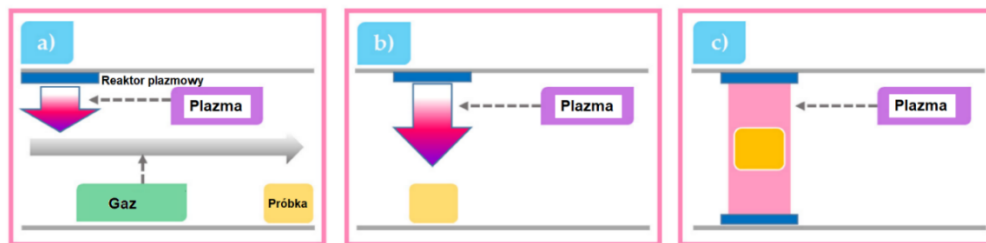
Przykłady reaktorów plazmowych (płaskiego, typu dysza plazmowa oraz typu glide arc) umieszczono na rysunku 21.



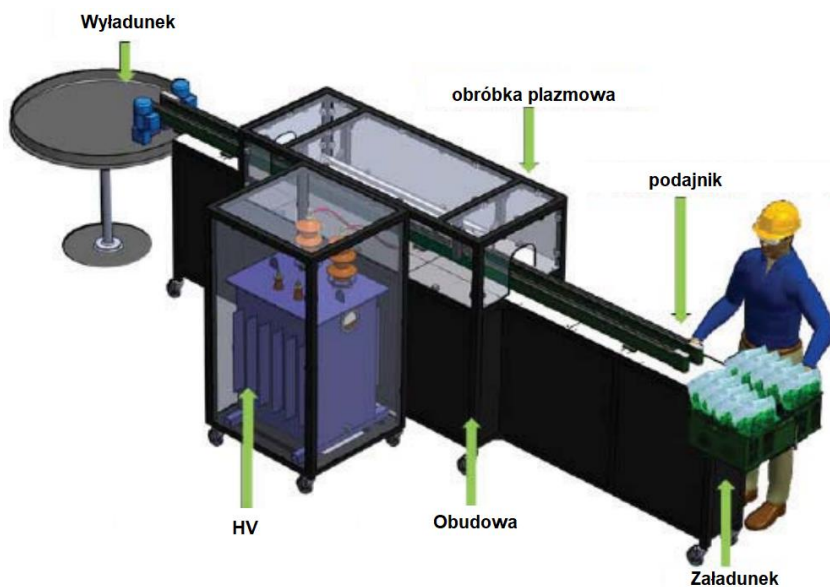
Rys. 21. Przykłady reaktorów plazmowych (A – reaktor płaski, B – dysza plazmowa, C – reaktor typu glide-arc)

W ciągu ostatniej dekady dokonano znacznych postępów umożliwiając generowanie plazmy nierównowagowej o niskiej temperaturze pozwalającej na obróbkę materiałów biologicznych, w tym żywności. W plazmotronach wykorzystuje się różne gazy substratowe, w tym również gazy szlachetne, takie jak argon i hel, jednak względy ekonomiczne przesądają o większym potencjale konstrukcji, które pozwalają na wykorzystanie powietrza atmosferycznego. Gazy plazmowane zawierające reaktywne pochodne tlenu lub azotu np.:  $O_2^-$ ,  $^1O_2$ ,  $O_3$ ,  $^{\bullet}OH$ ,  $NO^{\bullet}$ , i  $NO_2^{\bullet}$  wykazały swą skuteczność dekontaminacyjną, w tym zdolność do rozkładu zanieczyszczeń biologicznych (komórek i spor bakteryjnych, kapsydów wirusowych, prionów, drożdży, pleśni i biofilmów) oraz chemicznych (związki wielkocząsteczkowe np. leki, pestycydy, pigmenty, surfaktanty) (Pawłat, 2013). Wykorzystywane są do oczyszczania gazów odlotowych, wody, ścieków i gleby. Plazma może wpływać na powinowactwo powierzchni do wody, służy do aktywacji i obróbki powierzchni, na przykład w przemyśle półprzewodnikowym. W medycynie prowadzone są badania między innymi nad wykorzystaniem plazmy niskotemperaturowej w terapii trudno gojących się ran, chorób skóry, nowotworów; do stymulacji komórek, w produkcji materiałów biokompatybilnych oraz do dekontaminacji soczewek, implantów, ciała oraz pomieszczeń, narzędzi, a także sprzętu medycznego (Przekora i in., 2009; Przekora i in., 2020). W rolnictwie plazma znalazła zastosowanie między innymi do stymulacji kiełkowania nasion i wzrostu roślin, leczenia chorób roślin i zwierząt, kondycjonowania gleby oraz obróbki produktów rolnych (Pawłat i in., 2018a; 2018b; Kopacki i in., 2021).

Obróbka plazmowa, podczas której dochodzi do synergicznego oddziaływania wielu mechanizmów uważana jest za pro-ekologiczną technologię przyszłości, elastyczną i pozwalającą na jej samodzielne wykorzystanie lub w przypadku bardziej złożonych procesów wytwórczych - wkomponowanie jako etapu.



Rys. 22. Schematyczny przegląd powszechnie stosowanych systemów zimnej plazmy atmosferycznej rozważanych do zastosowania w przemyśle spożywczym: A – obróbka pośrednia (zdalna), gdzie próbka jest fizycznie oddzielona od punktu generowania plazmy; B – plazmowanie quasi-bezpośrednie, gdzie próbka jest umieszczona blisko elektrod generujących plazmę i omywa ją strumień gazu produktowego oraz C – plazmowanie bezpośrednie, gdzie próbka jest umieszczona między elektrodami generującymi plazmę (Hojnik i in., 2017)



Rys. 23. Prototypowe urządzenie SAFE BAG (Ziuzina i in., 2016)

Próbka może być poddana obróbce plazmowej w sposób bezpośredni, będąc umieszczoną w obszarze generowania plazmy pomiędzy elektrodami (rys. 22). Można poddać ją działaniu gazu plazmowanego umieszczając w bardzo bliskiej odległości od wylotu gazu dyszy plazmowej/obszaru generowania plazmy. Można też dokonać obróbki pośredniej poprzez użycie mediów poddanych wcześniej działaniu plazmy w fazie gazowej lub ciekłej (Pawlat, 2013; Hojnik i in., 2017). W ciekłym medium plazmowanym, np. wodzie destylowanej pod wpływem czynników generowanych w gazie, dyfundujących do cieczy



i podlegających w niej różnym przemianom chemicznym powstają w wyniku kaskady różnych reakcji chemicznych wtórne czynniki aktywne np. azotany, azotyny czy bardzo reaktywny nadtlenoazotyn (Brisset i Pawłat, 2016; Bruggeman i in., 2016). Ciecz plazmowa oprócz zastosowań w myciu, płukaniu czy namaczaniu można też rozpylić w formie kropel, aerozolu lub mgły.

W przemyśle rolno-spożywczym media plazmowane wykorzystywane są do pośredniej obróbki produktów, dekontaminacji warzyw, owoców, powierzchni, opakowań, sprzętu, narzędzi i linii podawczych.

Dasan i in. (2017) badali wpływ plazmy generowanej w mikroreaktorze ze ślizgającym się łukiem elektrycznym na dezynfekcję powierzchni ze stali nierdzewnej (SS), silikonu (Si) i poli(tereftalanu) etylenu (PET), sztucznie zanieczyszczonych bakteriami *Escherichia coli* ( $8,15 \pm 0,28$  log jtk/ml) oraz *Staphylococcus epidermidis* ( $6,18 \pm 0,21$  log jtk/ml). Gazami plazmotwórczym były mieszanka azotu (79%/21%) lub azot, czas obróbki wynosił od 1 do 10 minut. Znaczne redukcje ładunku mikroorganizmów:  $3,76 \pm 0,28$ ,  $3,19 \pm 0,31$  i  $2,95 \pm 0,94$  log jtk/ml w przypadku *S. epidermidis* oraz  $2,72 \pm 0,82$ ,  $4,43 \pm 0,14$  i  $3,18 \pm 0,96$  log jtk/ml dla *E. coli*, odpowiednio na powierzchniach SS, Si i PET, osiągnięto po 5 minutach plazmowania azotem, przy czym nie zaobserwowano degradacji materiału.

Toyokawa i in. (2017) opracowali plazmowy podajnik rolkowy w oparciu o wyładowanie barierowe. Obracające się, pokryte warstwą dielektryka rolki stanowiły elektrody wysokonapięciowe i uziemiające. Modelowym patogenem było *Xanthomonas campestris* naniesione na płyty aluminiowe i liście sałaty. Podajnik wykorzystano do inaktywacji *Penicillium venetum* i *Aspergillus brasiliensis* na powierzchni owoców cytrusowych (*Citrus unshiu* × *C. sinensis*, *C. natsudaidai*, *C. unshiu*), lub na kontrolnej płycie aluminiowej (Sakudo i Yagyu, 2021).

Podejmowano również próby dezynfekcji żywności bezpośrednio w zamkniętych szczelnie opakowaniach, co wpłynęło na wydłużenie czasu przechowywania produktu oraz zapobiegło ponownemu zanieczyszczeniu żywności (Katsigiannis i in., 2022).

Ziuzina i in. (2016) zbadali poziom dekontaminację pomidorów koktajlowych zapakowanych w folię PET wypełnioną powietrzem z kolonii *Escherichia coli* i *Listeria innocua* w prototypowym urządzeniu SAFE BAG (rys. 23) z wyładowaniem barierowym, pracującym w trybie ciągłym lub cyklicznie. Osiągnięto spadek liczby kolonii *E. coli* w czasie 150 s obróbki o ponad 5 log., zarówno w trybie statycznym, jak i ciągłym. *L. innocua* wykazywała większą odporność, osiągając maksymalny spadek o 3,5 log, przy czym nie zaobserwowano istotnej różnicy w barwie, twardości, pH ani całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych (TSS) między próbkami kontrolnymi, a tymi poddanymi obróbce plazmowej. Wykazano również skuteczność w hamowaniu wzrostu aerobowych bakterii mezofilnych, drożdży i pleśni w przypadku obróbki krojonych gruszek plazmą generowaną wewnątrz opakowania (Zhang i in., 2021).

Zbadano dekontaminację plazmą pod ciśnieniem atmosferycznym obracającego się narzędzia tnącego używanego do krojenia w przemyśle mięsnym, zanieczyszczonego bakterią *Listeria innocua* (zamiast chorobotwórczej *Listeria monocytogenes*). Ostrze narzędzia stanowiło elektrodę uziemiającą. Po 340 sekundach obróbki otrzymano 5-logarytmową redukcję kolonii bakteryjnych (Leipold i in., 2010), przy czym temperatura narzędzia tnącego nie przekroczyła 30°C.

Pracę nad plazmowymi reaktorami ze złożem fluidalnym do obróbki orzechów laskowych prowadzili Dasan i in. (2017). Badali wpływ gazów substratowych (powietrze, azot) oraz średnicy reaktora i parametrów elektrycznych na inaktywację spor będących źródłami aflatoksyn: *Aspergillus flavus* i *Aspergillus parasiticus* naniesionych na orzechy. W czasie najskuteczniejszej, 5 minutowej obróbki powietrzem uzyskano spadek liczby kolonii *A. flavus* (4,17 log) i *A. parasiticus* (4,09 log). Całkowita inaktywacja naturalnej mikroflory orzechów laskowych została uzyskana po 2 minutach ekspozycji na działanie plazmy. Nie wykazano aktywności spor podczas przechowywania w temperaturze 25°C przez 30 dni. Efektywność obróbki rosła wraz ze wzrostem napięcia i częstotliwości zasilania, zaś zmniejszała się w miarę wzrostu średnicy reaktora.

Plazmę wykorzystano również do dezynfekcji suszonych przypraw i orzechów. Niskociśnieniowy reaktor plazmowy częstotliwości radiowych (13,6 MHz) z tlenem jako gazem substratowym był stosowany do dekontaminacji pręcików szafranu. Największą redukcję: ogólnej liczby mikroorganizmów, liczebności bakterii typu coli oraz pleśni i drożdży o odpowiednio 3,52, 4,62, 2,38 i 4,12 log jtk/g stwierdzono przy mocy 110 W i 30 minutach ekspozycji. Ponadto obróbka plazmowa spowodowała znaczący wzrost parametrów barwy produktu w kierunku ciemnienia oraz zmniejszyła zawartość pikrokrocyny, szafranalu i krocyny, które jednak spełniały wymagane w normach ISO poziomy wartości dotyczące szafranu (Darvish i in., 2022). Hertwig i in. (2015) badali wpływ powietrza plazmowanego na nasiona pieprzu, rozdrobnione oregano i paprykę w proszku. Po 60 minutach ekspozycji naturalna mikroflora nasion pieprzu i papryki w proszku zmalała o ponad 3 log, zaś w przypadku oregano o 1,6 log. Obróbka nie wpłynęła znacząco na barwę pieprzu i oregano jednak w przypadku papryki już po 5 minutach obróbki odnotowano redukcję czerwonej barwy. Grabowski i in. (2015) w reaktorze DBD z argonem jako gazem substratowym otrzymali satysfakcjonujące rezultaty dekontaminacyjne podczas 5 minutowej ekspozycji czarnego pieprzu na plazmę.

Dasan i in. (2018) używała dyszy plazmowej oraz powietrza jako gazu procesowego (2000-3000 L/h) do inaktywacji *Salmonella enterica* (*Enteritidis*) znajdującej się na powierzchni skorupki jaj. Zastosowano 60-120 s czas ekspozycji, zaś odległość jaja od strumienia plazmy wynosiła 15 lub 40 mm. Najlepszy wynik uzyskano po 120 s obróbki przy mocy 655 W i częstotliwości 25 kHz, kiedy liczba kolonii *S. Enteritidis* zmalała poniżej granicy detekcji (z  $10^7$  jtk/jajo do  $10^2$  jtk/jajo). Temperatura jaj nie przekroczyła 35°C. Podwójną argonową, obrotową dyszę plazmową, która pozwalała na generowanie plazmy w większej objętości wykorzystano do usuwania *S. Enteritidis* (Lin i in., 2021) testując 26 różnych kombinacji parametrów operacyjnych. Uwzględniając zarówno efekt antybakteryjny, jak i wpływ na jakość produktu dobrano parametry pozwalające na redukcję liczby kolonii o ponad 4 log jtk/jajo przy jednoczesnej poprawie właściwości sensorycznych.

Mleko i jego przetwory należą do produktów łatwo ulegających zepsuciu. Do pozytywnych skutków działania plazmy niskotemperaturowej na produkty mleczne należy inaktywacja mikroorganizmów i enzymów (Nikmaram i Keener, 2022). W zależności od metody i czasu ekspozycji na plazmę inne czynniki, takie jak pH, składniki lotne, profile białkowy i lipidowy również mogą ulegać zmianie. Może znacząco zmieniać się zawartość aldehydów, takich jak 1-oktanol, 2-heptanon, 2-hexenal, trans-2-octenal, nonanal czy aldehyd benzoesowy (Korachi i in., 2015). Jednocześnie nie odnotowano wpływu plazmy na całkowitą zawartość ketonów czy alkoholi. Doniesienia naukowców nie są jednak jednoznaczne,

gdyż Gurol i in. (2012) uzyskali redukcję kolonii mikroorganizmów rzędu 4,15 log jtk/ml podczas 20 minutowej obróbki w reaktorze koronowym, przy czym nie zaobserwowano istotnych zmian w barwie i pH. 10 minutowa obróbka w reaktorze z wyładowaniem barierowym skutkowałą spadkiem liczby kolonii o 2,4 log jtk/ml jednak doszło do obniżenia się pH i parametru chromatycznego  $a^*$  przy jednoczesnym wzroście wartości parametrów  $L^*$ ,  $b^*$ . Nie zaobserwowano znaczących zmian w przypadku zawartości tłuszczów (Kim i in., 2015). W przypadku odtuszczonego mleka w proszku, 20–120 s ekspozycja w reaktorze plazmowym ze złożem fluidalnym pozwoliła na max. 3,27 log<sub>10</sub> redukcję liczby kolonii *Cronobacter sakazakii* bez zauważalnych zmian barwy, struktury krystalicznej, składu aminokwasów ani zawartości związków fenolowych (Chen i in., 2019).

Wan i in. (2021) wykorzystali do obróbki 10 g sera Queso fresco zaszczipionego *L. innocua* i *E. coli* K-12 zimną plazmę wysokonapięciową (od 60 do 100 kV) generowaną w powietrzu lub w mieszaninie 65% O<sub>2</sub>, 30% CO<sub>2</sub>, 5% N<sub>2</sub>. Na stopień redukcji znaczący wpływ miała wielkość próbki sera oraz czas obróbki (Ott i in., 2022). Po 5 minutach obróbki przy zastosowaniu powietrza jako gazu substratowego oraz po przechowywaniu przez 24 godz. w 4°C uzyskano redukcje liczby kolonii wynoszące 1,4 log jtk/g oraz 3,5 log jtk/g odpowiednio dla *L. innocua* i *E. coli* K-12. Nie zaobserwowano zmian w teksturze, zaś zmiany pH, wilgotności, barwy oraz profilu tłuszczów były minimalne. Uscanga i in. (2022) badali wpływ plazmy generowanej w wyładowaniu barierowym na tradycyjny meksykański ser Adobera. 0,5 g sera zaszczipiono 10<sup>8</sup> jtk/ml *Escherichia coli* ATCC 25922, *Salmonella* ATCC13076 i *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, a następnie poddano obróbcę plazmowej w mieszaninie powietrza i helu i w czasie od 1 do 15 minut. Wykazano redukcję liczby kolonii o 5 cykli logarytmicznych. Niestety plazma powodowała silne utlenianie białek i lipidów przekładające się na walory smakowe i zapachowe produktu. W przypadkach plazmowania serów Kashar uzyskano redukcję liczby kolonii o 3-4 log dla *Aspergillus flavus* oraz *Penicillium crysogenum*. Wartości parametru  $b^*$  próbek wzrosły, podczas gdy  $L^*$  i  $a^*$  oraz pH zmalały (Akarca i in., 2023).

