

NATALIA POLAK, STANISŁAW KALISZ, BARTOSZ KRUSZEWSKI

PRZEPLYWOWA PASTERYZACJA MIKROFALOWA PRODUKTÓW OWOCOWYCH I WARZYWNYCH

Streszczenie

Wprowadzenie. Ogrzewanie mikrofalowe jest jedną z metod stosowanych podczas szeroko rozumianego przetwarzania żywności, budzącą szerokie zainteresowanie w Europie i Ameryce Północnej. W niniejszej pracy przedstawiono mechanizm oddziaływania promieniowania mikrofalowego oraz sposób jego zastosowania w przemyśle spożywczym. Przybliżono wykorzystanie i wpływ przepływowej pasteryzacji mikrofalowej na jakość produktów owocowo-warzywnych w aspekcie ważniejszych wyróżników jakościowych, tj. trwałości mikrobiologicznej, aktywności enzymatycznej, podstawowych wyróżników fizykochemicznych, barwy, zawartości ważniejszych grup substancji bioaktywnych oraz aktywności przeciwutleniającej.

Wyniki i wnioski. Przepływowa pasteryzacja mikrofalowa wykorzystywana jest do utrwalania płynnych i półpłynnych produktów takich jak purée, soki, napoje oraz zupy. Odpowiednia kombinacja parametrów determinuje skuteczną inaktywację mikroorganizmów oraz enzymów. Metoda ta nie wpływa istotnie na zmianę pH, kwasowości miareczkowej czy ekstraktu. W literaturze wskazano na zróżnicowany wpływ pasteryzacji mikrofalowej na stopień zmiany barwy, uzależniony od zastosowanych parametrów oraz matrycy żywnościowej. W większości przypadków pozwala na lepszą retencję składników bioaktywnych w porównaniu z tradycyjną pasteryzacją ze względu na krótszy czas oddziaływania wysokiej temperatury. Badania wskazują na możliwość wzrostu ogólnej zawartości związków polifenolowych w przypadku utrwalania mikrofalowego produktów zawierających tkankę surowca. Przepływowa pasteryzacja mikrofalowa jest niekonwencjonalną techniką utrwalania w branży owocowo-warzywnej, prężnie rozwijającą się w ostatnich latach. Ze względu na korzyści ekonomiczne procesu oraz potencjalnie wyższą jakość otrzymywanych produktów w porównaniu z konwencjonalnymi technikami utrwalania, metoda ta zyskuje na popularności.

Słowa kluczowe: przepływowa pasteryzacja mikrofalowa, niekonwencjonalne techniki utrwalania, substancje bioaktywne, aktywność enzymatyczna, aktywność przeciwutleniająca

Mgr inż. N. Polak ORCID: 0000-0003-1861-1507; dr hab. inż. prof. SGGW S. Kalisz ORCID: 0000-0001-7592-2470; dr inż. B. Kruszewski ORCID: 0000-0001-8762-7460; Katedra Technologii i Oceny Żywności, Zakład Technologii Owoców, Warzyw i Zbóż, Instytut Nauk o Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa. Kontakt: email: natalia_polak@sggw.edu.pl

Wprowadzenie

Owoce i warzywa są cennym źródłem składników odżywczych, jak i licznych substancji bioaktywnych. Sezonowość ich występowania oraz zbioru, ograniczone możliwości przechowywania, a także wymagania konsumenckie determinują konieczność ich przetwarzania i zapewniania długiego okresu przydatności do spożycia. W branży owocowo-warzywnej oprócz metod chłodniczych najczęstszymi technikami utrwalania wyrobów gotowych są: pasteryzacja i sterylizacja, które charakteryzują się stosunkowo długim czasem oddziaływania wysokich temperatur na produkt. Pomimo zapewnienia odpowiedniej trwałości mikrobiologicznej, często determinują negatywne zmiany wyróżników jakościowych, obniżając ich wartość żywieniową oraz wpływając na ocenę sensoryczną. W związku z tym poszukiwane są nowe metody, które mogłyby zapewnić nie tylko bezpieczeństwo, ale również lepszą jakość fizykochemiczną i organoleptyczną. Obiecujące wyniki w tym zakresie daje wykorzystanie ogrzewania mikrofalowego w różnych procesach przetwarzania i utrwalania żywności. Jedną z mniej zbadanych technik, aczkolwiek pretendujących do szybkiego rozwoju w branży owocowo-warzywnej, jest przepływowa pasteryzacja mikrofalowa, co wynika z intensywnego rozwoju oferty produktów płynnych i półpłynnych.

Celem niniejszej publikacji było przedstawienie mechanizmu oddziaływania promieniowania mikrofalowego, sposobu wykorzystania w przepływowej pasteryzacji, jak również wykazanie korzyści i wad tego procesu. Przybliżono udokumentowane zastosowanie i wpływ tej metody na jakość produktów owocowo-warzywnych w aspekcie wyróżników jakościowych, tj. trwałości mikrobiologicznej, aktywności enzymatycznej, podstawowych wyróżników fizykochemicznych, parametrów barwy, zawartości substancji bioaktywnych, aktywności przeciwutleniającej oraz cech sensorycznych.

