

INŻYNIERIA ROLNICZA

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-60-0

**Kościantyn Vasiukov
Leszek Rydzak**

**Potencjał aplikacyjny
impregnacji próżniowej
i obróbki promieniowaniem mikrofalowym
w słodownictwie i browarnictwie**

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Kraków 2024

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

**Potencjał aplikacyjny impregnacji próżniowej
i obróbki promieniowaniem mikrofalowym
w słodownictwie i browarnictwie**

Kostiantyn Vasiukov, Leszek Rydzak

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:

dr hab. inż. Adam Ekielski, prof. Uczelni - SGGW w Warszawie

dr hab. inż. Sławomir Obidziński, prof. Uczelni - Politechnika Białostocka

Wydawca:

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

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

ISBN 978-83-64377-60-0

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 6,85; ark. druk. 6,25

Nakład: 100 egz.

Spis treści:

WYKAZ SKRÓTÓW I OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. PRODUKCJA SŁODU	11
2.1. Ogólny opis technologii słodu	11
2.2. Surowce słodownicze	12
2.2.1 Jęczmień	12
2.2.2. Inne surowce w słodownictwie	14
2.3. Czyszczenie ziarna	17
2.4. Moczenie ziarna	24
2.5. Słodowanie	27
2.5.1. Przemiany w ziarnie	28
2.5.2. Urządzenia słodownicze	29
2.6. Suszenie zielonego słodu	31
2.7. Usuwanie kiełków	32
2.8. Rodzaje sładów	32
3. PRODUKCJA PIWA	35
3.1. Surowce piwowarskie	36
3.1.1. Chmiel	36
3.1.2. Woda	37
3.1.3. Drożdże	38
3.2. Rozdrabnianie słodu	40
3.2. Wytwarzanie brzezki piwnej	41
3.2.1. Zacieranie	41
3.2.2. Filtracja brzezki	43
3.2.3. Warzenie piwa	45
3.3. Fermentacja i leżakowanie	47
4. IMPREGNACJA PRÓŻNIOWA	51
4.1. Zastosowania impregnacji w przetwórstwie żywności	58
4.2. Potencjał aplikacyjny impregnacji próżniowej w słodownictwie i browar- nictwie	59
5. OBRÓBKA PROMIENIOWANIEM MIKROFALOWYM	61
6. PODSUMOWANIE	81
7. BIBLIOGRAFIA	83

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Wykaz skrótów

DRP	– zjawisko odkształcenia i odprężenia materiału (ang. Deformation – Relaxation Phenomena),
DVI	– impregnacja próżniowa sucha (ang. Dry Vacuum Impregnation),
DVP	– impregnacja próżniowa sucha wspomagana nadciśnieniem (ang. Dry Vacuum and Pressure),
HDM	– mechanizm hydrodynamiczny (ang. Hydrodynamic Mechanism),
WVI	– impregnacja próżniowa mokra (ang. Wet Vacuum Impregnation),
DMS	– siarczek dimetylu,
SMM	– S-metylometyonina,

Wykaz oznaczeń

γ	– względny stopień deformacji materiału ($m^3 \cdot m^{-3}$),
τ_{1a}	– chwila (punkt na osi czasu), w której w układzie występuje stan równowagi po działaniu DRP, związanym z obniżeniem ciśnienia w układzie,
τ_{1b}	– chwila (punkt na osi czasu), w której w układzie występuje stan równowagi po działaniu HDM, związanym z obniżeniem ciśnienia w układzie i działaniem DRP,
τ_2	– chwila (punkt na osi czasu), w której w układzie występuje stan równowagi po współdziałaniu HDM i DRP, związanym z przywróceniem w układzie ciśnienia atmosferycznego,
ϵ_e	– porowatość efektywna (%),
Δp	– różnica pomiędzy ciśnieniem impregnacji i ciśnieniem atmosferycznym ($\Delta p = p_2 - p_1$) (Pa),
p_1	– ciśnienie impregnacji próżniowej (Pa),
p_2	– ciśnienie w otoczeniu (atmosferyczne) (Pa),
p_{at}	– ciśnienie atmosferyczne (Pa),
p_c	– ciśnienie kapilarne (Pa),
p_j	– ciśnienie w układzie w chwili τ_j (Pa),
p_{j+1}	– ciśnienie w układzie w chwili τ_{j+1} (Pa),
p_w	– ciśnienie wewnętrzne (Pa),
p_z	– ciśnienie zewnętrzne (Pa),
r_2	– stopień kompresji,
t_1	– czas utrzymania obniżonego ciśnienia w układzie (s),
t_2	– czas relaksacji (s),
t_A	– czas trwania fazy obniżania ciśnienia (s),
t_B	– czas trwania fazy przywracania ciśnienia atmosferycznego (s),
V_0	– objętość materiału (m^3),
V_{g0}	– objętość gazu zamkniętego we wszystkich porach materiału (m^3),
v_{g0}	– objętość względna gazu zamkniętego w porach materiału w chwili $\tau=0$ ($m^3 \cdot m^{-3}$),
v_{g1a}	– objętość względna gazu w chwili τ_{1a} ($m^3 \cdot m^{-3}$),
v_{g1b}	– objętość względna gazu w chwili τ_{1b} ($m^3 \cdot m^{-3}$),
v_{g2}	– objętość względna gazu w chwili τ_2 ($m^3 \cdot m^{-3}$),