Analiza produktów (30 minut obróbki) - tłuszczów mlecznych i wołowych plazmą generowaną w powietrzu w reaktorze DBD wykazała powstawanie licznych nadtlenuków kwasu oleinowego i linolowego oraz skutkowałą zmniejszeniem ilości tych kwasów wraz z palmitynowym (Sarangapani i in., 2017). Może to wskazywać na dominację w tym procesie mechanizmu Criegee, gdzie ozon i inne reaktywne czynniki reagują głównie z podwójnymi wiązaniami w łańcuchach nienasyconych kwasów tłuszczowych. Wśród produktów utleniania tłuszczów znalazły się również aldehydy (heksanal, pentanal i inne), nonenal oraz kwasy na przykład azelainowy, pelargonowy i kaprylowy. Zmiany oksydacyjne uznawane są niestety za jeden z wiodących procesów, które przyczyniają się do obniżenia jakości produktów mięsnych (Starek i Pawłat, 2020; 2022) prowadząc m.in. do pogorszenia się ich walorów smakowych i zapachowych. Jest to rezultatem utleniania kwasów tłuszczowych (głównie polienowych). Zjełczały tłuszcz w kontakcie z pozostałymi produktami może wchodzić w reakcje z innymi ważnymi składnikami, takimi jak witaminy (ryboflawina, biotyna, kwasy askorbinowy i pantotenowy). Jednocześnie, jak w przypadku innych produktów żywnościowych, obróbka plazmowa prowadzi do redukcji mikroorganizmów odpowiedzialnych za psucie świeżego mięsa i jego produktów i po dobraniu odpowiednich warunków generowania i ekspozycji próbki może służyć do przedłużenia jego trwałości.

W przypadku mięsa drobiowego Noriega i in. (2011) stosując przez 8 minut plazmę helowo-tlenową uzyskał odmienne stopnie redukcji kolonii *Listeria innocua*: odpowiednio 3 log i 1 log dla powierzchni mięsa i skóry kurzej. Dowodzi to istotnej roli jaką dla uzyskania efektywności obróbki odgrywają właściwości samej powierzchni w tym jej topografia, chropowatość i energia powierzchni. Lee i in. (2011) zbadali skuteczność inaktywacji *Listeria monocytogenes* podczas 2 minutowej ekspozycji na plazmę generowaną z różnymi kombinacjami gazów procesowych (He, He+O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>) dla plastrów gotowanej piersi z kurczaka i szynki. Skuteczność obróbki w zależności od użytego gazu procesowego wynosiła od 1,37 do 6,52 jednostek logarytmicznych przy czym najlepsze efekty uzyskano dla mieszaniny azotu i tlenu. Liczba kolonii bakterii tlenowych pozostawała na bardzo niskim poziomie nawet po przechowywaniu w 10°C przez 7 dni. Dirks i in. (2012) wykonali obróbkę piersi kurczaka i uda kurczaka ze skórą inokulowaną *Salmonella enterica* oraz *Campylobacter jejuni*. Plazma była generowana w reaktorze z barierą dielektryczną. Po 3 minutach obróbki w przypadku *S. enterica* uzyskano maksymalne poziomy redukcji wynoszące 2,54 log oraz 1,31 log odpowiednio na piersi i skórze z kurczaka, zaś dla *C. jejuni* wynosiły one 2,45 log oraz 3,11 log. W innym badaniu 5 minutowa ekspozycja piersi kurczaka na wysokonapięciową (100 kV) plazmę atmosferyczną spowodowała spadek liczebności mikroorganizmów o około 2 log jtk/g po 24 h przechowywania. W porównaniu z grupą kontrolną po wydłużeniu czasu przechowywania do 24 dni liczba mezofilów, psychrofilów i Enterobacteriaceae była odpowiednio o 1,5, 1,4 oraz 0,5 log niższa niż w grupie kontrolnej (Moutiq i in., 2020).

Sammanee i in. (2022) przeprowadzili 15 minutową kąpiel w cieczy plazmowanej, w której w wyniku działania plazmy znajdowało się 60 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> do obróbki próbek kurczaka ze skórą i wieprzowiny inokulowanych *Salmonella Enteritidis*, *Salmonella Typhimurium*, *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni*, *Staphylococcus aureus* i *Pseudomonas aeruginosa*. W procesie obróbki cieczy użyto dyszy plazmowej (15 kV, 50 Hz), gazem procesowym był argon. Stopień redukcji kolonii mikroorganizmów zależał od rodzaju bakterii i najlepsze rezultaty osiągnięto dla *C. jejuni*. Po 3 dniach przechowywania (w temperaturze 4-6°C) od obróbki skuteczność dekontaminacyjna dla *Staphylococcus aureus* była niższa, zaś najtrudniejsza była inaktywacja *P. aeruginosa*. Stwierdzono niewielkie zmiany jeśli chodzi o barwę, pH i aktywność wodną a<sub>w</sub> mięsa w porównaniu do grupy kontrolnej. Wartości współczynników chromatyczności a\* i b\* spadły, jedynie dla próbek mięsa wieprzowego nastąpił wzrost wartości jasności L\*.

Plastry szynki inokulowane *L. monocytogenes* eksponowano na działanie plazmy helowej generowanej w reaktorze z regulacją mocy (do 150 W) przez czas do 2 minut, dla których liczba kolonii została zmniejszona o około 1,73 log jtk/g (Song i in., 2009). Schab wieprzowy zaszczerpiony *E. coli* dekontaminowano plazmowo przy użyciu reaktora z wyładowaniem barierowym (Kim i in., 2013) oraz helu i mieszanki hel-tlen jako gazów substratowych zmniejszając liczbę kolonii bakterii o zaledwie 0,55 log po 10 minutach. Boczek (Kim i in., 2011) inokulowany *L. monocytogenes*, *E. coli* i *S. typhimurium* obrabiano plazmowo przez 60 i 90 s przy użyciu plazmotronu z regulacją mocy (do 125 W). Dla helu jako gazu procesowego uzyskano redukcje do 2 cykli logarytmicznych, zaś dla mieszanki helu z tlenem do 3 cykli logarytmicznych. Przy czym jedyną istotną zmianą był wzrost parametru barwy L\* na powierzchni boczku. Zmniejszenie ilości kolonii *E. coli* i *L. mono-*

*cytogenes* w połędwiczkach wieprzowych poddanych obróbce plazmą generowaną w wyładowaniu koronowym raportowali również Choi i in. (2016).

Barierowe wyładowanie powierzchniowe oraz różne mieszanki gazów (80% Ar/20% O<sub>2</sub> lub 80% N<sub>2</sub>/20% O<sub>2</sub>) użyto do dekontaminacji świeżych filetów z dorady (*Sparus aurata*) (Tappi i in., 2023) zawierających endogenną mikroflorę oraz inokulowanych *E.coli* i *L.innocua*. Po 20 minutach obróbki uzyskano redukcję rzędu 1 log jtk/g dla mieszaniny argonu z tlenem, przy czym zaobserwowano utlenianie lipidów (od 0,5 mg MDA/kg do max. 4 mg MDA/kg). Doświadczenia z procesem trawienia filetów *in vitro* nie wykazały wpływu obróbki na ten proces. Grupa badawcza Mozzon'a (2023) użyła wody plazmowanej przy użyciu impulsowego generatora koronowego (18 kV, 5 kHz) do zmniejszenia naturalnej mikroflory sardynek (*Sardina pilchardus*) o odpowiednio 0,22 i 0,20 jednostki logarytmiczne dla mezofilnych bakterii aerobowych oraz *Pseudomonas* spp. Tak niewielkie wartości redukcji mikroflory nie miały wpływu na wydłużenie czasu przydatności do spożycia produktów rybnych przy przechowywaniu chłodniczym. 30 minutowa obróbka inicjowała proces utleniania tłuszczów zwłaszcza kwasów wielonienasyconych, o więcej niż jednym podwójnym połączeniu pomiędzy atomami węgla (PUFA) oraz wzrost stężenia substancji lotnych. Przeanalizowane produkty utleniania cholesterolu wskazywały, że odbywało się ono głównie za sprawą wolnych rodników, ozonu, nadtlenu wodoru oraz nadtlenoazotynu.

Obróbka plazmowa warzyw i owoców, zwłaszcza tych świeżo krojonych była analizowana przez wiele grup badawczych. Wpływ sekwencyjnej ekspozycji na plazmę generowaną w reaktorze DBD na krojonego melona *Cucumis melo* L. var. *Reticolatus* cv. 'Raptor' badali Tappi i in. (2016). Traktowanie plazmą próbek w dwóch cyklach (15+15 minut) spowolniło rozwój psychrofilnej i mezofilnej mikroflory przez co znacznie wydłużyło okres przydatności do spożycia melona przechowywanego przez okres 4 dni w temperaturze 10°C. Plazmowanie nie wpłynęło istotnie na parametry jakościowe, takie jak kwasowość, zawartość substancji rozpuszczalnych, masa sucha, barwa czy tekstura. Zaobserwowano zahamowanie aktywności enzymów: peroksydazy o około 17% oraz metylotransferazy pektynowej o blisko 7%. W pracy Namin i in. (2021) zbadano wpływ plazmy generowanej w reaktorze z wyładowaniem barierowym na krojone świeże gruszki przez okres od 2 do 6 minut, przy czym najistotniejszy był wpływ dłuższego okresu obróbki na zmniejszenie parametru barwy a\*. Wskaźnik brunatnienia (BI) był najwyższy w przypadku próbki kontrolnej.

Wpływ 5, 10 i 15 min ekspozycji na plazmę atmosferyczną generowaną w reaktorze DBD na właściwości mechaniczne śliwek w czasie przechowywania (do 20 dnia) badali Rashvand i in. (2022). Odnotowano negatywny wpływ obróbki w czasie 5 i 15 minut. Według autorów 10 minutowe plazmowanie zwiększało odporność śliwek na deformacje poprzez spadek parametrów związanych z objętością stłuczenia i podatnością na stłuczenie, zaś wartości modułu Younga, naprężenia plastycznego oraz modułu styczności w trakcie przechowywania utrzymały się w akceptowalnych granicach. Zmodyfikowanego reaktora DBD z podwójnym wyładowaniem barierowym (Ramazzina i in., 2016) użyto do obróbki jabłek Pink Lady powodując niewielkie zmniejszenie zawartości przeciwutleniaczy (głównie o charakterze amfifilowym) i aktywności przeciwutleniającej (do 10%). Obróbka truskawek plazmą generowaną w reaktorze koronowym z elektrodą wieloigłową pozwoliła na zachowanie ich świeżości nawet 4 dni dłużej w porównaniu do kontroli poprzez redukcję

liczby mikroorganizmów, a jednocześnie pozwoliła na zachowanie właściwości sensorycznych (Hozak i in., 2021). Owoce jagód poddano obróbce plazmą niskotemperaturową (12 kV, 5 kHz) od 30 do 90 s i przechowywano przez 40 dni w temperaturze 4°C. Całkowita liczba bakterii tlenowych i pleśni zmalała w zależności od długości czasu ekspozycji odpowiednio (1,24 i 0,87 log jtk/g). Podczas 60 s obróbki o 11,7% zahamowano proces gnicia owoców oraz utratę jędrności. Po obróbce zaobserwowano również wzrost zawartości związków fenolowych, antocyjanów i kwasu askorbinowego oraz aktywności dysmutazy ponadtlenkowej, katalazy i peroksydazy. Podobnie pozytywne rezultaty obróbki plazmowej zanotowano w przypadku przechowywania pokrojonej kantalupy (Zhou i in., 2022).

Mycie wodą po 5 minutach ekspozycji na plazmę generowaną przy wartościach napięć od 6 do 10 kV okazało się obiecującą techniką utrwalania świeżo krojonych gruszek przechowywanych potem w temperaturze 4°C przez 12 dni. Wyniki wykazały znaczne spowolnienie wzrostu bakterii aerobowych, drożdży i pleśni, przy czym otrzymane rezultaty były uzależnione od wartości napięcia. Do korzystnych skutków obróbki zaliczyć można ograniczenie mięknięcia świeżo krojonych gruszek (dla 6 kV), istotne zmniejszenie utraty masy i całkowitej zawartości fenoli (dla 8 KV). Negatywny wpływ wody plazmowanej na zawartość kwasu askorbinowego i aktywność przeciwutleniającą w porównaniu do kontroli przestał być widoczny po 8 dniach przechowywania. Obróbka taka okazała się skuteczniejsza w eliminacji mikroorganizmów w porównaniu do zastosowania podchlorynu sodu (Chen i in., 2019). Perinban i in. (2022) oceniała wpływ 5 minut mycia świeżo krojonych jabłek w wodzie plazmowanej przez 10-60 minut. Użycie wody po 20 i 30 minutach ekspozycji na plazmę pozwoliło na zachowanie jakości świeżo krojonych jabłek podczas przechowywania w temperaturze 4°C przez 12 dni. Czasy aktywacji od 20 minut powodowały istotne obniżenia ogólnej liczby mikroorganizmów. Bezpośrednio po umyciu wodą plazmowaną zaobserwowano obniżenie aktywności polifenolooksydazy i wzrost aktywności peroksydazy. Mycie w wodzie plazmowanej przez 45 i 60 minut wpłynęło niekorzystnie na jakość świeżo krojonych jabłek. Z kolei według Yang i in. (2023), 2 minutowe zanurzenie truskawek w wodzie plazmowanej powodowało wydłużenie ich świeżości a jednocześnie owoce zachowywały odpowiednią jędrność, zawartość przeciwutleniaczy, w tym witaminy C oraz najniższe stężenie dialdehydu malonowego jako markera stresu oksydacyjnego.

Abouelenein i in. (2021) zaproponowali obróbkę liści rukoli poprzez zanurzenie w wodzie plazmowanej (2, 5, 10 i 20 minut). Woda plazmowana powodowała pewne zmiany w profilu związków lotnych. Jedynie dla czasu wynoszącego 10 minut nie odnotowano istotnego spadku zawartości steroli: beta-sitosterolu i kamposterolu. Najkrótszy, 2 minutowy czas zanurzenia powodował istotny wzrost zawartości beta-karotenu, luteoliny i chlorofilu b (którego zawartość malała dla 20 minutach immersji).

Pulpa z owoców jagód camu-camu bogatych w terpeny i seskwiterpeny była traktowana plazmą generowaną w reaktorze barierowym o regulowanej częstotliwości (200-30000 Hz). Zaobserwowano zmiany w profilu wielu związków odpowiedzialnych za aromat. Campelo i in. (2020) zasugerowali, że obróbka plazmowa mogłaby być narzędziem do regulacji właściwości smakowych i zapachowych po odpowiednim doborze parametrów ekspozycji.

Tarabowa i in. (2021) poddali obróbce świeżo wyciśnięty sok jabłkowy w reaktorze iskrowym pozwalającym na ciągłą obróbkę bezpośrednią (gdy sok przepływał wewnątrz elektrody i był rozpylany w formie elektrostrajy) oraz w systemie wsadowym gdy wyła-

dowanie iskrowe miało miejsce nad powierzchnią soku. Nie odnotowano większych zmian w pH, barwie, przewodności, stopniu Brix i transmitancji oraz w zawartości cukrów, kwasów organicznych i polifenoli. Po obróbce nie zaobserwowano przekroczenia bezpiecznego stężenia dla azotanów, zaś w przypadku azotynów i nadtlenu wodoru początkowo było ono wyższe niż dopuszczalne limity, ale zmniejszyło się w ciągu 24 godzin po działaniu plazmy. W przypadku *E. coli* wstąpił największy efekt dekontaminacyjny (6 log) w porównaniu do drożdży *Saccharomyces cerevisiae*. Autorzy przedłużyli trwałość soku maksymalnie do 26 dni przy przechowywaniu chłodniczym.