Mechanizm oddziaływania promieniowania mikrofalowego

Promieniowanie mikrofalowe obejmuje fale elektromagnetyczne o częstotliwości od 0,3 do 300 GHz i długości od 0,001 do 1 m. W domowych kuchenkach mikrofalowych stosowane są fale o częstotliwości 2450 MHz, zaś w urządzeniach przemysłowych – 915 MHz i 896 MHz [9]. Oddziaływanie na żywność wiąże się z dwoma głównymi mechanizmami. Pierwszy, polaryzacja dipolowa, związany jest z szybką zmianą orientacji cząsteczek o dużym momencie dipolowym, czyli głównie wody. Podczas tego procesu następuje sinusoidalna zmiana natężenia pola elektrycznego. Wiąże się to z tym, że cząsteczki poruszają się ruchem uporządkowanym, zgodnym z kierunkiem i zwrotem linii pola, gdy się w nim znajdują, lub chaotycznym, gdy natężenie pola wynosi zero, prowadząc do zderzeń z innymi cząsteczkami i przekazywania energii. Drugim mechanizmem jest przewodnictwo elektryczne. Jony w następstwie ruchu

w polu elektrycznym, w kierunku zależnym od ładunku, zyskują energię, którą dalej przekazują poprzez zderzenia innym cząsteczkom. Podobnie jak w przypadku polaryzacji dipolowej, zmiana kierunku ruchu jonów następuje dwukrotnie w trakcie cyklu. W związku z faktem, że w przypadku produktów żywnościowych woda stanowi główny składnik, polaryzacja dipolowa jest mechanizmem dominującym podczas ogrzewania [13].

Zastosowanie pasteryzacji przepływowej w przemyśle spożywczym

Pierwsze wykorzystanie mikrofal na szerszą skalę do procesu pasteryzacji odbyło się w 1974 roku do pakowanego chleba krojonego [16]. W przypadku pasteryzacji przepływowej pierwsze badania przeprowadzono w 1975 roku na mleku [12]. W technologii żywności mikrofałe stosowane są do realizacji rozmaitych procesów. W przypadku przetwarzania żywności wykorzystywane są w procesach rozmrażania, blanszowania, pasteryzacji, sterylizacji czy suszenia. Mikrofałe są stosowane także w procesach zarządzania odpadami [9]. Procesy pasteryzacji i sterylizacji mikrofalowej żywności mogą być przeprowadzane w różnego typu urządzeniach, takich jak suszarki bębnowe, suszarki taśmowe, komory ciśnieniowe, domowe kuchenki mikrofalowe czy pasteryzatory przepływowe [12, 16]. W związku z faktem, że dużą część asortymentu branży owocowo-warzywnej stanowią produkty o konsystencji płynnej lub półpłynnej, a asortyment tych produktów intensywnie się rozwija, na znaczeniu zyskuje pasteryzacja w przepływie.

Prototyp pasteryzatora przepływowego, będącego na stanie Wydziału Technologii Żywności Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, przedstawiono na rycinie 1, a jego uproszczony schemat na rycinie 2. Składa się z kilku głównych części: układu rurowego, zbiornika wejściowego, pompy, procesora mikrofalowego, generatora mikrofal, chłodnicy, zbiornika wyjściowego, przepływomierza oraz czujników temperatur. Ponadto pasteryzator zawiera elektroniczny system sterowania pozwalający na monitorowanie parametrów procesu, takich jak prędkość przepływu, moc mikrofal, utrzymanie zadanej temperatury pasteryzacji. Zależnie od potrzeb możliwe jest zarówno jednokrotne przejście produktu przez układ bądź wielokrotne.

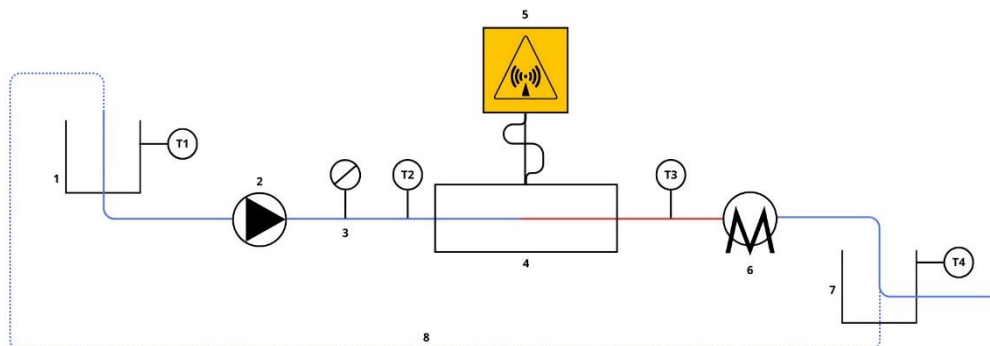
W literaturze przedmiotu wciąż jest mało doniesień odnoszących się konkretnie do pasteryzacji mikrofalowej w przepływie produktów owocowo-warzywnych. Znaczna część publikacji wskazuje na wykorzystanie pieców mikrofalowych i domowych kuchenek mikrofalowych, a utrwalane produkty znajdują się na tackach czy w opakowaniach takich jak butelki czy słoiki. Wynika to w głównej mierze z faktu małej ilości urządzeń umożliwiających utrwalanie mikrofalami w przepływie na mniejszą skalę, co dałoby możliwość intensywniejszego rozwoju prac rozwojowo-badawczych. Z uwagi na dużą potrzebę wprowadzenia jej na szeroką skalę w przemyśle, metoda ta powinna być pręźnie rozwijana i badana z użyciem kolejnych matryc żywnościowych. W litera-

turze można znaleźć doniesienia o badaniach mikrofalowej pasteryzacji przepływowej w kontekście obróbki cydru jabłkowego [7], purée truskawkowego [10, 11], purée ze słodkich ziemniaków [4, 5, 25], purée z mango [14], soku pomidorowego [26], zupy wielowarzywnej [21], soku pomarańczowego [2, 3], soku jabłkowego [15, 22, 24], napoju z orzechów ziemnych [20], soku z kawa kawa [1], soku marchwiowego [19], soku z trzciny cukrowej [6], pulpy pomidorowej [27], soku z jagody kamczackiej [17]. Prowadzone są również badania na produktach modelowych [23].