- v_{gj} – objętość względna gazu w chwili τ_j ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- v_{gj+1} – objętość względna gazu w chwili τ_{j+1} ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- X – objętość względna materiału zajmowana przez ciecz ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- x_c – objętość względna pora wywołana deformacją w chwili τ_2 ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- x_{cl} – objętość względna pora wywołana deformacją w chwili τ_{lb} ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- x_v – objętość względna pora zajmowana przez ciecz w chwili τ_2 ($m^3 \cdot m^{-3}$),
- x_{vl} – objętość względna pora zajmowana przez ciecz w chwili τ_{lb} ($m^3 \cdot m^{-3}$).

1. WSTĘP

Browarnictwo jest jedną z najbardziej rozwiniętych branż w przemyśle spożywczym. Wynika to przede wszystkim z dostępności surowców (ziarna zbóż, przede wszystkim jęczmienia oraz prostoty procesu produkcji. Począwszy od kielkowania ziarna i kończąc na warzeniu piwa – każdy etap jest możliwy do zrealizowania nawet w warunkach domowej kuchni. Jednocześnie piwowarstwo ma swoją długą historię, która sięga starożytnej Mezopotamii, co sprawia, że proces produkcji piwa jest dobrze udokumentowany (Pires i in., 2015).

Produkcja piwa obejmuje szereg procesów, obejmujących wytwarzanie słodu, a następnie brzezczki, warzenie piwa i fermentację. Kluczowym etapem, od którego uzależnione są wszystkie kolejne jest produkcja słodu. O surowiec (tj. surowe ziarno zbóż) należy odpowiednio zadbać już na etapie magazynowania, by nie doszło do inwazji szkodników. Ważne są także warunki mikroklimatyczne oraz ich szczegółowe przestrzeganie, co wykluczy namnażanie się grzybów i pleśni. Produkcja słodu była włączana do programów zrównoważonego rozwoju na całym świecie, w tym też w Unii Europejskiej. Na przykład w Szkocji jest to jedna z kluczowych branż ze względu na produkcję szkockiej whisky (Glenk i in., 2012). Obecnie jest to ważny temat ze względu na zmiany, które zaszły na przestrzeni ostatnich 12 lat w ustawodawstwie unijnym dotyczącym środków ochrony roślin. Ten aspekt uprawy roli szczególnie przekłada się na jakość i bezpieczeństwo plonów, a tym samym – na realizację polityki zrównoważonego rozwoju. Jednocześnie, choć globalny rynek piwowarstwa jest przejęty przez niewielką liczbę światowych koncernów – na popularności zyskują lokalne browary rzemieślnicze. Dostarczają one unikatowy produkt wybranej grupie odbiorców w skali swojego regionu lub co najwyżej – kraju. Co więcej, wraz z rozwojem mikrobrowarów, odradza się tendencja wykorzystywania starych odmian zbóż, które nie są używane w wielkoskalowej produkcji rolniczej lub gatunków nietypowych dla piwowarstwa (Mascia i in., 2014; Fogarasi i in., 2015). Tym samym, realizowana jest polityka zrównoważonego rozwoju rolnictwa (Albanese i in., 2018).