Obróbka świeżo tłoczonego soku pomidorowego trwająca 300-600 s przy użyciu reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem (Glide-arc) posiadała wysoki potencjał dekontaminacyjny i jednocześnie nie spowodowała zmian w właściwościach fizykochemicznych soku pomidorowego. Krótszy czas przetwarzania skutkował znaczną poprawą jakości mikrobiologicznej soku i wydłużeniem jego okresu przydatności do spożycia do 10 dni. Dłuższy czas działania zimnej plazmy (600 s) prowadził do dalszego zmniejszenia liczby mikroorganizmów w porównaniu do obróbki 300 s. Całkowita liczba mikroorganizmów, tj. bakterie kwasu mlekowego, bakterie coli i drożdże, zostały zredukowane poniżej granicy oznaczalności (Starek i in., 2020, Starek-Wójcicka i in., 2023a). Stwierdzono wzrost całkowitej zawartości karotenoidów (o 13%) i likopenu (o 11%) zaś maksymalna utrata witaminy C wyniosła 5% po 5 minutach obróbki (Starek i in., 2019). Ta sama grupa zbadała wpływ plazmy generowanej w reaktorze typu glide-arc z powietrzem jako gazem substratowym na cechy jakościowe świeżo tłoczonego soku z marchwi. W tym przypadku czas obróbki wyniósł od 10 do 30 minut, przy czym po 20 minutach zawartość całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych osiągnęła poziom dopuszczalny (Codex Standards) w odniesieniu do zawartości całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych w soku pasteryzowanym. W stosunku do kontroli odnotowano wzrost zawartości ekstraktu, karotenoidów, polifenoli i stabilności koloidalnej oraz niewielki spadek jasności  $L^*$  oraz parametrów chromatyczności  $a^*$  i  $b^*$  (Starek-Wójcicka i in., 2023b). W przypadku obróbki plazmowej soku z buraków stwierdzono m.in. wzrost zawartości związków fenolowych, co pozwoliło uzyskać bardzo korzystne właściwości odżywcze soku. Nie działał on cytotoksycznie na komórki śródbłonna mikronaczyniowego jelit (HIMEC) a jednocześnie hamował proliferację linii komórkowej gruczolakoraka nabłonka jelita grubego Caco-2 (Dzimitrowicz i in., 2021).

Bezpośrednia, 5 minutowa obróbka czerwonego wina plazmą niskotemperaturową ( $He/N_2$ ) spowodowała niewielki wzrost zawartości fenoli (3,1%). Plazma przyczyniła się również do spadku stężenia amin biogennych (Niedźwiedz i in., 2022).

Mąkę pszenną poddano obróbce plazmowej z powietrzem jako gazem substratowym przez 1 lub 2 minuty (Bahrami i in., 2016). W tym przypadku nie zaobserwowano jednak wpływu na całkowitą liczbę bakterii tlenowych oraz pleśni jak również na substancje nieskrobiowe czy glikolipidy. Procesy utleniania tłuszczów nasilały się wraz ze wzrostem czasu ekspozycji i napięcia. W zależności od warunków obróbki zmniejszyła się zawartość całkowitych wolnych kwasów tłuszczowych i fosfolipidów. Plazma nie wpłynęła zasadniczo na zawartość białka ogólnego, jednak zauważalne było pojawienie się wyższych frakcji wagowych, co wskazywało na utlenianie białek, zaś otrzymane z takiej mąki ciasto miało lepsze parametry fizykochemiczne.

Reaktor ze ślizgającym się łukiem zastosowano do plazmowania chlebów bezglutennego i mieszanego pszenno-żytniego przez 2 i 10 minut i przechowywano przez 3 i 6 dni. Ekspozycja plazmy trwająca 10 minut eliminowała bakterie mezofilne i grzyby, a już 2 minuty obróbki wystarczały do całkowitego zahamowania wzrostu drożdży i pleśni. Chleb po tego typu przetwarzaniu charakteryzował się jednak zmniejszoną wilgotnością, znacznym wzrostem twardości i niewielkim zwiększeniem sprężystości (Starek-Wójcicka i in., 2022). Podobny wzrost twardości produktu po obróbce plazmowej zaobserwowano w przypadku świeżego makaronu (Chen i in., 2020).

Obróbka plazmą niskotemperaturową stanowi ciekawą alternatywę umożliwiającą dekontaminację mikrobiologiczną żywności. Odpowiedni dobór parametrów plazmotronu, jak i samej ekspozycji umożliwia poprawę właściwości odżywczych oraz promowanie powstawania pożądanych cech jakościowych i strukturalnych w granicach akceptowalnych przez konsumentów. Prace optymalizacyjne dotyczące poszczególnych kategorii produktów wymagają jednak dalszych badań.





## **7. SZANSE I ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI**

Ostatnie osiągnięcia w technologiach przetwarzania żywności zrewolucjonizowały przemysł rolno-spożywczy, oferując liczne korzyści i nowe możliwości (Kucharyk i in., 2019; Pycia i in., 2020). Metody te mogą znacznie wydłużyć okres przydatności do spożycia łatwo psującej się żywności, zmniejszając przy tym jej marnotrawstwo i zapewniając bardziej zrównoważony łańcuch dostaw żywności (Huho, 2020). Ponadto umożliwiają zwiększenie bezpieczeństwa produktów poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie występowania szkodliwych mikroorganizmów, takich jak bakterie, pleśnie i grzyby, które mogą powodować choroby przenoszone wraz z żywnością. Innowacyjne metody zapewniają również możliwość poprawy wartości odżywczej i walorów sensorycznych surowców i artykułów rolno-spożywczych, czyniąc je bardziej atrakcyjnymi dla konsumentów. Większość z nich opiera się bowiem na obróbce żywności w temperaturze otoczenia lub nawet niższej, często prowadząc do nadania wyrobom cech funkcjonalnych. Takie sposoby obróbki zmniejszają również ilość energii cieplnej potrzebnej do produkcji żywności podczas konwencjonalnego przetwarzania. Nie bez znaczenia jest również możliwość tworzenia nowych tekstur artykułów żywnościowych, które są ważnym elementem projektowania i marketingu (Loveday i in., 2013).

Mimo to, innowacje procesowe czy produktowe mogą spotkać się z różnym odbiorem konsumentów, którzy będą doszukiwać się w nich potencjalnych zagrożeń (Devlieghere i in., 2004; Zhou i in., 2022). Często wyroby finalne nie są jeszcze tak dokładnie przebadane, jak na przykład te poddane obróbce termicznej, czyli pasteryzacji. Jak wskazują badania analityczne przeprowadzone wśród 225 potencjalnych konsumentów żywności przetworzonej przy użyciu nowych technologii, termin „konserwowanie na zimno” miał pozytywne skojarzenia dla wszystkich grup respondentów (pracowników laboratoriów, kupujących w centrum handlowym czy żołnierzy), ale hasło „minimalnie przetworzone” wywoływało negatywne odczucia (Cardello i in., 2007). Generalnie brak jest długoterminowych analiz nad bezpieczeństwem i potencjalnymi skutkami ubocznymi tych metod. Ich stosowanie może więc budzić obawy dotyczące chociażby skuteczności dekontaminacji żywności o różnym poziomie wilgotności czy pH. Pewne ograniczenia pojawiają się również w przypadku zarodników bakterii, które wymagają bardzo wysokich temperatur do całkowitej inaktywacji. Nie bez znaczenia jest również enzymatyczna i oksydacyjna degradację niektórych składników żywności pod wpływem niewłaściwie zadanych parametrów procesów. Większość świeżo przygotowanych wyrobów poddanych innowacyjnym procesom przetwarzania wymaga przechowywania i dystrybucji w warunkach chłodniczych. W przyszłych pracach warto również przeprowadzić ocenę ryzyka toksycznych pozostałości. Co więcej, niektóre procesy wymagają wykorzystania specjalistycznego sprzętu i wyszkolonego personelu, stąd skalowanie tych technologii pozostaje największym wyzwaniem do rozwiązania (Cardello i in., 2007; Majid i in., 2018; Khezerlou i in., 2023).

W tabeli 4 przedstawiono główne szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności.

Tabela 3. Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności (Devlieghere i in., 2004; Ekezie i in., 2017; Kucharyk i in., 2019)

<u>Szansa</u>	<u>Zagrożenie</u>
<p><i>Innowacyjność jako narzędzie rozwoju zrównoważonego:</i></p> <p>Innowacje w sektorze rolno-spożywczym przekładają się na zmniejszenie szkodliwości dla środowiska oraz obniżkę materiałochłonności i energochłonności niekonwencjonalnych procesów utrwalania. Wiele z nich zalicza się do tak zwanych „zielonych technologii”.</p>	<p><i>Brak badań na temat bezpieczeństwa i nieprzewidywalne skutki długoterminowe:</i></p> <p>Niekonwencjonalne metody mogą być niewystarczająco przebadane pod względem wpływu na zdrowie ludzkie, co może stanowić potencjalne zagrożenie dla konsumentów. Długoterminowe skutki spożywania żywności poddanej niekonwencjonalnym metodom obróbki mogą być trudne do przewidzenia.</p>
<p><i>Dłuższy okres przydatności do spożycia:</i></p> <p>Większość nowatorskich metody obróbki zwiększa trwałość żywności, co pozwala na jej dłuższe przechowywanie w postaci świeżej i aromatycznej (pozbawionej sztucznych konserwantów).</p>	<p><i>Zmiany mikrobiologiczne i fizykochemiczne:</i></p> <p>Niewystarczająca obróbka eliminująca zarówno formy drobnoustrojów wegetatywne oraz przetrwalnikowe, może powodować psucie się żywności, a tym samym obniżać jej wartość odżywczą.</p>
<p><i>Poprawa wartości odżywczej i zdrowy styl życia:</i></p> <p>Wiele produktów spożywczych poddanych działaniu nowoczesnym metodom przetwarzania charakteryzuje się wysoką zawartością substancji biologicznie aktywnych i/lub ograniczoną ilości soli, co jest szczególnie ważne w kontekście utrzymania zdrowego stylu życia.</p>	<p><i>Brak akceptacji społecznej:</i></p> <p>Czynniki osobiste, a także płeć, wiek, zainteresowania, charakter czy stosunek do ryzyka mogą wpływać na akceptację bądź niechęć do wybieranych produktów, na przykład utrwalonych ciśnieniowo, zimną plazmą czy pulsacyjnym polem elektrycznym.</p>
<p><i>Ekonomiczność:</i></p> <p>Skuteczne metody obróbki mogą zmniejszyć straty żywności i poprawić ogólną ekonomiczność produkcji (zmniejszyć ilość odpadów).</p>	<p><i>Brak szczegółowych regulacji:</i></p> <p>Brak jednolitych standardów i regulacji dotyczących niekonwencjonalnych metod obróbki żywności może prowadzić do problemów związanych z ich komercjalizacją.</p>

Przyszłość innowacyjnych metod utrwalania żywności jest bardzo obiecująca. Wraz z postępowaniem badań i rozwojem pojawiają się bardziej wydajne i skuteczne techniki. Integracja nowych technologii, takich jak *blockchain*, może zwiększyć identyfikowalność i przejrzystość w łańcuchu dostaw żywności. Rozwój spersonalizowanych metod konserwacji w oparciu o indywidualne potrzeby i preferencje konsumentów to kolejne aspekty do odkrycia. Możliwości są ogromne, jednak kluczowe jest zachowanie równowagi między innowacyjnością, a bezpieczeństwem. Dokładne badania, rygorystyczne testy i solidne ramy regulacyjne są niezbędne, aby sprostać potencjalnym zagrożeniom i wyzwaniom związanym z wdrożeniem tych nowatorskich metod obróbki produktów na skalę przemysłową i otrzymać akceptację konsumentów (Pietrzak i in., 2010; Settanni i Moschetti, 2014; Kuzniar i in., 2016; Kucharyk i in., 2019).

## **8. PODSUMOWANIE**

Sektory rolnictwa i przetwórstwa spożywczego charakteryzują się dużą niepewnością, wynikającą ze zmienności warunków atmosferycznych, plonów i zbiorów roślin uprawnych oraz reakcji konsumentów i producentów rolnych na układ elementów rynku. W ostatnim czasie również pandemia COVID-19 zachwiała rynkami towarów, zakłóciła przepływy handlowe, a nawet w wielu częściach świata doprowadziła do niedoborów żywności. Stąd też, za istotne dla rozwoju tych gałęzi przemysłu należy uznać rozmiary konsumpcji produktów żywnościowych, na którą wpływają nie tylko dochody konsumentów, ale i elastyczne funkcjonowanie mechanizmu rynkowego, a także jego zdolność do szybkiego reagowania na wszelkie zmiany. Właściwe postępowanie z wytworzonymi produktami, uwzględniające ochronę środowiska, kwestie gospodarcze i interesy społeczne staje się obecnie istotnym elementem budowania stabilnej, silnej marki. Zagadnienia te są coraz ważniejsze z punktu widzenia zaspokojenia oczekiwań uczestników rynku, organów regulacyjnych i władz państwowych, a także konsumentów. Wiele firm skupia się więc na szeroko pojętym zrównoważonym rozwoju metod przetwarzania surowców i produktów pochodzenia zwierzęcego oraz roślinnego, które są przyjazne dla środowiska, ekonomiczne i łatwe w użyciu. Obróbka wysokociśnieniowa, ultradźwięki, pulsacyjne pole elektryczne, a ostatnio plazma nietermiczna to jedne z nich. Wymienione technologie wykorzystują efekty fizyczne i chemiczne do modyfikowania żywności bez jej przegrzania, zmniejszając szkodliwy wpływ na składniki odżywcze i naturalny smak. W wielu przypadkach umożliwiają uzyskanie żywności funkcjonalnej i o wydłużonym okresie przydatności do spożycia. Chociaż potrzebne są dalsze badania, aby dokładniej scharakteryzować wpływ tych metod na produkty spożywcze i zdrowie ludzkie, ogólnie uważa się je za bezpieczne, jeśli są właściwie stosowane.



## BIBLIOGRAFIA

- Aaby K., Grimsbo I. H., Hovda M. B., & Rode T. M.** (2018). Effect of high pressure and thermal processing on shelf life and quality of strawberry purée and juice. *Food Chemistry*, 260, 115-123.
- Aadil R. M., Zeng X. A., Jabbar S., Nazir A., Mann A. A., Khan M. K. I., & Ramzan A.** (2017). Quality evaluation of grapefruit juice by thermal and high pressure processing treatment. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 30(3), 249-257.
- Abid M., Jabbar S., Hu B., Hashim M. M., Wu T., Wu Z., ... & Zeng X.** (2014). Synergistic impact of sonication and high hydrostatic pressure on microbial and enzymatic inactivation of apple juice. *LWT-Food Science and Technology*, 59(1), 70-76.
- Abouelenen D., Angeloni S., Caprioli G., Genovese J., Mustafa A. M., Nzekoue F. K., ... & Vittori S.** (2021). Effect of plasma activated water on selected chemical compounds of rocket-salad (*Eruca sativa mill.*) leaves. *Molecules*, 26(24), 7691.
- Adamczyk S.** (2019). Jakość a bezpieczeństwo żywności. *Nauki Ekonomiczne*, 29, 37–54.
- Adekunte A. O., Tiwari B. K., Cullen P. J., Scannell A. G. M., & O'donnell C. P.** (2010). Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry*, 122(3), 500-507.
- Aguilar Uscanga B. R., Calderón Santoyo M., Ragazzo Sánchez J. A., Alemán Duarte M. I., Pérez Montaña J. A., Balcázar-López E., & Solís Pacheco J. R.** (2022). Effect of the application of cold plasma energy on the Inactivation of microorganisms, proteins, and lipids deterioration in Adobera Cheese. *Journal of Food Quality*, Article ID 82309555.
- Agus P., Ratna Setyowati P., Arman H. A., Masduki A., Innocentius B., Priyono Budi S., & Otta Breman S.** (2020). The effect of implementation integrated management system ISO 9001, ISO 14001, ISO 22000 and ISO 45001 on Indonesian food industries performance. *Test Engineering and Management*, 82(20), 14054-14069.
- Akarca G., Atik A., Atik İ., & Denizkara A. J.** (2023). The use of cold plasma technology in solving the mold problem in Kashar cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 60(2), 752-760.
- Akhtar S., Paredes-Sabja D., Torres J. A., & Sarker M. R.** (2009). Strategy to inactivate Clostridium perfringens spores in meat products. *Food Microbiology*, 26(3), 272-277.
- Alarcon-Rojo A. D., Carrillo-Lopez L. M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., & Garcia-Galicia I. A.** (2019). Ultrasound and meat quality: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 369-382.
- Al-Dabbas M. M., Shaderma A. M., & Al-Antary T. M.** (2014). Effect of ozonation treatment on methomyl, oxamyl and carbosulfan residues removal in tomato juice. *Life Science Journal*, 11(2), 68-73.
- Allata S., Valero A., & Benhadja L.** (2017). Implementation of traceability and food safety systems (HACCP) under the ISO 22000: 2005 standard in North Africa: The case study of an ice cream company in Algeria. *Food Control*, 79, 239-253.
- Alshannaq A., & Yu J. H.** (2021). Analysis of EU rapid alert system (RASFF) notifications for aflatoxins in exported US food and feed products for 2010–2019. *Toxins*, 13(2), 90.
- Al-Tit A. A.** (2015). The effect of service and food quality on customer satisfaction and hence customer retention. *Asian social science*, 11(23), 129.
- Amit S. K., Uddin M. M., Rahman R., Islam S. R., & Khan M. S.** (2017). A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. *Agriculture & Food Security*, 6, 1-22.
- Anderson A. K., & Finkelstein R.** (1919). A study of the electro-pure process of treating milk. *Journal of Dairy Science*, 2(5), 374-406.
- Ariyamuthu R., Albert V. R., & Je S.** (2022). An overview of food preservation using conventional and modern methods. *J. Food Nutr. Sci*, 10(3), 70-79.