Rycina 1. Przepływowy pasteryzator mikrofalowy do produktów płynnych W0314 (Weindich SP.J.) znajdujący się na Wydziale Technologii Żywności Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, funkcjonujący w ramach Centrum Badawczo-Rozwojowego Żywności i Żywienia (CŻiŻ). Źródło: fotografia własna autorki.

Figure 1. W0314 continuous flow microwave pasteurizer (Weindich SP.J.) for liquid products located at the Department of Food Technology at the Warsaw University of Life Sciences, operating as part of the Research and Development Center for Food and Nutrition (CŻiŻ). Source: the author's own photography.



Rycina 2. Schemat pasteryzatora mikrofalowego W0314 (Weindich SP.J.). Oznaczenia: 1 – zbiornik wejściowy, 2 – pompa, 3 – przepływomierz, 4 – procesor mikrofalowy, 5 – generator mikrofal, 6 – chłodnica, 7 – zbiornik wyjściowy, 8 – recyrkulacja (jeśli potrzeba), T1 – czujnik temperatury zbiornika wejściowego, T2 – czujnik temperatury produktu na wejściu, T3 – czujnik temperatury produktu na wyjściu, T4 – czujnik temperatury zbiornika wyjściowego. Źródło: opracowanie własne.

Figure 2. Diagram of the W0314 continuous flow microwave pasteurizer for liquid products (Weindich SP.J.). Designations: 1 – input tank, 2 – pump, 3 – flow meter, 4 – microwave processor, 5 – microwave generator, 6 – cooler, 7 – output tank, 8 – recirculation (if needed), T1 – input tank temperature sensor, T2 – input product temperature sensor, T3 – output product temperature sensor, T4 – output tank temperature sensor. Source: the author's own work.

Wady i zalety przepływowej obróbki mikrofalowej

Badania wskazują, że zastosowanie ogrzewania mikrofalowego może znacząco skrócić czas trwania procesu oraz zmniejszyć koszty procesu w porównaniu z tradycyjną pasteryzacją czy sterylizacją [12]. Produkty utrwalane mikrofalowo zazwyczaj charakteryzują się lepszymi cechami organoleptycznymi czy właściwościami fizykochemicznymi, jak np. zawartość witamin [12, 18, 26]. Technika ta nie powoduje emisji spalin i toksycznych odpadów do środowiska [8]. Ponadto przepływowa pasteryzacja mikrofalowa może być skuteczna w inaktywacji drobnoustrojów oraz enzymów [1]. Podkreśla się, że mikrofałe są jedną z metod stosowanych podczas szeroko rozumianego przetwarzania żywności, budzącą szerokie zainteresowanie w Europie i Ameryce Północnej [3]. Ponadto obecnie może być rozważane wykorzystanie rozwijającej się sztucznej inteligencji do modelowania, analizy, wykrywania i kontroli najważniejszych punktów procesu w obróbce mikrofalowej [28].

Z drugiej strony, podczas procesu mikrofalowej pasteryzacji przepływowej temperatura może być nierównomiernie rozłożona, stwarzając potencjalne zagrożenia w kwestii bezpieczeństwa i jakości [12, 26]. Rozkład dostarczonej energii związany jest z częstotliwością zastosowanych mikrofal. Wyższe częstotliwości pozwalają na szybsze ogrzewanie, ale na mniejszych głębokościach. Zastosowanie fal o wyższej

częstotliwości pozwala na uniknięcie przegrzewania czy niedogrzewania produktu poprzez lepsze rozłożenie energii. W celu dostatecznej eliminacji mikroorganizmów konieczne jest ciągłe monitorowanie temperatury w ogrzewanym produkcie, co najczęściej sprowadza się do zastosowania temperatur wyższych niż optymalne. W przepływowych pasteryzatorach mikrofalowych utrudnione może być utrwalanie produktów o większej lepkości, a tym samym o większym oporze przepływu [12]. Badacze wskazują, że do 2024 roku w Stanach Zjednoczonych nadal nie wprowadzono komercyjnego przepływowego mikrofalowego utrwalania żywności wielofazowej (faza płynna z cząstkami stałymi) ze względu na zróżnicowany transfer energii między cząstkami o różnym stanie skupienia w przepływie ciągłym [21]. Należy podkreślić, że końcowy efekt ściśle zależy od doboru parametrów procesu obróbki mikrofalowej do określonej matrycy żywnościowej.