Warto zaznaczyć, iż produkcja słodu nie dotyczy wyłącznie branży browarniczej. Słód jest stosowany również jako substancja słodząca w krajach azjatyckich. Kraje Unii Europejskiej obecnie są największymi eksporterami słodu. Przy czym w ostatnich latach, odnotowuje się stały wzrost eksportu. Co ważne – na eksport europejski przypada ponad 50% światowego eksportu słodów. Pod względem ilościowym największymi europejskimi eksporterami w 2021 r. były Francja (484 mln USD), Niemcy (422 mln USD) i Belgia (370 mln USD). Te trzy kraje odpowiadają za około 30% światowego eksportu. Natomiast największymi importerami są Brazylia (646 mln USD - 15,5%), Meksyk (382 mln USD - 9,13%) i USA (287 mln USD - 6,87%) (OEC World, 2024).

W Unii Europejskiej konsumpcja piwa utrzymuje się na stałym poziomie od około 2010 roku i szacuje się na poziomie nieco powyżej 35 miliardów litrów (Mercy i Beck-Domzalska, 2016). Od roku 2015 jednak zaczęła spadać. Poza tym, spośród wszystkich krajów unijnych, należy dostrzec wzrost eksportu produktów żywnościowych z Polski do krajów azjatyckich, szczególnie do Chin. Właśnie Chiny zwiększyły zakupy polskiej żywności o 76% r/r w I półroczu 2019 r. Japonia również w tym okresie kupiła o 73% więcej polskich produktów spożywczych. Co ważne – właśnie ekstrakt słodowy i piwo osiągnęły największy wzrost

w eksporcie. Eksport ekstraktu słodowego do Chin wzrósł w 2019 r. o 63% r/r i mimo zakłóceń w handlu, które wywołała pandemia Covid-19, eksport ten stale rośnie. Produkcja ekstraktu słodowego może dodatkowo zrekompensować postępujący spadek spożycia piwa w Europie. Wartość eksportu piwa do Chin w okresie styczeń-maj 2019 r. wyniosła 5 mln zł. Jest on o 50% wyższy, w porównaniu do analogicznego okresu z roku poprzedniego. Ważnym importerem polskiego piwa i ekstraktów jest także Korea Południowa. Eksport piwa do tego kraju wzrósł w 2018 r. do 67 mln zł, kiedy to w roku poprzednim wartość ta wynosiła zaledwie 17 mln zł. Z kolei do maja 2019 r. wartość eksportu osiągnęła poprzeczkę 39 mln zł, dzięki czemu obserwujemy duże przyrosty eksportu z roku na rok (Zaleska, 2019).

Również na poziomie globalnym, obserwowana jest tendencja do obniżenia konsumpcji piwa. Jest to sytuacja niespotykana w ciągu ostatnich 3 dekad. Aczkolwiek spożycie piwa jest nadal duże i wynosi ponad 1,8 mld hl. Spadkowy trend globalnego spożycia piwa sprawił, że rynek stał się bardziej konkurencyjny. Browary starają się więc poszerzać swoją ofertę, wprowadzając nowe, innowacyjne produkty, aby powstrzymać ten spadek (Harasym i Podeszwa, 2015).

Stosowanie różnych dodatków w produkcji piwa wydaje się być rozwiązaniem problemów konkurencyjnych oraz obniżenia spożycia. Dzisiaj, prawie 80% piwa produkowanego na świecie zawiera dodatki. Niestety, wadą stosowania dodatków jest idąca za tym presja cenowa na rynku. Browary starają się zastąpić droższy sód jęczmienny innymi tańszymi surowcami. Zazwyczaj obejmują one niesłodowane zboża inne niż jęczmień. W Europie udział tego rodzaju niesłodowanych dodatków w produkcji piwa sięga nawet 30% (Annemüller i Manger, 2013).

Najczęściej, stosowanym dodatkiem niesłodowanym jest zboże lub pseudo-zboże, które jest popularne w konkretnym regionie lub kraju czy nawet kontynencie. Niesłodowany jęczmień i kukurydza są stosowane jako dodatek do piwa w Europie i Ameryce. Z kolei ryż i sorgo są wykorzystywane odpowiednio w Azji i Afryce (Zhu i in., 2015). Nawet niewielka ilość dodatku potrafi zmienić smak i aromat piwa (Pidcocke i in., 2009).