- Astráin-Redín L., Raso J., Álvarez I., Kirkhus B., Meisland A., Borge G. I. A., & Cebrián G.** (2023). New pulsed electric fields approach to improve the blanching of carrots. *LWT*, 189, 115468.
- Augusto P. E., Soares B. M., & Castanha N.** (2018). Conventional technologies of food preservation. In *Innovative technologies for food preservation*. Academic Press. 3-23.
- Awuchi C. G.** (2023). HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176280.
- Aycock, K. N., & Davalo R. V.** (2019). Irreversible electroporation: background, theory, and review of recent developments in clinical oncology. *Bioelectricity*, 1(4), 214-234.
- Aydin A. E., & Yildirim P.** (2021). Understanding food waste behavior: The role of morals, habits and knowledge. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124250.
- Bahrami N., Bayliss D., Chope G., Penson S., Pehinec T., & Fisk I. D.** (2016). Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food chemistry*, 202, 247-253.
- Bai Y. P., Guo X. N., Zhu, K. X., & Zhou, H. M.** (2017). Shelf-life extension of semi-dried buckwheat noodles by the combination of aqueous ozone treatment and modified atmosphere packaging. *Food Chemistry*, 237, 553-560.
- Bajan B., Łukasiewicz J., & Smutka L.** (2021). Similarity and Competition of Polish Agri-food Export with the Largest Agricultural Producers in the EU. Analysis of EU, US and China Market. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*, 13(1), 29-47.
- Balakrishna A. K., Wazed M. A., & Farid M.** (2020). A review on the effect of high pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. *Molecules*, 25(10), 2369.
- Balakrishna A. K., Wazed M. A., & Farid M.** (2020). A review on the effect of high pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. *Molecules*, 25(10), 2369.
- Balon U., Dziadkowiec J. M., & Sikora T.** (2016). *Cechy jakości żywności a decyzje zakupowe polskich konsumentów soków owocowych*. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Katedra Zarządzania Jakością, Kraków.
- Bansal V., Jabeen K., Rao P. S., Prasad P., & Yadav S. K.** (2019). Effect of high pressure processing (HPP) on microbial safety, physicochemical properties, and bioactive compounds of whey-based sweet lime (whey-lime) beverage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 454-465.
- Barba F. J., Esteve M. J., & Frigola A.** (2013). Physicochemical and nutritional characteristics of blueberry juice after high pressure processing. *Food Research International*, 50(2), 545-549.
- Başaran B.** (2021). The past, present and future ISO 9001 quality management system standard. *Business & Management Studies: An International Journal*, 9(1), 227-247.
- Beltrán F. J.** (1997). Theoretical aspects of the kinetics of competitive first reactions of ozone in the O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>/UV oxidation processes. *Ozone: Science & Engineering*, 22, 109-127.
- Bernardo Y. A. D. A., do Rosario D. K. A., & Conte-Junior C. A.** (2023). Principles, application, and gaps of high-intensity ultrasound and high-pressure processing to improve meat texture. *Foods*, 12(3), 476.
- Beuchat L.R.** (1992) Surface disinfection of raw produce. *Dairy, Food and Environmental Sanitation*, 12, 69.
- Bhat R.** (2021). Sustainability challenges in the valorization of agri-food wastes and by-products. In *Valorization of agri-food wastes and by-products*. Academic Press. 1-27.
- Bhat R., Kamaruddin N. S. B. C., Min-Tz L., & Karim A. A.** (2011). Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(6), 1295-1300.
- Bhatta A. K., Keyal U., & Liu Y.** (2018). Application of high frequency ultrasound in dermatology. *Discovery medicine*, 26(145), 237-242.
- Bi X., Zhou Z., Qin T., Wang X., Ma Y., Xing Y., & Che Z.** (2020). Effects of high pressure processing (HPP) on microorganisms and the quality of mango smoothies during storage. *RSC advances*, 10(52), 31333-31341.

- Biń A.** (1995). Zastosowanie ozonu w oczyszczaniu wody i uzdatnianiu ścieków. *Polski Instalator*, 6, 28–31.
- Bojnc Š., & Fertő I.** (2015). Agri-food export competitiveness in European Union countries. *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 53(3), 476-492.
- Brandenburg R., Bogaerts A., Bongers W., Fridman A., Fridman G., Locke B. R., Miller V., Reuter S., Schiorlin M., & Ostrikov K. K.** (2018). White paper on the future of plasma science in environment, for gas conversion and agriculture. *Plasma Processes and Polymers*, 1700238.
- Brasil C. C. B., Barin J. S., Jacob-Lopes E., Menezes C. R., Zepka L. Q., Wagner R., ... & Cichoski A. J.** (2017). Single step non-thermal cleaning/sanitation of knives used in meat industry with ultrasound. *Food research international*, 91, 133-139.
- Brečić R., Mesić Ž., & Cerjak M.** (2017). Importance of intrinsic and extrinsic quality food characteristics by different consumer segments. *British Food Journal*, 119(4), 845-862.
- Brisset J. L., & Pawlat J.** (2016). Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36(2), 355-381.
- Brooks J. R., Ikhlās M., Siamak M., Quint J. P., Paul D., Jaberi A., Park J. S., Yang R.** (2022). An equivalent circuit model for localized electroporation on track etched membranes. *Biosensors & Bioelectronics*, 199, 113862.
- Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G., Graham W. G., Graves D. B., ... & Zvereva G.** (2016). Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma sources science and technology*, 25(5), 053002.
- Bryła P.** (2017). The perception of EU quality signs for origin and organic food products among Polish consumers. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 9(3), 345-355.
- Bull M. K., Steele R. J., Kelly M., Olivier S. A., & Chapman B.** (2010). Packaging under pressure: Effects of high pressure, high temperature processing on the barrier properties of commonly available packaging materials. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 533-537.
- Burlacu O., Crețu C. R., Crețu R. F., Spiridon C. E., & Gombos S. P.** (2022). Lack of Economic and Food Security on a Global Scale. *Revista de Management Comparat International*, 23(5), 686-693.
- Bursa S., Stanisław Lewicka M., Kicińska M., & Kośmider J.** (1985). Dezodoryzacja gazów i ścieków część I: Dezodoryzacja na drodze ozonowania. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin.
- Cacace F., Bottani E., Rizzi A., & Vignali G.** (2020). Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102281.
- Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á. A., & Figiel A.** (2020). Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, 9(9), 1261.
- Campelo P. H., Alves Filho E. G., Silva L. M., de Brito E. S., Rodrigues S., & Fernandes F. A.** (2020). Modulation of aroma and flavor using dielectric barrier discharge plasma technology in a juice rich in terpenes and sesquiterpenes. *Lwt*, 130, 109644.
- Cardello A. V., Schutz H. G., & Leshner L. L.** (2007). Consumer perceptions of foods processed by innovative and emerging technologies: A conjoint analytic study. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(1), 73-83.
- Carletti L., Botondi R., Moscetti R., Stella E., Monarca D., Cecchini M., & Massantini R.** (2013). Use of ozone in sanitation and storage of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(3-4), 585-589.



- Cartagena L., Puértolas E., & de Marañoń I. M.** (2020). Application of high pressure processing after freezing (before frozen storage) or before thawing in frozen albacore tuna (*Thunnus alalunga*). *Food and Bioprocess Technology*, 13(10), 1791-1800.
- Cataldo F.** (2007). On the action of ozone on gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 41(2), 210-216.
- Cataldo F.** (2003). On the action of ozone on proteins. *Polymer Degradation and Stability*, 82(1), 105-114.
- Cataldo F.** (2004). On the action of ozone on methaemoglobin. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 473-481.
- Cavalcanti R. N., Balthazar C. F., Margalho L. P., Freitas M. Q., Sant'Ana A. S., & Cruz A. G.** (2023). Pulsed electric field-based technology for microbial inactivation in milk and dairy products. *Current Opinion in Food Science*, 101087.
- Chakka A. K., Sriraksha M. S., & Ravishankar C. N.** (2021). Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review. *Lwt*, 151, 112140.
- Chang Y. H., Wu S. J., Chen B. Y., Huang H. W., & Wang C. Y.** (2017). Effect of high-pressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of white grape juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(10), 3166-3172.
- Chavan P., Sharma P., Sharma S. R., Mittal T. C., & Jaiswal A. K.** (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1), 122.
- Chemat F., Rombaut N., Meullemiestre A., Turk M., Perino S., Fabiano-Tixier A. S., & Abert-Vian M.** (2017). Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357-377.
- Chen C., Liu C., Jiang A., Guan Q., Sun X., Liu S., ... & Hu W.** (2019). The effects of cold plasma-activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1842-1851.
- Chen D., Peng P., Zhou N., Cheng Y., Min M., Ma Y., ... & Ruan R.** (2019). Evaluation of *Cronobacter sakazakii* inactivation and physicochemical property changes of non-fat dry milk powder by cold atmospheric plasma. *Food chemistry*, 290, 270-276.
- Chen H., Liou B. K., Chen C. S., & Chuang P. T.** (2020). Risk analysis method used in small-and medium-sized food enterprises implementing ISO 22000: 2018 and HACCP to conditionally determine "inspection-acceptance" as a critical control point. *Accreditation and Quality Assurance*, 25, 339-354.
- Chen R., Ma F., Li P. W., Zhang W., Ding X. X., Zhang Q. I., ... & Xu B. C.** (2014). Effect of ozone on aflatoxins detoxification and nutritional quality of peanuts. *Food chemistry*, 146, 284-288.
- Chen W., Ma H., & Wang Y. Y.** (2022). Recent advances in modified food proteins by high intensity ultrasound for enhancing functionality: Potential mechanisms, combination with other methods, equipment innovations and future directions. *Ultrasonics sonochemistry*, 85, 105993.
- Chen X., Tume R. K., Xiong Y., Xu X., Zho G., Chen C., & Nishiumi T.** (2018). Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(17), 2981-3003.
- Chen Y., Zhang Y., Jiang L., Chen G., Yu J., Li S., & Chen Y.** (2020). Moisture molecule migration and quality changes of fresh wet noodles dehydrated by cold plasma treatment. *Food chemistry*, 328, 127053.
- Chitrakar B., Zhang M., & Bhandari B.** (2021). Improvement strategies of food supply chain through novel food processing technologies during COVID-19 pandemic. *Food Control*, 125, 108010.

- Choi S., Puligundla P., & Mok C.** (2016). Corona discharge plasma jet for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on inoculated pork and its impact on meat quality attributes. *Annals of Microbiology*, 66(2), 685-694.
- Cholewicka-Goździk K.** (2016). Struktura normy ISO 9001: 2015: podstawowe wymagania. *Problemy jakości*, (1), 25-30.
- Choo Y. X., Teh L. K., & Tan C. X.** (2022). Effects of sonication and thermal pasteurization on the nutritional, antioxidant, and microbial properties of noni juice. *Molecules*, 28(1), 313.
- Chotkowski J., & Rembeza J.** (2010). Kierunki doskonalenia instytucji rynkowych sektora rolno-spożywczego w Polsce. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 12(4).
- Chotyakul N., & Rungpichayapichet P.** (2018). Commercialization of high pressure processed foods: a consumer choice for quality and safety products. *Science, Engineering and Health Studies*, 139-148.
- Chwaszcz B.; Józefczyk R.; Bilek M.; Balawajder M.** (2015). Ozonowanie jako metoda przedłużania trwałości przechowalniczej owoców maliny w warunkach niechłodniczych. *kształtowanie jakości żywności*, 15. 25-28.
- Chylek E. K., Kujawiński W., & Niepytalski T.** (2016). Innowacje i ich wpływ na zrównoważony rozwój sektora rolno-spożywczego w Polsce. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 86(4), 7-25.
- Climaco W. L. D. S., Melo É. D. F., Vaz D. P., Saldanha M. M., Pinto M. F. V. D. S., Fernandes L. C. C., ... & Lara L. J. C.** (2018). Eggshell microbiology and quality of hatching eggs subjected to different sanitizing procedures. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53, 1177-1183.
- Córdova A., Astudillo-Castro C., Ruby-Figueroa R., Valencia P., & Soto C.** (2020). Recent advances and perspectives of ultrasound assisted membrane food processing. *Food Research International*, 133, 109163.
- Crawford Y. J., Murano E. A., Olson D. G., & Shenoy K.** (1996). Use of high hydrostatic pressure and irradiation to eliminate *Clostridium sporogenes* spores in chicken breast. *Journal of Food Protection*, 59(7), 711-715.
- da Luz S. R., Villanova F. A., Rockembach C. T., Ferreira C. D., Dallagnol L. J., Monks J. L. F., & de Oliveira M.** (2022). Reduced of mycotoxin levels in parboiled rice by using ozone and its effects on technological and chemical properties. *Food chemistry*, 372, 131174.
- da Rocha Ferreira E. H., Rosenthal A., Calado V., Saraiva J., & Mendo S.** (2009). *Byssoschlamys nivea* inactivation in pineapple juice and nectar using high pressure cycles. *Journal of Food Engineering*, 95(4), 664-669.
- da Silva F. V. M.** (2017). High-pressure processing effect on microorganisms in fruit and vegetable products. In *High pressure processing of fruit and vegetable products*. CRC Press. 3-38.
- Daher D., Le Gourrierec S., & Pérez-Lamela C.** (2017). Effect of high pressure processing on the microbial inactivation in fruit preparations and other vegetable based beverages. *Agriculture*, 7(9), 72.
- Dai J., Bai M., Li C., Cui H., & Lin L.** (2020). Advances in the mechanism of different antibacterial strategies based on ultrasound technique for controlling bacterial contamination in food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 211-222.
- Darvish H., Ramezan Y., Khani M. R., & Kamkari A.** (2022). Effect of low-pressure cold plasma processing on decontamination and quality attributes of Saffron (*Crocus sativus* L.). *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2082-2090.
- Dasan B. G., Boyaci I. H., & Mutlu M.** (2017). Nonthermal plasma treatment of *Aspergillus* spp. spores on hazelnuts in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system: Impact of process parameters and surveillance of the residual viability of spores. *Journal of Food Engineering*, 196, 139-149.

- Dasan B. G., Onal-Ulusoy B., Pawlat J., Diatczyk J., Sen Y., & Mutlu M.** (2017). A new and simple approach for decontamination of food contact surfaces with gliding arc discharge atmospheric non-thermal plasma. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 650-661.
- Dasan B. G., Yildirim T., & Boyaci I. H.** (2018). Surface decontamination of eggshells by using non-thermal atmospheric plasma. *International journal of food microbiology*, 266, 267-273.
- De Simone N., Pace B., Grieco F., Chimienti M., Tyibilika V., Santoro V., ... & Russo P.** (2020). Botrytis cinerea and table grapes: A review of the main physical, chemical, and bio-based control treatments in post-harvest. *Foods*, 9(9), 1138.
- de Souza L. P., Faroni L. R. D. A., Heleno F. F., Pinto F. G., de Queiroz M. E. L. R., & Prates L. H. F.** (2018). Ozone treatment for pesticide removal from carrots: Optimization by response surface methodology. *Food chemistry*, 243, 435-441.
- Deng J., Schoenbach K. H., Buescher E. S., Hair P. S., Fox P. M., & Beebe S. J.** (2003). The effects of intense submicrosecond electrical pulses on cells. *Biophysical journal*, 84(4), 2709-2714.
- Deng X., Ma Y., Lei Y., Zhu X., Zhang L., Hu L., ... & Zhang J.** (2021). Ultrasonic structural modification of myofibrillar proteins from *Coregonus peled* improves emulsification properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105659.
- Dev S. B., Rabussay D. P., Widera G., & Hofmann G. A.** (2000). Medical applications of electroporation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 206-223.
- Devlieghere F., Vermeiren L., & Debevere J.** (2004). New preservation technologies: possibilities and limitations. *International dairy journal*, 14(4), 273-285.
- Dirks B. P., Dobrynin D., Fridman G., Mukhin Y., Fridman A., & Quinlan J. J.** (2012). Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. *Journal of food protection*, 75(1), 22-28.
- Djekic I., Jankovic D., & Rajkovic A.** (2017). Analysis of foreign bodies present in European food using data from Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF). *Food control*, 79, 143-149.
- Doevenspeck H.** (1960). Verfahren und Vorrichtung zur Gewinnung der einzelnen Phasen aus dispersen Systemen. German Patent, DE 1237541
- Dolata M., & Hadryjańska B.** (2013). Konkurencyjność przedsiębiorstw sektora rolno-spożywczego: Companies competitiveness of the agri-food sector. *Zeszyty Naukowe UwS seria Administracja i Zarządzanie*, 26(99), 187-199.
- Dolatowski Z. J., & Stasiak D. M.** (2002). Czystość mikrobiologiczna mięsa i szynki parzonej po obróbce ultradźwiękowej. *ACTA Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 1, 55-65.
- Dolatowski Z. J., & Stasiak D. M.** (2003). Ultradźwięki w przetwórstwie żywności. *Inżynieria Rolnicza*, 7.
- Donsi G., Ferrari G., & Maresca P.** (2007). Pulsed high pressure treatment for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae*: the effect of process parameters. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 984-990.
- Drożdż J., & Mroczek R.** (2022). Przemysł spożywczy w Polsce podczas pandemii COVID-19 oraz wojny w Ukrainie. *Przemysł Spożywczy*, 76(8), 14-22.
- Drożdż J., Mroczek R., & Staszczak A.** (2021). Przemysł spożywczy po turbulencjach spowodowanych pandemią COVID-19. *Przemysł Spożywczy*, 75(8), 12-19.
- Duarte-Sierra A., Forney C. F., Thomas M., Angers P., & Arul J.** (2022). Phytochemical Enhancement in Broccoli Florets after Harvest by Controlled Doses of Ozone. *Foods*, 11(15), 2195.
- Duczowska-Malysz K.** (2009). Miejsce doradztwa w innowacyjności sektora rolno-spożywczego. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 4, 19-32.
- Dwivedi S., Prajapati P., Vyas N., Malviya S., & Kharia A.** (2017). A review on food preservation: methods, harmful effects and better alternatives. *Asian Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 3(6), 193-199.