Wpływ przepływowej obróbki mikrofalowej na jakość produktów

Trwałość mikrobiologiczna

Pierwsze badania dotyczące purée warzywnego utrwalanego przepływową pasteryzacją mikrofalową (135 °C/30 s), a następnie pakowanego aseptycznie, wykazały brak obecności żywych kolonii bakterii, pleśni i drożdży po 1, 15 i 90 dniach przechowywania [5]. Skuteczność przepływowej pasteryzacji mikrofalowej potwierdzili również Stratakos i wsp. [26]. Porównali oni pasteryzowany mikrofalowo (85 °C, 81,8 s, 100 l/h) i konwencjonalnie (85 °C/5 min) sok pomidorowy bezpośrednio po utrwaleniu, jak i w trakcie 56-dniowego przechowywania w 4 °C. Bezpośrednio po utrwaleniu w obu wariantach soków całkowita liczba żywych drobnoustrojów (TVC), bakterii mlekowych, bakterii *Enterobacteriaceae* oraz drożdży i pleśni była poniżej granicy wykrywalności. W przypadku wszystkich grup drobnoustrojów ich liczba nie zwiększyła się przez cały okres przechowywania. Zaś TVC były zidentyfikowane w dniu 28. w ilości 2,13 i 2,00 log jtk/ml odpowiednio dla soków pomidorowych utrwalanych tradycyjnie i mikrofalowo (brak istotnej różnicy między metodami) i dalej nie wzrosły istotnie. Również całkowitą inaktywację bakterii oraz drożdży i pleśni zaobserwowano w soku z aronii oraz soku z jagody kamczackiej pasteryzowanym mikrofalowo w temperaturach 90 ÷ 135 °C. Jednocześnie w eksperymencie wykazano, że zastosowanie temperatury 80 °C nie pozwoliło na pełną inaktywację bakterii [17]. Marszałek i wsp. [10] potwierdzili skuteczność przepływowej pasteryzacji mikrofalowej (80 °C/7 s, 90 °C/7 s, 90 °C/10 s i 120 °C/10 s) w inaktywacji drożdży i pleśni w purée truskawkowym. Temperatury procesu poniżej 100 °C nie pozwoliły na obniżenie ogólnej liczby drobnoustrojów poniżej granicy detekcji. Ci sami badacze [11], kontynuując badania nad purée truskawkowym, zaobserwowali, że w związku z niedostatecznym zmniejszeniem liczby drobnoustrojów ogółem w próbie utrwalonej mikrofalowo

w 90 °C, zapewniona została trwałość przez 44 tygodnie, w przeciwieństwie do purée utrwalanego w 120 °C, gdzie odnotowano znaczne zwiększenie trwałości produktu (52 tygodnie). Z kolei Abdullah i wsp. [1] wykazali, że ogólna liczba drobnoustrojów w soku z kawa kawa zmalała o 0,81, 2,61 i 3,86 cykli logarytmicznych w porównaniu z próbą surową – odpowiednio po utrwaleniu w przepływowym pasteryzatorze mikrofalowym z zastosowaniem parametrów 330 W, 255 ml/min i 41,4 °C; 440 W, 255 ml/min i 52,3 °C oraz 550 W, 255 ml/min i 65,2 °C [1]. Duhan i Kar [6] wykazali, że pasteryzacja mikrofalowa obniżyła liczbę żywych bakterii o około 3 cykle logarytmiczne, ale nie wyeliminowała ich całkowicie w soku z trzciny cukrowej. Zastosowanie obróbki mikrofalowej okazało się również skuteczniejsze niż tradycyjna pasteryzacja. Badacze wskazali, że dłuższa ekspozycja na mikrofałe powoduje większą dekontaminację.

Aktywność enzymatyczna

Badania dotyczące modelowania i eksperymentalnej walidacji profilu czasowo-temperaturowego przepływowej pasteryzacji mikrofalowej soku pomarańczowego wykazały, że warunki 90 °C i 100 °C oraz czas utrzymywania wskazanych temperatur przez $2 \div 10$ s zapewniają w co najmniej 98 % inaktywację pektynometyloesterazy [2]. Rayman i Baysal [19] wykazali całkowitą inaktywację tego samego enzymu w pasteryzowanym mikrofalowo soku marchwiowym. Z kolei badania modelowe na mętym soku jabłkowym pozwoliły na porównanie różnych warunków przepływowej pasteryzacji mikrofalowej (przepływ 0,4 lub 0,8 l/min i temperatura procesu 70 °C, 80 °C i 90 °C) w aspekcie aktywności trzech enzymów [22]. W wyniku tego eksperymentu wykazano, że wraz ze wzrostem temperatury następowało zwiększenie inaktywacji badanych enzymów, jednak żaden z rozpatrywanych wariantów pasteryzacji mikrofalowej nie pozwolił na całkowitą inaktywację pektynometyloesterazy, zaś obecności oksydazy polifenolowej nie odnotowano w trzech wariantach (0,8 l/min i 80 °C, 0,4 l/min i 90 °C, 0,8 l/min i 90 °C), a peroksydazy – w dwóch (0,4 l/min i 90 °C, 0,8 l/min i 90 °C). Niedostateczną dezaktywację enzymów przy zastosowaniu przepływowej pasteryzacji mikrofalowej przedstawiają również Marszałek i wsp. [10] w purée truskawkowym. Wśród porównywanych metod utrwalania wyłącznie konwencjonalna pasteryzacja pozwoliła na skuteczną inaktywację oksydazy polifenolowej i peroksydazy. Zastosowanie parametrów obróbki mikrofalowej 90 °C/7 s, 90 °C/10 s i 120 °C/10 s pozwoliło na znaczący spadek aktywności oksydazy polifenolowej, o około 80 %. Najgorszą efektywnością charakteryzowała się przepływowa pasteryzacja mikrofalowa w 80 °C przez 7 s, powodując inaktywację powyższych enzymów jedynie o około 62 %. Wskazane parametry okazały się skuteczniejsze w przypadku peroksydazy. Zastosowanie 10-sekundowego ogrzewania zapewniło wyższy stopień inaktywacji – około 88 %, zaś 7-sekundowego – około 78 %. Duhan i Kar [6] w soku

z trzciny cukrowej również zaobserwowali niecałkowitą inaktywację oksydazy polifenolowej po pasteryzacji mikrofalowej, aczkolwiek wyniki były lepsze niż w przypadku tradycyjnej pasteryzacji. Badacze zauważyli również, iż stopień inaktywacji wzrastał wraz ze zmniejszeniem zastosowanej mocy mikrofal, a tym samym z wydłużeniem czasu ich oddziaływania do uzyskania założonej temperatury procesu.