Należy dodać, iż piwo z reguły jest napojem wysoko opodatkowanym. Często, różne podatki nakładane na produkt przekraczają nawet koszt jego wytworzenia. Stosowanie niesłodowanych surowców może obniżyć poziom opodatkowania, ponieważ w niektórych krajach stawki podatkowe są oparte na ilości siodu obecnego w zasypie (Goode i Arendt, 2006).

Dodatki do zacieru mogą przybierać różne formy. Są to najczęściej ziarna poddane rozdrabnianiu w różnym stopniu rozdrobnienia. Mogą być zastosowane także płatki surowe lub poddane obróbce termicznej oraz mikronizowane lub prażone pełne ziarna (Meussdoerffer i Zarnkow, 2009). Niesłodowane dodatki czasami stwarzają problemy produkcyjne. Najczęściej jest to związane ze skrobią, zawartą w tych surowcach. Kleikuje ona w temperaturach wyższych niż temperatury optymalne dla aktywności enzymów amylolytycznych. Problem ten jest szczególnie często obserwowany w przypadku stosowania w browarze techniki zacierania infuzyjnego (Glatthar i in., 2005; Meussdoerffer i Zarnkow, 2009).

Dodatek ryżu nadaje piwu neutralny, wytrawny, lekki i czysty smak. Zastąpienie siodu dodatkami sprawia, że piwo jest lżejsze, co w większości przypadków jest korzystne (Pliansrithong i in., 2013). Pełniejszy profil smakowy piwa uzyskuje się poprzez dodatek rozdrobnionej lub płatkowanej kukurydzy (Meussdoerffer i Zarnkow, 2009; Annemüller i Manger, 2013).

Udział dodatków niesłodowanych do siodu jęczmiennego zależy od wielu czynników, m.in. sposobu obróbki wstępnej, zastosowania preparatów enzymatycznych, jakości siodu

i stosowanych w browarze metod zacierania (Annemüller i Manger, 2013; Cooper i in., 2016). Stosowanie dodatków ma jeszcze jedną zaletę. Siarczek dimetylu (DMS) w dużych stężeniach nadaje piwu smak gotowanej kukurydzy. Głównym prekursorem DMS jest głównie S-metylometionina (SMM), która pochodzi ze słodu. Dlatego też mniejszy udział słodu w zasypie może zmniejszać zawartość DMS w brzeczce.

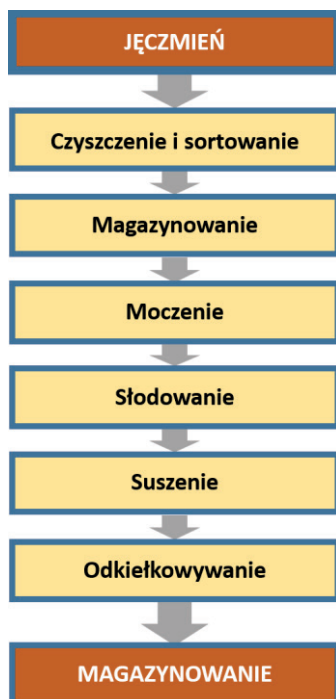
Celem niniejszego opracowania jest szeroka analiza dostępnej literatury na temat słodownictwa i browarnictwa, a także wyszczególnienie i wyjaśnienie czytelnikom najbardziej kluczowych procesów w tej dziedzinie przemysłu spożywczego z uwzględnieniem postępu technologicznego sektorów rolnego oraz spożywczego.

2. PRODUKCJA SŁODU

2.1. Ogólny opis technologii słodu

Proces słodowania ma za zadanie pobudzenie zarodków wewnątrz ziarna, co ma prowadzić do syntezy enzymów celulolitycznych, rozkładających ściany komórkowe (Szwed i in., 2009; Lacny i Janczar-Smuga, 2013). W praktyce, proces ten obejmuje etap moczenia, kontrolowanego kiełkowania i suszenia ziarna zbóż (Briggs, 1998). Można zamiennie stosować pojęcia słodowania oraz kiełkowania, lecz to pierwsze jest najbardziej odpowiednie i najczęściej używane w branży słodowniczej i w browarnictwie.