- Ebihara K., Stryczewska H., Ikegami T., Mitsugi F., & Pawlat J.** (2011). On-site ozone treatment for agricultural soil and related applications. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(7), 148-152.
- Echour S., & Nbigui T.** (2021). ISO 9001 Quality Approach and Performance Literature Review. *European Scientific Journal*, 17, 128-145.
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ Panel), Koutsoumanis K., Alvarez-Ordóñez A., Bolton D., Bover-Cid S., Chemaly M., ... & Allende A.** (2022). The efficacy and safety of high-pressure processing of food. *EFSA Journal*, 20(3), e07128.
- Ekezie F. G. C., Sun D. W., & Cheng J. H.** (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in food science & technology*, 69, 46-58.
- Farhadi Chitgar M., Aalami M., Maghsoudlou Y., & Milani E.** (2017). Comparative study on the effect of heat treatment and sonication on the quality of barberry (*Berberis vulgaris*) juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12956.
- Fellows P. J.** (2022). *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead publishing.
- Fernandez M. V., Denoya G. I., Agüero M. V., Jagus R. J., & Vaudagna S. R.** (2018). Optimization of high pressure processing parameters to preserve quality attributes of a mixed fruit and vegetable smoothie. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 170-179.
- Firlej K.** (2015). *Przemysł spożywczy—makrootoczenie, inwestycje, ekspansja zagraniczna*. Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
- Foster K. R.** (2000). Thermal and nonthermal mechanisms of interaction of radio-frequency energy with biological systems. *IEEE Trans. Plasma Science*, 28, 15–23.
- Fung F., Wang H. S., & Menon S.** (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical journal*, 41(2), 88-95.
- Galanakis C. M.** (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, 10(1), 128.
- Garlińska-Bielawska J., & Jakóbiak K.** Polski eksport artykułów żywnościowych do UE przed przystąpieniem i po przystąpieniu do Wspólnoty. Współczesne determinanty stosunków międzynarodowych, 63-70.
- Gertzou I. N., Drosos P. E., Karabagias I. K., & Riganakos K. A.** (2016). Combined effect of ozonation and packaging on shelf-life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Science & Technology*, 53(12), 4270–4277.
- Gertzou I. N., Karabagias I. K., Drosos P. E., & Riganakos K. A.** (2017). Effect of combination of ozonation and vacuum packaging on shelf-life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Engineering*, 213, 18–26.
- Gimenez B., Graiver N., Giannuzzi L., & Zaritzky N.** (2021). Treatment of beef with gaseous ozone: Physicochemical aspects and antimicrobial effects on heterotrophic microflora and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*, 121, 107602.
- Głodowska M., & Gałazka A.** (2017). Wpływ rolnictwa ekologicznego na środowisko w koncepcji rozwoju zrównoważonego. *Więś i Rolnictwo*, (2 (175)), 147-165.
- Gonçalves A. A., & Santos T. C. L.** (2019). Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging. *LWT—Food Science and Technology*, 99, 568–575.
- González-Balderas R. M., Velásquez-Orta S. B., Valdez-Vázquez I., & Ledesma M. O.** (2020). Intensified recovery of lipids, proteins, and carbohydrates from wastewater-grown microalgae *Desmodesmus sp.* by using ultrasound or ozone. *Ultrasonics sonochemistry*, 62, 104852.
- Gouvea F. S., Koutchma T., Ferreira E. H. R., Walter E. H. M., & Rosenthal A.** (2023). Resistance of *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, and *Listeria monocytogenes* in high and low-acidity juices processed by high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 395, 110189.

- Gouvea F. S., Padilla-Zakour O. I., Worob R. W., Xavier B. M., Walter E. H., & Rosenthal A.** (2020). Effect of high-pressure processing on bacterial inactivation in açai juices with varying pH and soluble solids content. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102490.
- Gómez-Salazar J. A., Galván-Navarr A., Lorenzo, J. M., & Sosa-Morales M. E.** (2021). Ultrasound effect on salt reduction in meat products: a review. *Current opinion in food science*, 38, 71-78.
- Grabowski M., Holub M., Balcerak M., Kalisiak S., & Dąbrowski W.** (2015). Black pepper powder microbiological quality improvement using DBD systems in atmospheric pressure. *The European Physical Journal Applied Physics*, 71(2), 20811.
- Grzelak M. M., & Roszko-Wójtowicz E.** (2015). Development of Polish foreign trade in agri-food products after Poland's accession to the EU. *Acta Scientiarum Polonorum. Oeconomia*, 14(4).
- Guo X. N., Jiang Y., Xing J. J., & Zhu K. X.** (2020). Effect of ozonated water on physicochemical, microbiological, and textural properties of semi-dried noodles. *Journal of food processing and preservation*, 44(4), e14404.
- Hać-Szymańczuk E., Cegiłka A., & Piwowarek K.** (2019). Obróbka termiczna surowców i produktów mięsnych gwarantem ich bezpieczeństwa mikrobiologicznego. *Gospodarka Mięsna*, (5), 18-20.
- Hajizadeh Namin A., Abbaszadeh R., & Pouraghdam A.** (2021). Investigation of the effect of non-thermal plasma on increasing the shelf life of fresh-cut pears. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 4 (Special Issue-Fresh-cut Products), 91-102.
- Hasheminya S. M., & Dehghannya J.** (2022). Non-thermal processing of black carrot juice using ultrasound: Intensification of bioactive compounds and microbiological quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(9), 5848-5858.
- Hassoun A., Prieto M. A., Carpena M., Bouzembrak Y., Marvin H. J., Pallarés N., ... & Bono G.** (2022). Exploring the role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Research International*, 162, 112068.
- He Q., Liu D., Ashokkumar M., Ye, X., Jin T. Z., & Guo M.** (2021). Antibacterial mechanism of ultrasound against *Escherichia coli*: Alterations in membrane microstructures and properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105509.
- He Y., Ye F., Tao J., Zhang Z., & Zhao G.** (2023). Ozone exposure tunes the physicochemical properties of sweet potato starch by modifying its molecular structure. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 124002.
- Hertwig C., Reineke K., Ehlbeck J., Erdoğdu B., Rauh C., & Schlüter O.** (2015). Impact of remote plasma treatment on natural microbial load and quality parameters of selected herbs and spices. *Journal of Food Engineering*, 167, 12-17.
- Hoigné J.** (1998). *The Handbook of Environmental Chemistry*; Springer: Berlin, Germany, 5, 83-141.
- Hojnik N., Cvelbar U., Tavčar-Kalcher G., Walsh J. L., & Križaj I.** (2017). Mycotoxin decontamination of food: Cold atmospheric pressure plasma versus "classic" decontamination. *Toxins*, 9(5), 151.
- Hoque M., Talukdar S., Roy K. R., Hossain M. A., & Zzaman W.** (2024). Sonication and thermal treatment of pineapple juice: Comparative assessment of the physicochemical properties, antioxidant activities and microbial inactivation. *Food Science and Technology International*, 30(1), 37-48.
- Hozák P., Jirešová J., Khun J., Scholtz V., & Julák J.** (2022). Shelf life prolongation of fresh strawberries by nonthermal plasma treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(9), e16150.
- Hu Y. H., Wang C. Y., & Chen B. Y.** (2020). Effects of high-pressure processing and thermal pasteurization on quality and microbiological safety of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 3334-3344.

- Huang D., Men K., Li D., Wen T., Gong Z., Sunden B., & Wu Z.** (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950.
- Huang H. W., Lung H. M., Yang B. B., & Wang C. Y.** (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*, 40, 250-259.
- Huang H. W., Wu S. J., Lu J. K., Shy Y. T., & Wang, C. Y.** (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food control*, 72, 1-8.
- Huhu J. M.** (2020). Reducing food loss and waste through innovative food preservation technologies applied by women in rural areas in Kenya. *International Journal of Latest Research in Humanities and Social Science*, 3(1), 76-82.
- Hülshager H., Potel J., & Niemann E. G.** (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiation and environmental biophysics*, 20, 53-65.
- Janowicz M., & Lenart A.** (2015). Selected physical properties of convection dried apples after HHP treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 828-836.
- Jeziński A.** (2022). Zarządzanie łańcuchami dostaw żywności w czasie pandemii COVID-19 – wybrane problemy. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 7(2), 51-66.
- Ji Y., Hu W., Liao J., Jiang A., Xiu Z., Gaowa S., ... & Liu C.** (2020). Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5586-5595.
- Joardder M. U., Hasan Masud M., Joardder M. U., & Masud M. H.** (2019). A brief history of food preservation. *Food Preservation in Developing Countries: Challenges and Solutions*, 57-66.
- Jung S., & Tonello-Samson C.** (2018). High hydrostatic pressure food processing: Potential and limitations. *Green Chemistry*, Royal Society of Chemistry Press.
- Júnior L. M., Cristianini M., Padula M., & Anjos C. A. R.** (2019). Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages. *Food research international*, 119, 920-930.
- Kapierska E.** (2015). Are Polish agri-food products competitive on the EU market?. *Problems of World Agriculture/Problemy Rolnictwa Światowego*, 15(30), 89-100.
- Kader A. A.** (2008). Fresh-cut mangos as a value-added product (literature review and interviews). Postharvest horticulture consultant, Kader consulting service. Davis CA, USA, 1-42.
- Käferstein F., & Abdussalam M.** (1999). Food safety in the 21st century. *Bulletin of the World Health Organization*, 77(4), 347.
- Kalsi B. S., Singh S., & Alam M. S.** (2023). Influence of ultrasound processing on the quality of guava juice. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), e14163.
- Kan D., Zhang W., Lorenzo J. M., & Chen X.** (2021). Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 61(11), 1914-1933.
- Kaproth-Joslin K. A., Nicola R., & Dogra V. S.** (2015). The history of US: from bats and boats to the bedside and beyond: RSNA centennial article. *Radiographics*, 35(3), 960-970.
- Karwacka M., Ciużyńska A., Lenart A., & Janowicz M.** (2020). Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: A Review. *Sustainability*, 12(16), 6463.
- Katsigiannis A. S., Bayliss D. L., & Walsh J. L.** (2022). Cold plasma for the disinfection of industrial food-contact surfaces: An overview of current status and opportunities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 1086–1124.
- Katsimichas A., Stath S., Dimopoulos G., Giannakourou M., & Taoukis P.** (2024). Kinetics of pulsed electric fields assisted pigment extraction from *Chlorella pyrenoidosa*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91, 103547.
- Ketkaew S.** (2012). Plasma ozonizer using micro-converter for ammonia (NH<sub>3</sub>) decreasing in shrimp food production. *Procedia Engineering*, 32, 148-154.

- Khandpur P., & Gogate P. R.** (2016). Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics sonochemistry*, 29, 337-353.
- Khemakhem M., Attia H., & Ayadi M. A.** (2019). The effect of pH, sucrose, salt and hydrocolloid gums on the gelling properties and water holding capacity of egg white gel. *Food Hydrocolloids*, 87, 11–19.
- Khezerlou A., Zolfaghari H., Forghani S., Abedi-Firoozjah R., Alizadeh Sani M., Negahdari B., ... & McClements D. J.** (2023). Combining non-thermal processing techniques with edible coating materials: an innovative approach to food preservation. *Coatings*, 13(5), 830.
- Kielbasa M.** (2015). Przyszłość sektora rolno–spożywczego w Polsce w odniesieniu do stanu obecnego. *Progress in Economic Sciences*, (2), 236-248.
- Kim B., Yun H., Jung S., Jung Y., Jung H., Choe W., & Jo C.** (2011). Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. *Food microbiology*, 28(1), 9-13.
- Kim H. J., Yong H. I., Park S., Choe W., & Jo C.** (2013). Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin. *Current Applied Physics*, 13(7), 1420-1425.
- Kim H. J., Yong H. I., Park S., Kim K., Choe W., & Jo C.** (2015). Microbial safety and quality attributes of milk following treatment with atmospheric pressure encapsulated dielectric barrier discharge plasma. *Food Control*, 47, 451-456.
- Kim S. Y., Gu H. L., Ju H., Jeon J., Jeong S. H., & Lee D. U.** (2024). Effects of pulsed electric fields on controlling fermentation rate of brined *Raphanus sativus*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 92, 103553.
- Kim S., Jeong S. H., Choi H. S., Yeo H., & Lee D. U.** (2023). Accelerated brining kinetics and NaCl distribution of Chinese cabbage (*Brassica rapa ssp. pekinensis*) using pulsed electric field. *LWT*, 179, 114634.
- King T., Col M., Farber, J. M., Eisenbrand G., Zabarás D., Fox E. M., & Hill J. P.** (2017). Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 160-175.
- Kingsly A. R. P., Balasubramaniam V. M., & Rastogi N. K.** (2009). Effect of high-pressure processing on texture and drying behavior of pineapple. *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 369-381.
- Knorr D., & Augustin M. A.** (2021). Food processing needs, advantages and misconceptions. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 103-110.
- Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M.** (2023). Effect of high-powered ultrasound on bioactive compounds and microbiological stability of juices. *Applied Sciences*, 13(19), 10961.
- Kogelschatz U.** (1992). Silent discharges and their applications—invited lecture. In proceedings of the 10th international conference on gas discharges and their applications, Swansea, UK. 13-18.
- Kogelschatz U.** (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma chemistry and plasma processing*, 23(1), 1-46.
- Kogelschatz U., Eliasson B., & Egli W.** (1999). From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges. *Pure and Applied Chemistry*, 71(10), 1819-1828.
- Kopaćki M., Pawłat J., Skwaryło-Bednarz B., Jamiolkowska A., Stępniać P. M., Kiczorowski P., & Golan K.** (2021). Physical crop postharvest storage and protection methods. *Agronomy*, 11(1), 93.
- Korachi M., Ozen F., Aslan N., Vannini L., Guerzoni M. E., Gottardi D., & Ekinçi F. Y.** (2015). Biochemical changes to milk following treatment by a novel, cold atmospheric plasma system. *International Dairy Journal*, 42, 64–69.

- Koshani R., & Jafari S. M.** (2019). Ultrasound-assisted preparation of different nanocarriers loaded with food bioactive ingredients. *Advances in Colloid and Interface Science*, 270, 123-146.
- Kotsanopoulos K. V., & Arvanityannis I. S.** (2017). The role of auditing, food safety, and food quality standards in the food industry: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 16(5), 760-775.
- Kowalczyk S.** (2020). Sektor żywnościowy w czasach pandemii. *Kwartalnik nauk o przedsiębiorstwie*, 56(3), 43-53.
- Kowalczyk S., & Kwasek M.** (2020). Jakość żywności na polskim rynku—zagrożenia i sposoby ich eliminacji. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 3(364), 75-100.
- Kowalski A.** (2009). Polish food sector five years after the accession. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 320(3), 3-14.
- Krosowiak K., Śmigielski K., Dziugan P.** (2007). Zastosowania ozonu w przemyśle spożywczym. *Przemysł Spożywczy*, 11, 26–29
- Krzywinski T., & Tokarczyk G.** (2013). Przetwarzanie i utrwalanie mięsa w dziejach świata (część I). *Gospodarka Mięsna*, 65(02), 36-41.
- Kucharyk S., Rudy M., Gil M., Stanisławczyk R., & Mroczek K.** (2019). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów mięsnych oraz ich wpływ na zdrowie człowieka i środowisko. *Polish Journal for Sustainable Development*. 23(2), 53–62.
- Kuzniar W., Kawa M., & Kuzniar P.** (2016). Konsumentów wobec bezpiecznych rozwiązań w zakresie produkcji żywności. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Problemy Rolnictwa Światowego*, 16(3), 243-250.
- Laika J., Viteritti E., Molina-Hernandez J. B., Sergi M., Neri L., Laurita R., ... & Chaves-López C.** (2024). Efficiency of cold atmospheric plasma under ozone (O<sub>3</sub>) and nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) regimes on the degradation of aflatoxins and ochratoxin A in solid state and in spiked pistachio kernels. *Food Control*, 159, 110286.
- Larrea-Wachtendorff D., Del Grosso V., & Ferrari G.** (2022). Evaluation of the physical stability of starch-based hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Gels*, 8(3), 152.
- Lazarenko B., Reshetko., E.V.** (1968). Enhancement of juice extraction process electrical pulses, *Canning and Vegetable Drying Industry*, 8, 9-11.
- Lee H. J., Jung H., Choe W., Ham J. S., Lee J. H., & Jo C.** (2011). Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets. *Food microbiology*, 28(8), 1468-1471.
- Lee S. H., Choi W., & Jun S.** (2016). Conventional and emerging combination technologies for food processing. *Food engineering reviews*, 8, 414-434.
- Li H., Sun X., Liao X., & Gänzle M.** (2020). Control of pathogenic and spoilage bacteria in meat and meat products by high pressure: Challenges and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3476-3500.
- Liao X., Su Y., Liu D., Chen S., Hu Y., Ye X., Wang J., & Ding T.** (2018). Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, 307–314.
- Lin C. M., Herianto S., Chen H. L., Chiu Y. C., & Hou C. Y.** (2021). The application of a novel non-thermal plasma device with double rotary plasma jets for inactivation of *Salmonella Enteritidis* on shell eggs and its effects on sensory properties. *International Journal of Food Microbiology*, 355, 109332.
- Lin, S. H., Chang C. K., Lin C. T., Gavahian M., Li P. H., Tsai S. Y., ... & Hsieh C. W.** (2024). Pulse electric field pretreatment delays the texture deterioration of sweet persimmon (*Diospyros kaki* L.) during postharvest storage. *LWT*, 191, 115711.
- Loveday S. M., Sarkar A., & Singh H.** (2013). Innovative yoghurts: Novel processing technologies for improving acid milk gel texture. *Trends in food science & technology*, 33(1), 5-20.