Podstawowe wyróżniki jakościowe

Przedstawiane w literaturze wyniki badań produktów utrwalonych z zastosowaniem mikrofalowej pasteryzacji przepływowej dowodzą braku wpływu tej metody na podstawowe wyróżniki jakościowe. Stratakos i wsp. [26] nie wykazali istotnych różnic między sokiem pomidorowym utrwalanym z użyciem mikrofal i bez nich w aspekcie ekstraktu (2,25 °Brix w obu przypadkach), kwasowości miareczkowej (0,35 ÷ 0,44 g kwasu cytrynowego/100 g) i pH (4,20 ÷ 4,26). Sok utrwalony mikrofalowo wykazywał około dwukrotnie większą mętność serum. W trakcie przechowywania zmętnienie malało do 14. dnia w przypadku próby utrwalanej mikrofalowo oraz do 28. podczas zastosowania konwencjonalnej pasteryzacji. Również Amaro i wsp. [2] nie wykazali istotnych zmian bezpośrednio po utrwaleniu w pasteryzatorze przepływowym, bez użycia promieniowania mikrofalowego oraz z jego użyciem, soku pomarańczowego w aspekcie pH (odpowiednio 4,08 i 4,03), kwasowości miareczkowej (0,603 i 0,598 g kwasu cytrynowego/100 ml) oraz ekstraktu (10,08 i 9,94 °Brix). Analogiczne wnioski wysunęli Rayman i Baysal [19] w kwestii kwasowości miareczkowej oraz Duhan i Kar [6] w kwestii pH i ekstraktu. Ostatni badacze podkreślili ponadto, że różne warianty zastosowanych parametrów mikrofal (210, 280, 350, 420 lub 490 W do uzyskania 70 °C; a następnie 10 min utrzymywania temperatury 70 °C) nie spowodowały istotnych różnic ekstraktu i pH soku z trzciny cukrowej.

Zawartość składników bioaktywnych

Atunwu i wsp. [3] wskazali, że pod względem zawartości witaminy C nie ma istotnej różnicy między surowym sokiem pomarańczowym a sokiem utrwalanym mikrofalowo (75 °C/26 s) lub z zastosowaniem HTST (76,8 °C/15 s) oraz wysokimi ciśnieniami hydrostatycznymi (600 MPa/3 min). Badania Amaro i wsp. [2] pozwoliły wykazać retencję witaminy C na poziomie odpowiednio: 94, 92, 89 i 87 % dla soku pomarańczowego utrwalonego mikrofalami w temperaturach: 70, 80, 90 i 100 °C, zaś dla tradycyjnego procesu odpowiednio: 92, 87, 85 i 82 %. Marszałek i wsp. [10] określili retencję witaminy C (sumy kwasu askorbinowego i kwasu dehydroaskorbinowego) w purée truskawkowym na poziomie 78 ÷ 96 % w zależności od zastosowanych parametrów pasteryzacji mikrofalowej, co było ponad dwukrotnie większą wartością niż dla pasteryzacji w 90 °C przez 15 minut. Badanie potwierdziło, że stopień degradacji witaminy C, z uwagi na jej wysoką termolabilność, zwiększa się wraz ze wzrostem

temperatury i wydłużaniem czasu jej utrzymywania. Należy podkreślić, że o stopniu degradacji decyduje również dostęp do tlenu, obecność metali i innych reaktywnych jonów.

Jedne z pierwszych badań dotyczące ogrzewania mikrofalowego purée warzywnego dotyczyły wykorzystania pilotażowego urządzenia mikrofalowego o mocy 60 kW [25]. Badania z zastosowaniem przepływu 5,7 l/min i temperatur z zakresu 135-145 °C utrzymywanych przez 30 s wykazały, że całkowita zawartość polifenoli w purée ze słodkich ziemniaków wzrosła o 5,9 %, zaś oznaczonych monomerów antocyjanów spadła o 14,5 %. Potwierdziło to możliwość wzrostu ogólnej zawartości związków polifenolowych w przypadku utrwalania mikrofalowego produktów zawierających tkankę surowca. Znalazło to potwierdzenie również w innych badaniach, jednakże jak dotąd mechanizm ten nie został jeszcze w pełni wyjaśniony. Przepuszczalnie promieniowanie mikrofalowe oddziałujące z tkanką surowca ułatwia uwalnianie się polifenoli ze struktur komórkowych. Efekt ten zauważano również w niepublikowanych badaniach własnych. Siguemoto i wsp. [24] zbadali pasteryzację przepływową i pasteryzację wspomaganą mikrofalami w różnych wariantach temperatury (70 °C, 80 °C, 90 °C) i przepływu (0,9 i 0,5 l/min dla pasteryzacji zwykłej i 0,8 i 0,4 l/min dla mikrofal). W przypadku pierwszej metody uzyskano całkowitą zawartość polifenoli na poziomie od 7,46 do 10,50 mg/100 ml, zaś w drugiej od 5,69 do 8,02 mg/100 ml, gdzie mętny sok jabłkowy niepoddany utrwalaniu zawierał 4,85 mg/100 ml. Każdy z procesów (oprócz pasteryzacji mikrofalowej o temperaturze 70 °C i przepływie 0,8 l/min) spowodował istotny wzrost zawartości polifenoli ogółem. W następstwie pasteryzacji mikrofalowej ilość kwasu chlorogenowego, epikatechiny i floryzyny wzrosła odpowiednio o 9 ÷ 34 %, 27 ÷ 256 % i 44 ÷ 106 % w porównaniu z próbą surową. Autorzy badania wskazują, że zaobserwowane zwiększenie zawartości tych związków mogło być związane z efektywniejszą ekstrakcją (na skutek hydrolizy form związanych do form wolnych) bądź częściową lub całkowitą inaktywacją oksydazy polifenolowej i peroksydazy w zależności od zadanych parametrów (co chroni polifenole). Wzrost zawartości polifenoli ogółem na skutek pasteryzacji mikrofalowej (90 ml/min, 900 W, 99 °C) o 1,4 % w porównaniu z próbą kontrolną zaobserwowali także Rayman i Baysal [19] w soku z marchwi. Jednocześnie w przypadku próby pasteryzowanej (100 °C/10 min), zaobserwowano istotny spadek badanych związków o 12 %. Po 4 miesiącach przechowywania między próbą konwencjonalną a tradycyjną nie odnotowano istotnych różnic. Marszałek i wsp. [10] wykazali wzrost zawartości kwasów fenolowych (p-hydroksybenzoesowego i elagowego) i flawonoli (kwercetyny i kampferyolu), zaś spadek zawartości polifenoli ogółem oraz sumy oznaczonych antocyjanów w purée truskawkowym w porównaniu ze świeżymi truskawkami, odpowiednio o 35 ÷ 73 %, 25 ÷ 45 %, 37 ÷ 62 %, 12 ÷ 41 %, 4 ÷ 7 % 12 ÷ 23 % w zależności od zastosowanych parametrów ogrzewania mikrofalowego. Badacze podkreślili, że wzrost