Należy tutaj podkreślić fakt, że prawidłowe przeprowadzenie procesu słodowania nie wymaga precyzyjnego specjalistycznego sprzętu, czego dowodem są źródła wspominające o stosowaniu tych procesów nawet 5500 lat temu (Michel i in., 1992). Kiełkowanie ziarna jest procesem możliwym do zrealizowania w warunkach domowych. Z kolei poza przemysłem browarniczym, proces kiełkowania możemy spotkać również w branży paszowej, w żywieniu zwierząt gospodarskich, np. koni sportowych (Sasimowski i in., 1982). Słodowanie jest równie ważne w przemyśle gorzelnicznym, np. przy produkcji whisky (Bathgate, 2016). Na rysunku 1 zaprezentowano schemat blokowy procesu produkcji słodu.



Rys. 1. Schemat blokowy technologii produkcji słodu jasnego (opracowanie własne)

Tradycyjnym i podstawowym surowcem w produkcji browarniczej, ale również słodownictwie ogółem, jest jęczmień (*Hordeum L.*) (Bamforth i in., 1993). W literaturze wspomina się o trzech podstawowych zmiennych, od których zależy efektywność i skuteczność wytwarzania słodu. Są to: odmiana jęczmienia wybrana do produkcji, jakość ziarna (zależy od czynników środowiskowych) oraz warunki panujące w procesie produkcyjnym (Yousif i Evans, 2019).

Od momentu rozpoczęcia słodowania utrzymuje się stałą temperaturę otoczenia (pomiędzy 12, a 19°C). Warunki termiczne należy dobierać adekwatnie do odmiany jęczmienia, a także pożądanego efektu końcowego, tj. właściwości słodu suchego, brzezki i rodzaju piwa. Poza etapem moczenia, należy zapewnić wilgotność względną powietrza na poziomie nawet 100% (Farzaneh i in., 2017). Nie mniej ważnym etapem jest suszenie słodu zielonego. W praktyce, to proces suszenia ostatecznie decyduje o rodzaju wyprodukowanego słodu suchego (Kunze, 1996).

Wprowadzenie do składu zacieru innych gatunków czy rodzajów ziarna lub warzenie piwa w całości ze sładów innych niż jęczmienny (m.in. słady pseudozbożowe) jest jednym z nurtów innowacyjnych w przemyśle słodowniczo-browarniczym. Tego typu zmiany technologii mogą być związane z warunkami ekonomicznymi (koszt słodu jęczmiennego), ale też z preferencjami i oczekiwaniami konsumentów, a szczególnie – smakoszy piwa.

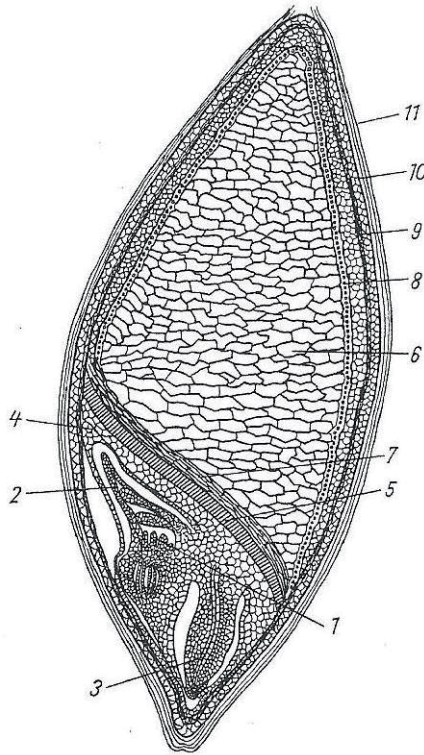
2.2. Surowce słodownicze

2.2.1 Jęczmień

Jęczmień (*Hordeum vulgare*) jest powszechnym i popularnym zbożem w branży słodowniczej oraz browarniczej. W przeszłości jęczmień był ważnym źródłem żywności dla ludzi w większości części świata, w tym na Bliskim Wschodzie, na kontynencie afrykańskim oraz w północnej i wschodniej Europie (głównie w Iranie, Etiopii, Finlandii, Niemczech, Danii, Rosji i Polsce), a także w krajach Azjatyckich (Japonii, Indiach, Tybecie i Korei) (Chatterjee i Abrol, 1977; Newman i Newman, 2006). Na rysunku 2 przedstawiono budowę ziarna jęczmienia.