- Maggi A., Gola S., Rovere P., Miglioli L., Dall'Aglio G., & Loenneborg N. G.** (1996). Effects of combined high pressure-temperature treatments on *Clostridium sporogenes* spores in liquid media. *Industria Conserve*, 71(1), 8-14.
- Mahendran R., Ramanan K. R., Barba F. J., Lorenzo J. M., López-Fernández O., Munekata P. E., ... & Tiwari B. K.** (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in food science & technology*, 88, 67-79.
- Majewski M., & Dziubdziela L.** (2018). Analiza powiadomień dotyczących żywności pochodzenia zwierzęcego zgłoszonych do RASFF przez Polskę. *Życie Weterynaryjne*, 93(03).
- Majid I., Nayik G. A., Da S. M., & Nanda, V.** (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 454-462.
- Margean A., Lupu M. I., Alexa E., Padureanu V., Canja C. M., Cocan I., ... & Poiana M. A.** (2020). An overview of effects induced by pasteurization and high-power ultrasound treatment on the quality of red grape juice. *Molecules*, 25(7), 1669.
- Mari M., Bertolini P., & Pratella G. C.** (2003). Non-conventional methods for the control of post-harvest pear diseases. *Journal of Applied Microbiology*, 94(5), 761-766.
- Martindale, W. (2017). The potential of food preservation to reduce food waste. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76(1), 28-33.
- McKay A. M., Linton M., Stirling J., Mackle A., & Patterson M. F.** (2011). A comparative study of changes in the microbiota of apple juice treated by high hydrostatic pressure (HHP) or high pressure homogenisation (HPH). *Food Microbiology*, 28(8), 1426-1431.
- Mehta N., Kumar P., Verma A. K., Umaraw P., Khatkar S. K., Khatkar A. B., ... & Sazili A. Q.** (2022). Ultrasound-assisted extraction and the encapsulation of bioactive components for food applications. *Foods*, 11(19), 2973.
- Mikš-Krajnik M., Feng L. X. J., Bang W. S., & Yuk H. G.** (2017). Inactivation of *Listeria monocytogenes* and natural microbiota on raw salmon fillets using acidic electrolyzed water, ultraviolet light or/and ultrasounds. *Food Control*, 74, 54-60.
- Mizik T.** (2021). Agri-food trade competitiveness: A review of the literature. *Sustainability*, 13(20), 11235.
- Monteiro S. H., Silva E. K., Alvarenga V. O., Morae J., Freitas M. Q., Silva M. C., ... & Cruz A. G.** (2018). Effects of ultrasound energy density on the non-thermal pasteurization of chocolate milk beverage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 1-10.
- Morais A. T., Morais S. T., Feitor J. F., Cavalcante K. N., Catunda L. G., Walkling-Ribeiro M., ... & Ahrné L. M.** (2023). Physico-chemical and structural modifications of caseins in micellar casein isolate induced by pulsed electric field. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103476.
- Morales-De la Peña M., Arredondo-Ochoa T., Welti-Chanes J., & Martín-Belloso O.** (2023). Application of moderate intensity pulsed electric fields in red prickly pears and soymilk to develop a plant-based beverage with potential health-related benefits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 88, 103421.
- More P. R., Jambak A. R., & Arya S. S.** (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends in Food Science & Technology*, 128, 296-315.
- Moutiq R., Misra N. N., Mendonça A., & Keener K.** (2020). In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: Microbial, quality and storage studies. *Meat Science*, 159, 107942.
- Mozzon M., Mannozi C., Foligni R., Osimani A., Galdenzi F., Laurita R., ... & Dalla Rosa M.** (2023). Assessment of lipid oxidation and microbial decontamination of sardine (*Sardina pilchardus*) fillets processed by plasma-activated water (PAW). *LWT*, 188, 115401.

- Mukhopadhyay S., Sokorai K., Ukuku D., Fan X., & Juneja V.** (2017). Effect of high hydrostatic pressure processing on the background microbial loads and quality of cantaloupe puree. *Food Research International*, 91, 55-62.
- Muntean M. V., Marian O., Barbier V., Cătunescu, G. M., Ranta O., Drocas I., & Terhes S.** (2016). High pressure processing in food industry—characteristics and applications. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 377-383.
- Nagyová E., Andocsová A., Géci A., Zajác P., Palkovič J., Košičiarová I., & Golian J.** (2019). Consumers' awareness of food safety. *Potravinárstvo*, 13(1), 8-17.
- Nalepa C.** (1997). Oxidizing biocides: Properties and applications. In *Association of Water Technologies Fall Meeting*; Association of Water Technologies (AWT): Traverse City, MI, USA.
- Natarajan D.** (2017). ISO 9001 Quality management systems. Springer International Publishing.
- Nath K. G., Pandiselvam R., & Sunil C. K.** (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food-A review. *Journal of Food Engineering*, 111521.
- Nema P. K., Sehrawat R., Ravichandran C., Kaur B. P., Kumar A., & Tarafdar A.** (2022). Inactivating food microbes by high-pressure processing and combined nonthermal and thermal treatment: a review. *Journal of Food Quality*.
- Ngadi M.O., Bazhal M.I., Raghaven G.S.V.** (2003). Engineering aspects of pulsed electroporation of vegetable tissues. *Agricultural Engineering International: the CIGR J. Scient. Res. Devel.*, 5, 1-10.
- Niedźwiedz I., Plotka-Wasyłka J., Kapusta I., Simeonov V., Stój A., Waško A., ... & Polak-Berecka M.** (2022). The impact of cold plasma on the phenolic composition and biogenic amine content of red wine. *Food Chemistry*, 381, 132257.
- Nikmaram N., & Keener K. M.** (2022). The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products. *Lwt*, 154, 112729.
- Nonglait D. L., Chukkan S. M., Arya S. S., Bhat M. S., & Waghmare R.** (2022). Emerging non-thermal technologies for enhanced quality and safety of fruit juices. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(10), 6368-6377.
- Noriega E., Shama G., Laca A., Díaz M., & Kong M. G.** (2011). Cold atmospheric gas plasma disinfection of chicken meat and chicken skin contaminated with *Listeria innocua*. *Food microbiology*, 28(7), 1293-1300.
- Nosecka B., Krasowicz S., Pawlak K., Kita K., & Zaremba Ł.** (2012). Czynniki konkurencyjności sektora rolno-spożywczego we współczesnym świecie. Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej. Warszawa.
- Nowastowski J.** (2020). Aktualny system normalizacji w Polsce w obszarze elektryki. *Energetyka*, (3), 140-143.
- Nowosad K.** (2022). Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego (PEF) jako zabiegu wspomagającego ekstrakcję. *Wiadomości Chemiczne*, 76, 3-4.
- Nunes B. V., da Silva C. N., Bastos S. C., & de Souza V. R.** (2022). Microbiological inactivation by ultrasound in liquid products. *Food and Bioprocess Technology*, 15(10), 2185-2209.
- Obadi M., Zhu K. X., Peng W., Sulieman A. A., Mohammed K., & Zhou H. M.** (2018). Effects of ozone treatment on the physicochemical and functional properties of whole grain flour. *Journal of Cereal Science*, 81, 127-132.
- Ochwanowska E., Czarny-Działak M., Żeber-Dzikowska I., Wójtowicz B., Gworek B., Król H., ... & Chmielewski J.** (2019). Substancje chemiczne w żywności jako zagrożenie zdrowotne. *Przemysł Chemiczny*, 98(10), 1614-1618.
- Okpała C. O. R.** (2014). Investigation of quality attributes of ice-stored Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by sequential minimal ozone treatment. *LWT—Food Science and Technology*, 57(2), 538–547.
- Okpała C. O. R.** (2015). Physicochemical changes in minimal ozone-treated fresh shrimp stored on ice tandem with microbiological efficacy of treatment. *Nigerian Food Journal*, 33(2), 74–87.

- Okpala C. O. R., Bono G., Geraci M. L., Sardo G., Vitale S., & Schaschke C. J.** (2016). Lipid oxidation kinetics of ozone-processed shrimp during iced storage using peroxide value measurements. *Food Bioscience*, 16, 5–10.
- Ong K. C., Cash J. N., Zabik M. J., Siddiq M., & Jones A. L.** (1996). Chlorine and ozone washes for pesticide removal from apples and processed apple sauce. *Food chemistry*, 55(2), 153-160.
- Onyeaka H., Miri T., Hart A., Anumudu C., & Nwabor O. F.** (2023). Application of Ultrasound Technology in Food Processing with emphasis on bacterial spores. *Food Reviews International*, 39(7), 3663-3675.
- Ostermeier R., Hill K., Dingis A., Töpfl S., & Jäger H.** (2021). Influence of pulsed electric field (PEF) and ultrasound treatment on the frying behavior and quality of potato chips. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102553.
- Ott L. C., Jochum J., Burrough L., Clark S., Keener K., & Mellata M.** (2022). High voltage atmospheric cold plasma inactivation of *Listeria monocytogenes* in fresh Queso Fresco cheese. *Food Microbiology*, 105, 104007.
- Oziembłowski M., Drózd T., & Wrona P.** (2013). Oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) na mikroorganizmy w kontekście technologii żywności. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12(89), 222-225.
- Ozonek J.** (1993). *Laboratorium syntezy ozonu: podstawy procesowe, pomiary elektryczne, ekotechnologie*, Wydawnictwa Uczelniane.
- Pagán R., Manas P., Raso J., & Condón S.** (1999). Bacterial resistance to ultrasonic waves under pressure at nonlethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) temperatures. *Applied and environmental microbiology*, 65(1), 297-300.
- Pandiselvam R., Singh A., Agriopoulou S., Sachadyn-Król M., Aslam R., Lima C. M. G., ... & Khaneghah A. M.** (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74-86.
- Panghal A., Chhikara N., Sindhu N., & Jaglan S.** (2018). Role of Food Safety Management Systems in safe food production: A review. *Journal of food safety*, 38(4), e12464.
- Paredes-Sabja D., Gonzalez M., Sarke M. R., & Torres, J. A.** (2007). Combined effects of hydrostatic pressure, temperature, and pH on the inactivation of spores of *Clostridium perfringens* type A and *Clostridium sporogenes* in buffer solutions. *Journal of Food Science*, 72(6), M202-M206.
- Patterson M. F., & Kilpatrick D. J.** (1998). The combined effect of high hydrostatic pressure and mild heat on inactivation of pathogens in milk and poultry. *Journal of food protection*, 61(4), 432-436.
- Pawlak K.** (2018). Comparative advantages of the Polish agri-food sector on the US market. In *Proceedings of the International Scientific Conference "Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy"* (No. 2).
- Pawlak K., & Kołodziejczak M.** (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13), 5488.
- Pawlak K., & Poczta W.** (2008). Pozycja konkurencyjna polskiego sektora rolno-spożywczego na jednolitym rynku europejskim. *Village and Agriculture (Więś i Rolnictwo)*, 4(141).
- Pawlat J., Starek A., Sujak A., Kwiatkowski M., Terebun P., & Budzeń M.** (2018a). Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1700064.
- Pawlewicz A., & Brodziński Z.** (2017). Zmiany potencjału wytwórczego w sektorze rolno-spożywczym w Polsce. *Roczniki (Annals)*, 2017(1230-2019-3571).
- Pawlikowska E., & Kręgiel D.** (2018). Naturalne konserwanty pochodzenia drobnoustrojowego. *Przemysł Spożywczy*, 72(7), 26-29.
- Pawlat J.** (2001). *Foaming system properties, generation of oxidants for environmental purposes using electrical discharge in foam*, PhD Thesis, Saga University.

- Pawlat J.** (2013). Electrical discharges in humid environments. Generators, effects, application Lublin: Politechnika Lubelska, 141 s.- ISBN 978-83-63569-37-2.
- Pawlat J., Diatczyk J., Gunaydin-Dasan B., Onal-Ulusoy B., & Mok Y. S.** (2017). Mini glide-arc plasma reactor for biological decontamination. *EJMT*, 1, 14.
- Pawlat J., Starek A., Sujak A., Terebun P., Kwiatkowski M., Budzeń M., & Andrejko D.** (2018b). Effects of atmospheric pressure plasma jet operating with DBD on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. *PLoS one*, 13(4).
- Pérez A. G., Sanz C., Ríos J. J., Ollas R., & Ollas J. M.** (1999). Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(4), 1652-1656.
- Perinban S., Orsat V., & Raghavan V.** (2022). Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples. *Food Chemistry*, 393, 133421.
- Petrescu D. C., Vermeir I., & Petrescu-Mag R. M.** (2020). Consumer understanding of food quality, healthiness, and environmental impact: A cross-national perspective. *International journal of environmental research and public health*, 17(1), 169.
- Picart-Palmade L., Cunault C., Chevalier-Lucia D., Belleville M. P., & Marchesseau S.** (2019). Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing. *Frontiers in nutrition*, 5, 130.
- Pietrzak D.** (2010). Perspektywy stosowania wysokich ciśnień w produkcji żywności wygodnej z mięsa drobiowego. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 17(2), 16-28.
- Pinela J., Prieto M. A., Pereira E., Jabeur L., Barreiro M. F., Barros L., & Ferreira I. C.** (2019). Optimization of heat-and ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* calyces for natural food colorants. *Food chemistry*, 275, 309-321.
- Pinon M., Alarcon-Rojo A., Paniwnyk L., Mason T., Luna L., & Renteria A.** (2018). Ultrasound for improving the preservation of chicken meat. *Food Science and Technology*, 39, 129-135.
- Plaza G.** (2017). Zarządzanie bezpieczeństwem produkcji żywności w kierunku poprawy jakości produktu. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 6(8), 27-36.
- Poczta W., & Pawlak K.** (2011). Potential competitiveness and competitive position of the Polish agri-food sector on the Single European Market. *Berichte über Landwirtschaft*, 89(1), 134-169.
- Pokhrel P. R., Toniazzi T., Boulet C., Oner M. E., Sablani S. S., Tang J., & Barbosa-Canovas G. V.** (2019). Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in carrot juice by combining high pressure processing, nisin, and mild thermal treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 93-102.
- Polak E.** (2007). Utrwalanie żywności metodą zamrażania lub chłodzenia. *Chłodnictwo: organ Naczelnej Organizacji Technicznej*, 42(3), 42-43.
- Popkin B. M.** (2017). Relationship between shifts in food system dynamics and acceleration of the global nutrition transition. *Nutrition reviews*, 75(2), 73-82.
- Przekora A., Pawlat J., Terebun P., Duday D., Canal C., Hermans S., ... & Ginalska G.** (2019). The effect of low temperature atmospheric nitrogen plasma on MC3T3-E1 preosteoblast proliferation and differentiation in vitro. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(27), 275401.
- Psarianos M., Iranshahi K., Rossi S., Gottardi D., & Schlüter O.** (2024). Quality evaluation of house cricket flour processed by electrohydrodynamic drying and pulsed electric fields treatment. *Food Chemistry*, 441, 138276.
- Psomas E. L., & Kafetzopoulos D. P.** (2015). HACCP effectiveness between ISO 22000 certified and non-certified dairy companies. *Food Control*, 53, 134-139.
- Purwanto A.** (2019). Influence of leadership, motivation, competence, commitment and culture on ISO 9001: 2015 performance in packaging industry. *Scholars Journal of Economics, Business and Management*.
- Pycia K.** (2020). Innowacyjne, niekonwencjonalne, ale współczesne metody konserwowania żywności-przegląd, charakterystyka i możliwości aplikacyjne. *Laboratorium-Przegląd Ogólnopolski*, 1, 32-37.