temperatury procesu nie spowodował znaczącego wpływu na zawartość polifenoli ogółem. W przypadku wskazanych związków bioaktywnych to działanie mikrofal, a nie tradycyjna pasteryzacja okazały się lepsze.

Aktywność przeciwutleniająca

Stratakos i wsp. [26] zmierzili aktywność przeciwutleniającą dwiema metodami ABTS i ORAC w soku pomidorowym utrwalanym mikrofalowo i tradycyjnie. W przypadku pierwszej z metod pomiaru próbka po mikrofalach miała istotnie statystycznie wyższą aktywność (o 47 %), zaś w drugiej nieistotnie wyższą (o 24 %). Badacze wskazują, że zróżnicowana wielkość zmian między ABTS i ORAC wynika głównie ze specyfiki tych metod pomiaru pojemności przeciwutleniającej. Na końcu 56-dniowego okresu przechowywania, w przypadku zastosowania obu metod pomiaru, nie zauważono istotnych zmian aktywności dla soku po obróbce mikrofalowej w przeciwieństwie dla tego pasteryzowanego tradycyjnie. Podobną tendencję wykazali Sigumoto i wsp. [24]. Utrwalony różnymi wariantami mikrofalowej pasteryzacji przepływowej mętny sok jabłkowy miał większą aktywność przeciwutleniającą (w związku ze wzrostem zawartości polifenoli ogółem po procesie) zmierzoną metodą DPPH o $70 \div 198$ % i ORAC o $42 \div 91$ % niż próba nieutrwalana. Również sok marchwiowy utrwalały mikrofalami (90 ml/min, 900 W, 99 °C) wykazywał prawie dwukrotnie większą pojemność antyutleniającą niż próba kontrolna i około trzykrotnie niż pasteryzowana tradycyjnie (100 °C/10 min). Z drugiej strony, to próba utrwalała niekonwencjonalnie wykazywała mniejszą aktywność po 4 miesiącach przechowywania [19]. Odmienne zależności zaobserwowali Duhan i Kar [6]. Tradycyjna pasteryzacja (70 °C/10 min) i mikrofalowa (210, 280, 350, 420 lub 490 W do uzyskania 70 °C; 10 min utrzymywania temperatury 70 °C) znacząco obniżyły pojemność antyutleniającą w porównaniu z próbą surową, jednakże to metoda niekonwencjonalna pozwoliła na jej większą retencję. Wzrost zastosowanej mocy mikrofal przy utrzymaniu tej samej temperatury procesu, a tym samym krótszy czas ekspozycji na działanie promieniowania w celu podgrzania soku, pozwolił na zwiększenie stopnia zachowania aktywności. Z kolei brak istotnego wpływu mikrofal na pojemność antyutleniającą zmierzoną z użyciem rodnika DPPH i metody ORAC odnotowali Steed i wsp. [25] w badaniach nad purée z batatów.

Barwa

Coronel i wsp. [5] utrwalili purée z batatów w trzech temperaturach: 110 °C, 130 °C i 140 °C. Nie odnotowali istotnej zmiany parametrów L^* (spadek o $2 \div 3$ %) i a^* (spadek o $8 \div 11$ %) wobec próby nieutrwalanej, zaś parametr b^* wzrósł istotnie o $5 \div 11$ %. Przy czym między próbkami utrwalanymi w 130 °C i 140 °C nie było istotnej różnicy. Bezwzględna różnica barwy (ΔE) liczona względem purée przed pastery-

zacja wyniosła odpowiednio 10, 20 i 20 dla wskazanych temperatur. Marszałek i wsp. [10] dokonali oceny ΔE między próbami nieutrwalonymi purée truskawkowego a pasteryzowanymi konwencjonalnie (90 °C/15 min) i utrwalanymi mikrofalami (90 °C/10 s, 120 °C/10 s, 80 °C/7 s, 90 °C/7 s). Każdy z wariantów ogrzewania mikrofalowego powodował znacząco mniejszą zmianę barwy (ΔE od 0,65 do 1,41) niż proces tradycyjny ($\Delta E = 3,00$). Przeciwnie, Stratakos i wsp. [26], którzy badali sok pomidorowy, nie zaobserwowali istotnej różnicy parametrów barwy między konwencjonalną a mikrofalową pasteryzacją. Rayman i Baysal [19] odnotowali znaczące zmiany w barwie soku marchwiowego utrwalonego technikami mikrofalową i konwencjonalną – ΔE wyniosła odpowiednio 10,63 i 10,30.