Ziarno jęczmienia składa się z zarodka, bielma i łuski, a każde z nich pełni różne funkcje (Holopainen-Mantila, 2015). Zarodek jest najważniejszą żywą tkanką inicjującą kiełkowanie ziarna po wchłonięciu wody. Bielmo jest martwym organem spichrzowym składającym się głównie ze skrobi, białka i nieskrobiowych polisacharydów. W obrębie bielma, granulki skrobi osadzone są w matrycy białkowej (Fox, 2009). Podczas kiełkowania endogenne enzymy hydrolityczne skrobi są wytwarzane i/lub aktywowane w warstwach komórek aleuronowych i scutellum i migrują do bielma, powodując częściową hydrolizę/modyfikację granulek skrobi. Ogólnie rzecz biorąc, całe ziarno jęczmienia składa się z 51-77% skrobi, 10-17% białka, 4-9% β -glukanu, 2-3% wolnych lipidów i 1,5-2,5% minerałów (Gupta i in., 2010). Ziarno jęczmienia jest źródłem rozpuszczalnego i nierozpuszczalnego błonnika pokarmowego oraz innych bioaktywnych składników, takich jak witamina E, witamin z grupy B, minerałów i związków fenolowych. β -Glukany (izomer 1,3/1,4) są głównymi składnikami błonnika jęczmienia i są związane z obniżaniem poziomu cholesterolu w osoczu, poprawą metabolizmu lipidów oraz zmniejszeniem indeksu glikemicznego (Behall i in., 2004). Już od

dawna, w krajach Europy jęczmień cały, płatkowany lub mielony, jest stosowany w produkcji żywności funkcjonalnej, tj. płatki śniadaniowe, zupy, owsianki, a także w mieszankach mąki piekarniczej i żywności dla niemowląt. W krajach Bliskiego Wschodu i Afryki Północnej jęczmień jest najczęściej stosowany w produkcji zup, chleba i owsianek (Bhatty, 1993).



Rys. 2. Ziarno jęczmienia (przekrój podłużny (Kunze 1996)); 1 – zarodek właściwy, 2 – stożek wzrostu kielka liściowego, 3 – stożek wzrostu kielków korzonkowych, 4 – tarczka zarodkowa, 5 – warstwa nabłonka palisadowego, 6 – bielmo, 7 – puste komórki bielma, 8 – warstwa aleuronowa, 9 – okrywa nasienna, 10 – okrywa owocowa, 11 – plewy

Oprócz szerokiego zastosowania w paszach dla zwierząt i żywności dla ludzi (Baik i Ullrich, 2008), jęczmień jest również najważniejszym surowcem w słodownictwie i browarnictwie (Gupta i in., 2010).

Zainteresowanie jęczmieniem jako zbożem spożywczym jest duże również z powodu rosnącej świadomości konsumentów w obszarze zdrowego odżywiania (Izydorczyk i Dexter,

2008). W tym przypadku słodownictwo jest ważną branżą, ze względu na fakt, że w produkcji siodu dochodzi do modyfikacji składników bielma, prowadzącymi do zwiększenia zawartości związków bioaktywnych (Madhujith i Shahidi, 2007).

Na przestrzeni lat 2008-2023 światowa produkcja jęczmienia wahała się nieznacznie. Najniższy próg odnotowano w latach 2010/2011, kiedy produkcja wyniosła 122,7 mln ton, z kolei, najwyższa była w latach 2020/2021, na poziomie 161,45 mln ton (Shahbandeh, 2024). Największy udział w światowej produkcji jęczmienia przypada na Unię Europejską i kształtuje się na poziomie 34% (47,7 mln ton). Drugie miejsce zajmuje Rosja – 14% (20,5 mln ton), a trzecie – Australia – 8% (10,8 mln ton). Poza tymi krajami w pierwszej dziesiątce producentów są Kanada, Turcja, Wielka Brytania, Ukraina, Argentyna, USA i Iran (Foreign Agricultural Service, 2024).

W 2022 r. największymi eksporterami jęczmienia były: Australia (2,37 mld USD), Francja (1,84 mld USD), Argentyna (1,21 mld USD), Niemcy (964 mln USD) i Kanada (806 mln USD). W 2022 r. największymi importerami jęczmienia były Chiny (1,69 mld USD), Arabia Saudyjska (1,3 mld USD), Holandia (689 mln USD), Belgia (552 mln USD) i Niemcy (478 mln USD) (Cotterlaz, 2024).