- Qin S., Zhou M., Wang Z., Li P., Huang S., & Meng J.** (2023). Effect of pulsed electric field on spore germination rate and enzyme activity of *Aspergillus niger*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103473.
- Rajendran S., Mallikarjunan P. K., & O'Neill E.** (2022). High pressure processing for raw meat in combination with other treatments: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16049.
- Ramazgina I., Tappi S., Rocculi P., Sacchetti G., Berardinelli A., Marseglia A., & Rizzi F.** (2016). Effect of cold plasma treatment on the functional properties of fresh-cut apples. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(42), 8010-8018.
- Ranjha M. M. A., Irfan S., Lorenzo J. M., Shafique B., Kanwal, R., Pateiro M., ... & Aadil R. M.** (2021). Sonication, a potential technique for extraction of phytoconstituents: A systematic review. *Processes*, 9(8), 1406.
- Rashvand M., Hajizadeh A., Akbarnia A., Abbaszadeh R., Nikzadfar M., & Pathare P. B.** (2022). Effect of dielectric barrier discharge cold plasma on the bruise susceptibility of plum fruit. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14182.
- Raso J., Heinz V., Alvarez I., & Toepfl S.** (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Rastogi N. K., Angersbach A., & Knorr D.** (2000). Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 45(1), 25-31.
- Režek Jambrak A., Nutrizio M., Djekić I., Pleslić S., & Chemat F.** (2021). Internet of nonthermal food processing technologies (Iontp): Food industry 4.0 and sustainability. *Applied Sciences*, 11(2), 686.
- Rinaldi M., Dhenge R., Rodolfi M., Bertani G., Bernini V., Dall'Acqua S., & Ganino T.** (2023). Understanding the impact of high-pressure treatment on physico-chemical, microstructural, and microbiological aspects of pumpkin cubes. *Foods*, 12(6), 1280.
- Rinaldi M., Littardi P., Ganino T., Aldini A., Rodolfi M., Barbanti D., & Chiavaro E.** (2020). Comparison of physical, microstructural, antioxidant and enzymatic properties of pineapple cubes treated with conventional heating, ohmic heating and high-pressure processing. *LWT*, 134, 110207.
- Rodrigues Petrus R., Joseph Churey J., & William Worobo R.** (2020). High pressure processing of apple juice: the most effective parameters to inactivate pathogens of reference. *British Food Journal*, 122(12), 3969-3979.
- Rogała P.** (2012). Przegląd zarządzania jakością jako mechanizm doskonalenia systemu zarządzania jakością ISO 9001. *Nauki o Zarządzaniu*, (10), 126-132.
- Rosak-Szyrocka J., & Abbase A. A.** (2020). Quality management and safety of food in HACCP system aspect. *Production Engineering Archives*, 26(2), 50-53.
- Ruiz-De Anda D., Ventura-Lara M. G., Rodríguez-Hernández G., & Ozuna C.** (2019). The impact of power ultrasound application on physicochemical, antioxidant, and microbiological properties of fresh orange and celery juice blend. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 3140-3148.
- Rye J. F., & Scott S.** (2018). International labour migration and food production in rural Europe: a review of the evidence. *Sociologia Ruralis*, 58(4), 928-952.
- Sakudo A., & Yagyu Y.** (2021). Application of a roller conveyor type plasma disinfection device with fungus-contaminated citrus fruits. *AMB Express*, 11, 1-8.
- Sammanee P., Ngamsanga P., Jainonthee C., Chupia V., Sawangrat C., Kerdjana W., ... & Pichpol D.** (2022). Decontamination of pathogenic and spoilage bacteria on pork and chicken meat by liquid plasma immersion. *Foods*, 11(12), 1743.
- Sapa A.** (2010). Bezpieczeństwo żywnościowe w krajach rozwijających się. *Roczniki Ekonomiczne Kujawsko-Pomorskiej Szkoły Wyższej w Bydgoszczy*, (3), 231-244.

- Sarangapani C., Keogh D. R., Dunne J., Bourke P., & Cullen P. J.** (2017). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food Chemistry*, 235, 324-333.
- Schoenbach K. H., Peterkin F. E., Alden R. W., & Beebe S. J.** (1997). The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications. *IEEE transactions on plasma science*, 25(2), 284-292.
- Segat A., Misra N. N., Fabbro A., Buchini F., Lippe G., Cullen P. J., & Innocente N.** (2014). Effects of ozone processing on chemical, structural and functional properties of whey protein isolate. *Food Research International*, 66, 365-372.
- Shrawat R., Kaur B. P., Nem P. K., Tewari S., & Kumar L.** (2021). Microbial inactivation by high pressure processing: Principle, mechanism and factors responsible. *Food Science and Biotechnology*, 30, 19-35.
- Serment-Moreno V., & Tonello-Samson C.** (2020). An introduction to packaging for commercial high-pressure processing (HPP) applications. In *Present and Future of High Pressure Processing*. Elsevier.381-404.
- Sert D., & Mercan E.** (2020). Effects of churning with different concentrations of ozonated water on particle size, texture, oxidation, melting and microbiological characteristics of butter. *International Dairy Journal*, 111, 104838.
- Sert D., Mercan E., & Kara Ü.** (2020). Butter production from ozone-treated cream: Effects on characteristics of physicochemical, microbiological, thermal and oxidative stability. *LWT - Food Science and Technology*, 131, 109722.
- Settanni L., & Moschetti G.** (2014). New trends in technology and identity of traditional dairy and fermented meat production processes: preservation of typicality and hygiene. *Trends in food science & technology*, 37(1), 51-58.
- Sharif Z. M., Mustapha F. A., Jai J., & Zaki N. A. M.** (2017). Review on methods for preservation and natural preservatives for extending the food longevity. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19.
- Shen C., Lyu L., Wang G., & Wu J.** (2019). A method for ultrasound probe calibration based on arbitrary wire phantom. *Cogent Engineering*, 6(1), 1592739.
- Shen J., Gou Q., Zhang Z., & Wang M.** (2016). Effects of high hydrostatic pressure on the quality and shelf-life of jujube (*Ziziphus jujuba Mill.*) pulp. *Innovative food science & emerging technologies*, 36, 166-172.
- Shoqairan Y. I., Ahmed I. A. M., Almaiman S. A., Al Juhaimi F. Y., Babiker E. E., Alsulami T. S., ... & Ali A. A.** (2023). Effect of microwave, ultraviolet and pulsed electric field treatments on ochratoxin A level and physicochemical quality attributes of paprika powder. *LWT*, 188, 115397.
- Sim S. Y., & Moraru C. I.** (2020). High-pressure processing of pea protein–starch mixed systems: Effect of starch on structure formation. *Journal of food process engineering*, 43(2), e13352.
- Sitzmann W., Vorobiev E., & Lebovka N.** (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative food science & emerging technologies*, 37, 302-311.
- Skowron M., & Wantuch A.** (2020). Nowe technologie utrwalania żywności–badania modelowe. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 127-130.
- Smith T. J., Li X. E., & Drake M. A.** (2014). Norbixin and bixin partitioning in Cheddar cheese and whey. *Journal of dairy science*, 97(6), 3321-3327.
- Soares N. F., Vicente A. A., & Martins C. M.** (2016). *Food safety in the seafood industry: A practical guide for ISO 22000 and FSSC 22000 Implementation*. John Wiley & Sons.
- Soczewka I., & Ginter A.** (2013). Handel międzynarodowy artykułami rolno-spożywczymi w Polsce w latach 2007-2011. *Journal of Agribusiness and Rural Development*, 28(2), 225-234.
- Sokolowski Ł. M.** (2018). Nowa żywność a współczesne wyzwania żywnościowe–wybrane aspekty prawne. *Przegląd Prawa Rolnego*, 1(22), 123-132.

- Soman R., & Raman M.** (2016). HACCP system–hazard analysis and assessment, based on ISO 22000: 2005 methodology. *Food control*, 69, 191-195.
- Song H. P., Kim B., Choe J. H., Jung S., Moon S. Y., Choe W., & Jo C.** (2009). Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology*, 26(4), 432-436.
- Song Q., Rune C. J. B., Thybo A. K., Clausen M. P., Orlén V., & Giacalone D.** (2023). Sensory quality and consumer perception of high pressure processed orange juice and apple juice. *LWT*, 173, 114303.
- Sotelo-Lara, D. M., Amador-Espejo G. G., Zamora-Gasga V. M., Gutiérrez-Martínez P., & Velázquez-Estrada R. M.** (2023). Effect of thermosonication on bioactive compounds, enzymatic and microbiological inactivation in nectar with strawberry by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 60(5), 1580-1589.
- Sreedevi P., Jayachandran L. E., & Srinivasa Rao P.** (2020). Application of high-pressure processing for extending the shelf life of sugarcane juice under refrigerated conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), e14957.
- Stampfli R.** (1958). Reversible electrical breakdown of the excitable membrane of a Ranvier node. *Academia Brasileira de Ciências*, 30(1), 57-61.
- Starek A., Kobus Z., Sagan A., Chudzik B., Pawłat J., Kwiatkowski M., ... & Andrejko D.** (2021). Influence of ultrasound on selected microorganisms, chemical and structural changes in fresh tomato juice. *Scientific reports*, 11(1), 3488.
- Starek A., Pawłat J.** (2020). Niskotemperaturowe utrwalanie żywności pochodzenia zwierzęcego. *Ogólnopolski Informator Masarski*. 9(301), 8-30.
- Starek A., Pawłat J.** (2022). Kontrolowanie wyzwań związanych z bezpieczeństwem mikrobiologicznym mięsa za pomocą zimnej plazmy, ogólnopolski informator masarski, *Ogólnopolski Informator Masarski*. 6(322), 4-24.
- Starek A., Pawłat J., Chudzik B., Kwiatkowski M., Terebun P., Sagan A., & Andrejko D.** (2019). Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. *Scientific Reports*, 9(1), 8407.
- Starek A., Sagan A., Andrejko D., Chudzik B., Kobus Z., Kwiatkowski M., ... & Pawłat J.** (2020). Possibility to extend the shelf life of NFC tomato juice using cold atmospheric pressure plasma. *Scientific Reports*, 10(1), 20959.
- Starek-Wójcicka A., Grządka E., Sagan A., Terebun P., Kwiatkowski M., Zarzeczny D., ... & Pawłat J.** (2023). Wpływ obróbki zimną plazmą atmosferyczną na jakość świeżego soku tłoczonego z marchwi. *Żywność, Nauka, Technologia, Jakość*, 30(3), 181-197.
- Starek-Wójcicka A., Różyło R., Niedźwiedz I., Kwiatkowski M., Terebun P., Polak-Berecka M., & Pawłat J.** (2022). Pilot study on the use of cold atmospheric plasma for preservation of bread. *Scientific reports*, 12(1), 22003.
- Starek-Wójcicka A., Sagan A., Terebun P., Kwiatkowski M., Osmólska E., Krajewska M., ... & Pawłat J.** (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. *Applied Sciences*, 13(1), 578.
- Stratakos A. C., Inguglia E. S., Linton M., Tollerton J., Murphy L., Corcionivoschi N., ... & Tiwari B. K.** (2019). Effect of high pressure processing on the safety, shelf life and quality of raw milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 325-333.
- Sun Y., Wang Q., Jin H., Li Z., & Sheng L.** (2021). Impact of ozone-induced oxidation on the textural, moisture, micro-rheology and structural properties of egg yolk gels. *Food Chemistry*, 361(1), 130075.
- Suprpto D., Radiati L. E., Mahdi C., & Evanuarini H.** (2021). Physicochemical Quality and Microbial Activity of Dairy Milk with Ozonation. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak (JI-TEK)*, 16(2), 117-124.

- Swami Hulle N. R., & Rao P. S.** (2016). Effect of high pressure pretreatments on structural and dehydration characteristics of aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) cubes. *Drying Technology*, 34(1), 105-118.
- Szajner P., & Szczepaniak I.** (2020). The evolution of the agri-food sector in terms of economic transformation, membership in the EU and globalization of the world economy. *Problems of Agricultural Economics/Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 61-85.
- Szczepaniak I., & Wigier M.** (2020). Polski biznes rolno-spożywczy wczoraj i dzisiaj-czynniki sukcesu. In *Instytucjonalne i strukturalne aspekty rozwoju rolnictwa i obszarów wiejskich*. Księga poświęcona pamięci dr hab. Adama Sadowskiego Profesora Uniwersytetu w Białymstoku, red. nauk. R. Przygodzka, E. Gruszewska (233-256). Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku.
- Szczepaniak I., Ambroziak L., & Drożdż J.** (2020). Wpływ pandemii COVID-19 na przetwórstwo spożywcze i eksport rolno-spożywczy Polski. *Ubezpieczenia w Rolnictwie-Materiały i Studia*, 1(73), 117-139.
- Szczepańska J., Pinto C. A., Skąpska S., Saraiva J. A., & Marszałek K.** (2021). Effect of static and multi-pulsed high pressure processing on the rheological properties, microbial and physico-chemical quality, and antioxidant potential of apple juice during refrigerated storage. *LWT*, 150, 112038.
- Szkiel A.** (2016). Orientacja na klienta w wymaganiach normy ISO 9001: 2015. *Marketing i Zarządzanie*, 44(3), 83-93.
- Szosland-Faltyn A., Krolasik J., & Polak E.** (2013). Ozonowanie, czy promieniowanie ultrafioletowe? Niekonwencjonalne techniki utrwalania żywności zapewniające bezpieczeństwo mikrobiologiczne. *Chłodnictwo: organ Naczelnej Organizacji Technicznej*, 48(5), 38-42.
- Świdorski F., Dybkowska E., Wrońska A., & Kluszczyńska D.** (2012). Minimalne przetwarzanie żywności-korzyści i zagrożenia. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, (2), 108-115.
- Tabla R., & Roa I.** (2022). Use of gaseous ozone in soft cheese ripening: Effect on the rind microorganisms and the sensorial quality. *LWT*, 170, 114066.
- Takahashi N., Kumagai T., Shimizu M., Suzuki T., & Ohtsuki T.** (2007). Removal of dissolved organic carbon and color from dyeing wastewater by pre-ozonation and subsequent biological treatment using test-scale plant. *Ozone: Science and Engineering*, 29(2), 139-145.
- Tanaka T., & Morino Y.** (1970). Coriolis interaction and anharmonic potential function of ozone from the microwave spectra in the excited vibrational states. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 33(3), 538-551.
- Tappi S., Gozzi G., Vannini L., Berardinelli A., Romani S., Ragni L., & Rocculi P.** (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 225-233.
- Tappi S., Nissen L., Casciano F., Antonelli G., Chiarello E., Picone G., ... & Rocculi P.** (2023). Effect of cold plasma generated with different gas mixtures on safety, quality and nutritional aspects of fresh sea bream fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103477.
- Tarabová B., Tampieri F., Maran E., Marotta E., Ostrihoňová A., Krewing M., & Machala Z.** (2021). Chemical and antimicrobial effects of air non-thermal plasma processing of fresh apple juice with focus on safety aspects. *Foods*, 10(9), 2055.
- Tonello-Samson C., Queirós R. P., & González-Angulo M.** (2020). Advances in high-pressure processing in-pack and in-bulk commercial equipment. In *Present and future of high pressure processing* (pp. 297-316). Elsevier.
- Tongdonyod S., Thikham S., Kittiwachana S., Wichaphon J., & Klangpetch W.** (2023). Optimization of pulsed electric fields combined with mild heat treatment on microbial inactivation of tender coconut water and evaluation of quality attributes during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 90, 103507.



- Toyokawa Y., Yagyu Y., Misawa T., & Sakudo A.** (2017). A new roller conveyer system of non-thermal gas plasma as a potential control measure of plant pathogenic bacteria in primary food production. *Food Control*, 72, 62-72.
- Trambarulo R., Ghosh S. N., Burrus Jr C. A., & Gordy W.** (1953). The molecular structure, dipole moment, and g factor of ozone from its microwave spectrum. *The Journal of Chemical Physics*, 21(5), 851-855.
- Tseng C., & Li C.** (2008). Inactivation of surface viruses by gaseous ozone. *Journal of environmental health*, 70(10), 56-63.
- Tsevdou M., Ouli-Rousi M., Soukoulis C., & Taoukis P.** (2020). Impact of high-pressure process on probiotics: Viability kinetics and evaluation of the quality characteristics of probiotic yoghurt. *Foods*, 9(3), 360.
- Tzortzakis N., Borland A., Singleton I., & Barnes J.** (2007). Impact of atmospheric ozone-enrichment on quality-related attributes of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 45(3), 317-325.
- Usag J., Acosta, Ó., Churey J. J., Padilla-Zakou, O. I., & Worobo, R. W.** (2021). Evaluation of high pressure processing (HPP) inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in acid and acidified juices and beverages. *International Journal of Food Microbiology*, 339, 109034.
- Vega-Mercado H., Gongora-Nieto M. M., Barbosa-Canovas G. V., & Swanson B. G.** (2007). Pulsed electric fields in food preservation. In *Handbook of food preservation*. CRC Press. 801-832.
- Verma V. C.** (2018). Applications and investigations of ozone in cereal grain storage and processing: Benefits and potential drawbacks. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 5034-5041.
- Vernes L., Abert-Vian M., El Maâtaoui M., Tao Y., Bornard I., & Chemat F.** (2019). Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina. Mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects. *Ultrasonics sonochemistry*, 54, 48-60.
- Waghmare R., Kumar M., Yadav R., Mhatre P., Sonawane S., Sharm S., ... & Lorenzo, J. M.** (2023). Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovative approach for the retention of nutraceutical quality in foods. *Food Chemistry*, 404, 134571.
- Wan Z., Misra N. N., Li G., & Keener K. M.** (2021). High voltage atmospheric cold plasma treatment of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* K-12 on Queso Fresco (fresh cheese). *LWT*, 146, 111406.
- Wang C. Y., Huang H. W., Hsu C. P., Shyu Y. T., & Yang B. B.** (2013). Inactivation and morphological damage of *Vibrio parahaemolyticus* treated with high hydrostatic pressure. *Food Control*, 32(2), 348-353.
- Wason S., Verma T., & Subbiah J.** (2021). Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4950-4992.
- Weaver J. C.** (2000). Electroporation of cells and tissues. *IEEE transactions on plasma science*, 28(1), 24-33.
- Wiktoria A., & Witrowa-Rajchert D.** (2012). Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do wspomaganie procesów usuwania wody z tkanek roślinnych. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 2(81), 22-32.
- Wisniewska J.** (2010). Globalizacja polskiego sektora rolno-spożywczego po wejściu do Unii Europejskiej. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 12(1), 263-269.
- Wu D., Tu M., Wang Z., Wu C., Yu, C., Battino M., ... & Du M.** (2020). Biological and conventional food processing modifications on food proteins: Structure, functionality, and bioactivity. *Biotechnology advances*, 40, 107491.