Ocena organoleptyczna

W wyniku badań organoleptycznych nie wykazano różnic w zakresie zapachu, smaku, kwasowości i słodkości, jak i w ogólnym poziomie akceptowalności między mikrofalowo a tradycyjnie utrwalanym sokiem pomidorowym. Niższą notę w aspekcie wyglądu ogólnego otrzymał pierwszy ze wspomnianych soków, co może wiązać się z wyższą mętnością serum [26]. Na podstawie analizy organoleptycznej purée truskawkowych utrwalonych w różnych temperaturach (pary 90 °C/10 s i 120 °C/10 s oraz 80 °C/7 s i 90 °C/7 s), nie wykazano istotnej różnicy w ocenach barwy, smaku, aromatu, konsystencji i ogólnej jakości między nimi [10]. Jednakże porównując z próbkami nieutrwalanymi, zauważono znaczące zmiany. W obu parach gorzej został oceniony smak, aromat i uzyskano niższą ogólną ocenę. Próby mikrofalowe 90 °C/10 s i 120 °C/10 s porównano również z tymi utrwalonymi tradycyjną pasteryzacją (90 °C/15 min) i przyznano wyższą notę w ogólnej ocenie [10].

Podsumowanie

Niniejsze opracowanie wskazuje, że odpowiednie dostosowanie parametrów obróbki mikrofalowej pozwala na uzyskanie jakości zbliżonej do produktu surowego oraz o jakości zbliżonej do tradycyjnego procesu utrwalania produktów owocowo-warzywnych bądź wyższej od niej. Przepływowa pasteryzacja mikrofalowa może mieć szerokie zastosowanie w przemyśle owocowo-warzywnym ze względu na możliwość regulacji mnogiej liczby parametrów, a tym samym optymalnego doboru do danej macierzy żywnościowej. W związku ze wskazanymi korzyściami prognozuje się bardziej dynamiczny rozwój tej techniki w przemyśle owocowo-warzywnym. Wymagane są dalsze badania nad wpływem pasteryzacji mikrofalowej na retencję i biodostępność związków bioaktywnych w utrwalanej żywności. Szczególnie ważne jest poznanie mechanizmu zwiększenia zawartości polifenoli pod wpływem obróbki mikrofalami.

Literatura

- [1] Abdullah S.A., Lee S.H., Cho I.K., Li Q.X., Jun S., Choi W.: Pasteurization of kava juice using novel continuous flow microwave heating technique. *Food Sci. Biotechnol.*, 2013, 22 (4), 961-966.
- [2] Amaro K.C., Russo G., Fan D.L., Gut J.A.W., Tadini C.C.: Modeling and experimental validation of the time-temperature profile, pectin methylesterase inactivation, and ascorbic acid degradation during the continuous flow microwave-assisted pasteurization of orange juice. *Food Bioprod. Proc.*, 2024, 144, 191-202.
- [3] Atuonwu J.C., Leadley C., Bosman A., Tassou S.A.: High-pressure processing, microwave, ohmic, and conventional thermal pasteurization: Quality aspects and energy economics. *J. Food Process. Eng.*, 2020, 43, #13328.
- [4] Brinley T.A., Dock C.N., Truong V-D., Coronel P., Kumar P., Simunovic J., Sandeep K.P., Cartwright G.D., Swartzel K.R., Jaykus L-A.: Feasibility of utilizing bioindicators for testing microbial inactivation in sweetpotato purees processed with a continuous-flow microwave system. *J. Food Sci.*, 2007, 72 (5), E235-E242.
- [5] Coronel P., Truong V-D., Simunovic J., Sandeep K.P., Cartwright G.D.: Aseptic processing of sweetpotato purees using a continuous flow microwave system. *J. Food Sci.*, 2005, 70 (9), E531-E536.
- [6] Duhan S., Kar A.: Optimization of process parameter combinations for pasteurization of sugarcane (*Saccharum officinarum*) juice using continuous flow microwave system. *Indian J. Agri. Sci.*, 2018, 88(8), 1253-1257.
- [7] Gentry T.S., Roberts J.S.: Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider. *LWT-Food Sci. Technol.*, 38, 227-238.
- [8] González-Monroy A.D., Rodríguez-Hernández G., Ozuna C., Sosa-Morales M.E.: Microwave-assisted pasteurization of beverages (tamarind and green) and their quality during refrigerated storage. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2018, 49, 51-57.
- [9] Guzik P., Kulawik P., Zając M., Migdał W.: Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2022, 62 (29), 7989-8008.
- [10] Marszałek K., Mitek M., Skąpska S.: Effect of continuous flow microwave and conventional heating on the bioactive compounds, colour, enzymes activity, microbial and sensory quality of strawberry purée. *Food Bioproc. Technol.*, 2015, 8, 1864-1876.
- [11] Marszałek K., Woźniak Ł., Skąpska S., Mitek M.: A comparative study of the quality of strawberry purée preserved by continuous microwave heating and conventional thermal pasteurization during long-term cold storage. *Food Bioproc. Technol.*, 2016, 9, 1100-1112.
- [12] Marszałek K.: Zastosowanie niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności (UHP i ogrzewania mikrofalowego) do produktów owocowych. Praca doktorska, SGGW, Warszawa, 2013.
- [13] Melski K.: Rola i postrzeganie kuchenki mikrofalowej w gospodarstwach domowych. Exante Wydawnictwo Naukowe, Wrocław, 2023
- [14] Oishi T.K., Gut J.: Modeling time-temperature history and sterilization value of mango puree under conventional and microwave assisted pasteurization. *International J. Food Engineer.*, 2021, 17(9), 737-745.
- [15] Oishi T.K., Pouzada E.V.S., Gut J.A.W.: Experimental validation of a multiphysics model for the microwave-assisted pasteurization of apple juice. *Digital Chem. Engineer.*, 2022, 100053.
- [16] Perek A., Dolata W.: Zastosowanie mikrofal do obróbki cieplnej żywności. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2009, 2, 103-108.

- [17] Piasek A., Kusznerewicz B., Grzybowska I., Malinowska-Pańczyk E., Piekarska A., Azqueta A., Collins A.R., Namieśnik J., Bartoszek A.: The influence of sterilization with EnbioJet® Microwave Flow Pasteurizer on composition and bioactivity of aronia and blue-berried honeysuckle juices. *J. Food Comp. Anal.*, 2011, 24, 880-888.
- [18] Ptak S., Żarski A., Kapuśniak J.: Aspekty technologiczne, ekonomiczne i zdrowotne zastosowania promieniowania mikrofalowego w obróbce żywności. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2020, 27, 1 (122), 47-62.
- [19] Rayman A., Baysal T.: Yield and Quality Effects of Electroporation and Microwave Applications on Carrot Juice Production and Storage. *J. Food Sci.*, 2011, 76 (4), C598-605.
- [20] Sabliov C.M., Boldor D., Coronel P., Sanders T.H.: Continuous microwave processing of peanut beverages. *J. Food Process. Preserv.*, 2008, 32, 935-945.
- [21] Sawale M., Benyathiar P., Coronel P., Rawat A., Simunovic J., Ozadali F., Mishra D.K.: Aseptic microwave sterilization and validation of food containing particles. *Food Bioprod. Process.*, 2024, 143, 28-35.
- [22] Siguemoto É.S., Funcia E.S., Pires M.N., Gut J.A.W.: Modeling of time-temperature history and enzymatic inactivation of cloudy apple juice in continuous flow microwave assisted pasteurization. *Food Bioprod. Process.*, 2018, 111, 45-53.
- [23] Siguemoto É.S., Pires M.N., Funcia E.S., Gut J.A.W.: Evaluation and modeling of a microwave-assisted unit for continuous flow pasteurization of liquid foods: Residence time distribution, time-temperature history, and integrated lethality. *J. Food Process. Eng.*, 2018, 41, #12910.
- [24] Siguemoto É.S., Purgatto E., Hassimotto N.M.A., Gut J.A.W.: Comparative evaluation of flavour and nutritional quality after conventional and microwave-assisted pasteurization of cloudy apple juice. *LWT-Food Sci. Technol.*, 2019, 111, 853-860.
- [25] Steed L.E., Truong V-D., Simunovic J., Sandeep K.P., Kumar P., Cartwright G.D., Swartzel K.R.: Continuous flow microwave-assisted processing and aseptic packaging of purple-fleshed sweetpotato purees. *J. Food Sci.*, 2008, 73(9), E455-E462.
- [26] Stratakos A.Ch., Delgado-Pando G., Linton M., Patterson M.F., Koidis A.: Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food Chem.*, 2016, 190, 622-628.
- [27] Teleken J.T., Dutra A.C., Laurindo J.B., Carciofi B.A.M.: Numerical modeling of heating tomato pulp in continuous flow microwave-assisted thermal processing: Estimation of quality parameters. *J. Food Process. Eng.*, 2023, 46, #14216.
- [28] Wu Y., Mu R., Li G., Li M., Lv W.: Research progress in fluid and semifluid microwave heating technology in food processing. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2022, 21, 3436-3454.

CONTINUOUS FLOW MICROWAVE PASTEURIZATION OF FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTS

S u m m a r y

Background. Microwave heating is one of the methods used during food processing, understood in a broad sense, which attracts the greatest interest in Europe and North America. This paper presents the principle of microwave radiation and its application in the food industry. The use and impact of flow microwave pasteurization on the quality of fruit and vegetable products, considered in terms of the most important quality characteristics, i.e. microbiological stability, enzymatic activity, basic physicochemical

characteristics, color, the content of the most important groups of bioactive compounds and antioxidant activity, were discussed.

Results and conclusions. Flow microwave pasteurization is used to preserve liquid and semi-liquid products such as purees, juices, beverages and soups. The right combination of parameters determines the effective inactivation of microorganisms and enzymes. The method does not significantly alter pH, titratable acidity or total soluble solids. The literature indicates that microwave pasteurization has a varying effect on the degree of color change, depending on parameters used and a food matrix. In most cases, it allows for the better retention of bioactive components compared to traditional pasteurization due to shorter high temperature exposure time. The study shows the potential for an increase in the overall content of polyphenolic compounds in the case of microwave-preserved products containing raw material tissue. Continuous flow microwave pasteurization is an unconventional preservation technique in the fruit and vegetable industry, which has been thriving in recent years. Due to the economic advantages of the process and the potentially higher quality of resulting products compared to conventional preservation methods, microwave pasteurization is gaining popularity.

Keywords: flow microwave pasteurization, unconventional preservation methods, bioactive compounds, enzymatic activity, antioxidant activity ☒