- Wu T., Y X., Hu, A., Zhang L., Jin Y., & Abid M.** (2015). Ultrasonic disruption of yeast cells: Underlying mechanism and effects of processing parameters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 28, 59-65.
- Wu W., Xiao G., Yu Y., Xu Y., Wu J., Peng J., & Li L.** (2021). Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. *Food Control*, 130, 108293.
- Xu X., Xiao S., Wang L., Niu D., Gao W., Zeng X. A., ... & Wang R.** (2024). Pulsed electric field enhances glucose glycation and emulsifying properties of bovine serum albumin: Focus on polarization and ionization effects at a high reaction temperature. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 128509.
- Yamamoto K.** (2021). High hydrostatic pressure in food industry applications. In *Nontraditional Activation Methods in Green and Sustainable Applications* (pp. 559-574). Elsevier.
- Yang X., Zhang C., Li Q., & Cheng J. H.** (2023). Physicochemical properties of plasma-activated water and its control effects on the quality of strawberries. *Molecules*, 28(6), 2677.
- Yao H., Jin Y., Zhang X., Yang N., & Xu X.** (2023). Influence of pulsed electric field on thawing of frozen pork: Physical properties, fat oxidation and protein structure. *Food Bioscience*, 56, 103175.
- Yüceer M., Aday M. S., & Caner C.** (2016). Ozone treatment of shell eggs to preserve functional quality and enhance shelf life during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(8), 2755–2763.
- Yusuf I. M., Taher, Z. M., Rahmat Z., & Chua L. S.** (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food research international*, 157, 111268.
- Zelmat A., Hadi H., Amiali M., Gashovska T., & Tilmatine A.** (2017). Determination and analysis of the electrical components of a PEF treated equivalent circuit of potato tissue. *International journal of environmental studies*, 74(2), 262-274.
- Zhang W., Xiao S., & Ahn D. U.** (2013). Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(11), 1191–1201.
- Zhang Y., Zhang J., Zhang Y., Hu H., Luo S., Zhang L., ... & Li P.** (2021). Effects of in-package atmospheric cold plasma treatment on the qualitative, metabolic and microbial stability of fresh-cut pears. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(11), 4473-4480.
- Zhang Z. H., Wang L. H., Zeng X. A., Ha Z., & Brennan, C. S.** (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(1), 1-13.
- Zhou D., Li T., Cong K., Suo A., & Wu C.** (2022). Influence of cold plasma on quality attributes and aroma compounds in fresh-cut cantaloupe during low temperature storage. *LWT*, 154, 112893.
- Zhou R., Rezaeimotlagh A., Zhou R., Zhang T., Wang P., Hong J., ... & Cullen P. J.** (2022). In-package plasma: From reactive chemistry to innovative food preservation technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 59-74.
- Zhu F.** (2018). Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry*, 264, 358-366.
- Zimmerman U.** (1968). Electric breakdown, electroporation and electrofusion. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, 105, 196-256.
- Zimmermann U., Pilwat G., & Riemann F.** (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophysical journal*, 14(11), 881-899.
- Ziuzina D., Misra N. N., Cullen P. J., Keener K. M., Mosnier J. P., Vilaró I., ... & Bourke P.** (2016). Demonstrating the potential of industrial scale in-package atmospheric cold plasma for decontamination of cherry tomatoes. *Plasma Medicine*, 6(3-4).
- Ziyaina M., & Rasco B.** (2021). Inactivation of microbes by ozone in the food industry: A review. *African Journal of Food Science*, 15(3), 113–120.

- Zou Y., Kang D., Liu R., Qi J., Zhou G., & Zhang W.** (2018). Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef. *Ultrasonics Sonochemistry*, 46, 36-45.
- Zuba-Ciszewska M.** (2020). Rola przemysłu spożywczego w gospodarce Polski. *Nierówności społeczne a wzrost gospodarczy*, 64, 69-86.
- Żakowska-Biemans S.** (2009). Bezpieczeństwo żywności w opinii polskich konsumentów. *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, 3(42), 1000-1005.
- Żywica R., Smoczyński S. S., Banach J. K., & Modzelewska-Kapituła M.** (2017). Techniques and technologies ensuring food safety. *Towaroznawcze Problemy Jakości*, (4), 33-41.

## **SPIS STRON INTERNETOWYCH**

<https://www.pekao.com.pl/analizy-makroekonomiczne/analizy-sektorowe/opracowania-na-temat-poszczeg%C3%B3lnych-bran%C5%BC/sektor-rolno-spozywczy0.html>  
<https://holstein.pl/rekordowy-eksport-zywnosci-z-polski-w-2021-r/>  
<https://www.kierunekpompy.pl/arttykul,57520,suchobieg-kawitacja-i-pierscien-cieczowy.html>  
<http://rada-zywnosc.pfpz.pl/charakterystyka-branzy-spozywczej-17134>  
[https://www.paih.gov.pl/dlaczego\\_polska/sektory/spozywczy/](https://www.paih.gov.pl/dlaczego_polska/sektory/spozywczy/)  
<https://www.spozywczetechnologie.pl/miesne-technologie/wiadomosci-branzowe/669/przemysl-rolno-spozywczy-polsce-analiza-ryнку>  
<https://www.gov.pl/web/wsse-gdansk/akty-prawne>  
<https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/high-pressure-processing/en/hpp-process>  
<https://www.stavyrefit.cz/>  
<https://cymes.pl/>  
<https://www.ecdc.europa.eu/en>  
<https://www.hiperbaric.com/en/high-pressure-processing-hpp-suitable-and-not-suitable-products/>

## NIEKONWENCJONALNE METODY UTRWALANIA PRODUKTÓW ROLNO-SPOŻYWCZYCH

**Streszczenie.** Obecnie konsumenci zwracają coraz większą uwagę na świeżą, minimalnie przetworzoną żywność o wysokiej zawartości substancji biologicznie aktywnych. Konwencjonalnie stosowana pasteryzacja może powodować zmiany jakości wyrobów, wpływając na ich negatywny odbiór przez konsumentów. Optymalny sposób utrwalania musi więc zapewniać bezpieczeństwo mikrobiologiczne, a także walory odżywcze. Nie bez znaczenia jest również stan środowiska naturalnego, jaki pozostawimy przyszłym pokoleniom. Dodatkowo, należy prowadzić działania pozwalające ograniczyć problem marnowania jedzenia. Aby zrealizować te cele można, stosować niekonwencjonalne zabiegi przetwarzania, wydłużające czas przydatności do spożycia wielu artykułów żywnościowych. Ze względu na różnorodność biologiczną poszczególnych z nich, odmienne właściwości urządzeń oraz możliwość zastosowania obróbki na różnych etapach produkcji, w niniejszej pracy opisano mechanizmy i potencjalne perspektywy wykorzystania pulsacyjnego pola elektrycznego, ozonowania, wysokich ciśnień hydrostatycznych, sonikacji, a także plazmy nietermicznej.

## UNCONVENTIONAL METHODS OF PRESERVATION AGRI-FOOD PRODUCTS

**Summary.** Nowadays, consumers pay more and more attention to fresh, minimally processed food with a high content of biologically active substances. Conventionally used pasteurization may cause changes in the quality of products, affecting their negative reception by consumers. The optimal method of preservation must therefore ensure microbiological safety as well as nutritional value. The condition of the natural environment that we leave to future generations is also important. Additionally, actions should be taken to reduce the problem of food waste. To achieve these goals, unconventional processing procedures can be used to extend the shelf life of many food products. Due to the biological diversity of each of them, different properties of devices and the possibility of using processing at various stages of production, this work describes the mechanisms and potential prospects for the use of pulsed electric field, ozonation, high hydrostatic pressures, sonication, and nonthermal plasma.

## SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 1. Najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego  
Rys. 2. Struktura towarowa polskiego eksportu rolno-spożywczego w 2021 roku  
Rys. 3. Procentowy wskaźnik wolumenu w obrotach handlu zagranicznego w Polsce w latach 2019-2020  
Rys. 4. Ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego  
Rys. 5. Kluczowe obszary normy ISO 22000  
Rys. 6. Zasady systemu HACCP  
Rys. 7. Tradycyjne metody konserwacji żywności  
Rys. 8. Zobrazowanie wpływu pola elektrycznego na komórki  
Rys. 9. Najczęściej stosowane kształty impulsów podczas obróbki PEF w mleku i przetworach mlecznych  
Rys. 10. Schemat obwodu układu generującego PEF (A), wykres przebiegu napięcia i prądu podczas eksperymentu z systemem PEF (B).  
Rys. 11. Schemat układu przepływowego i stacjonarnego wykorzystującego PE  
Rys. 12. Podstawowy model cząsteczki ozonu  
Rys. 13. Rozpuszczalność ozonu w zależności od temperatury  
Rys. 14. Podstawowe typy ozonatorów z wyładowaniami barierowymi  
Rys. 15. Wysokowydajny generator ozonu  
Rys. 16. Schemat procesu obróbki metodą HPP  
Rys. 17. Rodzaje dźwięków wyróżnione ze względu na ich częstotliwość  
Rys. 18. Przebieg procesu kawitacji  
Rys. 19. Schemat myjki ultradźwiękowej  
Rys. 20. Schemat sondy ultradźwiękowej  
Rys. 21. Przykłady reaktorów plazmowych (A-reaktor płaski, B-dysza plazmowa, C- reaktor typu glide-arc)  
Rys. 22. Schematyczny przegląd powszechnie stosowanych systemów zimnej plazmy atmosferycznej rozważanych do zastosowania w przemyśle spożywczym.  
Rys. 23. Prototypowe urządzenie SAFE BAG

## **SPIS TABEL**

Tabela 1. Wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontakt

Tabela 2. Porównanie niektórych właściwości fizycznych ozonu i tlenu

Tabela 3. Barwa ozonu w zależności od fazy

Tabela 4. Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności

## ZAŁĄCZNIK 1

Tabela 1. Wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu (opracowanie własne na podstawie [www.gov.pl](http://www.gov.pl))

ROZPORZĄDZENIA/USTAWY/DECYZJE		
	Akty prawne Unii Europejskiej	Krajowe ustawy i rozporządzenia
Żywność – urzędowa kontrola	Rozporządzenie (WE) nr 178/2002 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 28 stycznia 2002 r. ustanawiające ogólne zasady prawa żywnościowego, powołujące Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności oraz ustanawiające procedury w zakresie bezpieczeństwa żywności (Dz. Urz. L 31 z 1.2.2002, str. 1—24; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 15 Tom 06 P. 463 – 486 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 lipca 2016 r. w sprawie grup środków spożywczych przeznaczonych do sprzedaży dzieciom i młodzieży w jednostkach systemu oświaty oraz wymagań, jakie muszą spełniać środki spożywcze stosowane w ramach żywienia zbiorowego dzieci i młodzieży w tych jednostkach (Dz. U z 2016 r., poz. 1154).
	Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie higieny środków spożywczych (Dz. Urz. L 139/1 z 30.4.2004; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 34 P. 319-337 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 6 czerwca 2007 r. w sprawie dostaw bezpośrednich środków spożywczych (Dz. U. Nr 112, poz. 774).
	Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 828/2014 z dnia 30 lipca 2014 r. w sprawie przekazywania konsumentom informacji na temat nieobecności lub zmniejszonej zawartości glutenu w żywności (Dz. Urz. UE L 228/5 z 31.7.2014).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 kwietnia 2007 r. w sprawie pobierania i przechowywania próbek żywności przez zakłady żywienia zbiorowego typu zamkniętego (Dz. U. Nr 80, poz. 545).
	Rozporządzenie Komisji (UE) nr 210/2013 z dnia 11 marca 2013 r. w sprawie zatwierdzania zakładów produkujących kiełki zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz. Urz. UE L 68/24 z 12.3.2013).	Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 października 2002 r. w sprawie nadania funkcjonariuszom organów Państwowej Inspekcji Sanitarnej uprawnień do nakładania grzywnien w drodze mandatu karnego (t. j. Dz. U. z 2020 r. poz. 1364).
	Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 208/2013 z dnia 11 marca 2013 r. w sprawie wymogów dotyczących możliwości śledzenia kiełków i nasion przeznaczonych do produkcji kiełków (Dz. Urz. UE L 68/16 z 12.3.2013)	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 maja 2007 r. w sprawie wzorów dokumentów dotyczących rejestracji i zatwierdzania zakładów produkujących lub wprowadzających do obrotu żywność podlegających urzędowej kontroli Państwowej Inspekcji Sanitarnej (Dz. U. Nr 106, poz. 730 ze zm.).



	Decyzja Wykonawcza Komisji nr 2013/63/UE z dnia 24 stycznia 2013 r. przyjmująca wytyczne dotyczące wdrażania szczegółowych warunków dotyczących oświadczeń zdrowotnych określonych w art. 10 rozporządzenia (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz. Urz. L 22/25 z 25.1.2013).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 5 października 2017 r. w sprawie opłat za czynności wykonywane przez organy Państwowej Inspekcji Sanitarnej w ramach urzędowych kontroli żywności (Dz. U. z 2017, poz. 2012 ze zm.).
Żywność – znakowanie	Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1169/2011 z dnia 25 października 2011r. w sprawie przekazywania konsumentom informacji na temat żywności, zmiany rozporządzeń Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1924/2006 i (WE) nr 1925/2006 oraz uchylenia dyrektywy Komisji 87/250/EWG, dyrektywy Rady 90/496/EWG, dyrektywy Komisji 1999/10/WE, dyrektywy 2000/13/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, Dyrektyw Komisji 2002/67/WE i 2008/5/WE oraz rozporządzenia Komisji (WE) nr 608/2004 (Dz. Urz. UE L 304/18 z 22.11.2011 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 lutego 2009 r. w sprawie ogólnych odstępstw od wymagań higienicznych w zakładach produkujących żywność tradycyjną niezwierzęcego pochodzenia (Dz. U. z 2009 nr 37 poz. 294)
Żywność – oświadczenia żywieniowe i zdrowotne	Rozporządzenie (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 2006 roku w sprawie oświadczeń żywieniowych i zdrowotnych dotyczących żywności (Dz. Urz. L 404/9 z 30.12.2006; Sprostowanie Dz. Urz. UE L 12 z 18.1.2007, str. 3-18 ze zm.).	
	Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 432/2012 z dnia 16 maja 2012 r. ustanawiające wykaz dopuszczonych oświadczeń zdrowotnych dotyczących żywności, innych niż oświadczenia odnoszące się do zmniejszenia ryzyka choroby oraz rozwoju i zdrowia dzieci (Dz. Urz. UE L 136/1 z 25.5.2012 ze zm.).	
Substancje dodatkowe, aromaty, enzymy i rozpuszczalniki	Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1333/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie dodatków do żywności (Dz. Urz. L 354/16 z 31.12.2008 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 4 września 2008 r. w sprawie rozpuszczalników ekstrakcyjnych, które mogą być stosowane w produkcji żywności (t. j. Dz. U. z 2020, poz. 1011).
	Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1332/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie enzymów spożywczych, zmieniające dyrektywę Rady 83/417/EWG, rozporządzenie Rady (WE) nr 1493/1999, dyrektywę 2000/13/WE, dyrektywę Rady 2001/112/WE oraz rozporządzenie (WE) 258/97 (Dz. Urz. L 354/7 z 31.12.2008 ze zm.).	
	Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) nr 872/2012 z dnia 1 października 2012 r. w sprawie przyjęcia wykazu substancji aromatycznych prze-	

	<p>widzianego rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 2232/96, włączenia go do załącznika I do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1334/2008 oraz uchylecia rozporządzenia Komisji (WE) nr 1565/2000 i decyzji Komisji 1999/217/WE (Dz. Urz. L 267 z 2.10.2012, str. 1 – 161 ze zm.).</p>	
	<p>Rozporządzenie (WE) nr 2065/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 10 listopada 2003 r. w sprawie środków aromatyzujących dymu wędzarniczego używanych lub przeznaczonych do użycia w środkach spożywczych lub na ich powierzchni (Dz. Urz. L 309 z 26.11.2003, str. 1 – 8; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 32 P. 661-669 ze zm.).</p>	
	<p>Rozporządzenie Komisji (UE) nr 231/2012 z dnia 9 marca 2012 r. ustanawiające specyfikacje dla dodatków do żywności wymienionych w załącznikach II i III do rozporządzenia (WE) nr 1333/2008 Parlamentu Europejskiego i Rady. (Dz. Urz. L 83/1 z 22.3.2012)</p>	
Genetycznie zmodyfikowana żywność – GMO	<p>Rozporządzenie Komisji (WE) nr 641/2004 z dnia 6 kwietnia 2004r. w sprawie szczegółowych zasad wykonywania rozporządzenia (WE) nr 1829/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady odnoszącego się do wniosków o zatwierdzenie nowego typu żywności i paszy genetycznie zmodyfikowanej, powiadamiania o istniejących produktach oraz przypadkowym lub technicznie nieuniknionym występowaniu materiału genetycznie zmodyfikowanego, który pomyślnie przeszedł ocenę ryzyka (Dz. Urz. L 102 z 7.4.2004, str. 14 – 25; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 34 P. 36 – 47)</p>	
	<p>Rozporządzenie (WE) nr 1829/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 września 2003 roku w sprawie genetycznie zmodyfikowanej żywności i paszy (Dz. Urz. L 268/1 z 18.10.2003 ze zm.).</p>	
Nowa żywność	<p>Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/2283 z dnia 25 listopada 2015 r. w sprawie nowej żywności, zmieniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1169/2011 oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 258/97 Parlamentu Europejskiego i Rady oraz rozporządzenie Komisji (WE) nr 1852/2001 (Dz. Urz. UE L 327/1 z 11.12.2015).</p>	
	<p>Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2017/2470 z dnia 20.12.2017 r. ustanawiające unijny wykaz nowej żywności zgodnie z rozporządzeniem PEiR (UE) 2015/2283 w sprawie nowej żywności (Dz. Urz. UE L 351/72 z 20.12.2017 ze zm.).</p>	

**WIR**  
WYDAWNICTWO