Ziarno jęczmienia przeznaczone na siod powinno charakteryzować się wysoką zdolnością pobierania wody i małą wrażliwością na wodę, niską zawartością białka i wysoką energią kiełkowania. W chwili osiągnięcia dojrzałości późniwej powinno charakteryzować się dobrą zdolnością wytwarzania enzymów, łatwością osiągnięcia dobrego rozluźnienia i wysoką wydajnością ekstraktu w siodzie (Kunze, 1996, Briggs, 1998).

Najważniejszym składnikiem jęczmienia z punktu widzenia browarnictwa jest polisacharyd-skrobia. Jest ona zbudowana z dwóch substancji będących wielocukrami: amylozy i amylopektyny. Amyloza wypełnia wnętrze ziaren skrobi, rozpuszcza się w gorącej wodzie (ok. 65°C) i nie tworzy kleiku, a amylopektyna stanowi od 75 do 80% skrobi jęczmienia, jest nierozpuszczalna w wodzie, a na gorąco tworzy w wodzie kleik. Istotną rolę w produkcji piwa pełnią też hemicelulozy, a szczególnie β -glukany. Są to długie łańcuchy cząsteczek glukozy. Znaczenie mają też białka, a szczególnie produkty rozkładu białek, które rozpuszczają się w wodzie i nie wytrącają się podczas warzenia piwa. Związki azotowe w ziarnie to prawie wyłącznie produkty rozkładu białek (Kunze, 1996).

Tłuszcze w jęczmieniu mają duże znaczenie, gdyż mogą wpłynąć na pogorszenie smaku piwa. Spośród związków mineralnych, najważniejsze z nich to fosforany, krzemiany i sole potasowe. Enzymy jęczmienia mają działanie katalityczne i są niezbędne, aby przeprowadzić w stan rozpuszczalny substancje zapasowe bielma. Najważniejsze z nich to enzymy amylolityczne: α i β amylaza oraz enzymy proteolityczne (Briggs, 1998).

2.2.2. Inne surowce w siodownictwie

Samo stosowanie innych niż jęczmień gatunków ziarna może się wydawać innowacyjnym podejściem w przemyśle browarniczym. Niemniej, analizując literaturę napotyamy dowody wskazujące na to, że często w różnych częściach świata stosowanie dodatków do siodu jęczmiennego jest powszechną praktyką lub tradycją. Aczkolwiek w tej sytuacji warto się przyjrzeć takim praktykom i rozważyć przeniesienie niektórych takich przykładów do produkcji lokalnej. Ponadto w obecnych czasach takie przeanalizowanie podejścia do przemysłu siodowniczego i browarniczego może się wpisywać w koncepcję produkcji regionalnej.

Owies

Owies (*Avena sativa* L.) znajduje zastosowanie w browarnictwie przede wszystkim jako dodatek, czyli surowiec niesłodowany. Stosowanie tego zboża jest opisywane w starszych źródłach, kiedy już był sporadycznie stosowany w branży browarniczej w Europie (Briggs i in., 1981; Little, 1994; Larsson i in., 1995; Peterson, 1998; Wilhelmson i in., 2001). Obecnie, dodatek owsa jest stosowany przy produkcji piwa typu Stout.

Peterson (1998) zaleca utrzymanie parametrów w procesie kiełkowania owsa na następującym poziomie: moczenie w trakcie 16 godzin w 16°C, słodowanie (kiełkowanie) przez 144 godziny w 16°C i suszenie przez 22 godziny zaczynając od temperatury 49°C i kończąc na 89°C.

Owies charakteryzuje się bardzo korzystnym stosunkiem kwasów tłuszczowych oraz zawiera duże ilości błonnika pokarmowego (Peterson, 2001). Badania własne również potwierdzają podatność tego surowca do hydrolizy enzymatycznej za pomocą endogennych enzymów słodu jęczmiennego. Proces ten skutecznie przebiega przy udziale procentowym owsa w zacierze nawet do 50% (Domin i in., 2023).

W wielu przypadkach, dodatek owsa do mieszanki słodu może powodować wzrost pH brzeczki piwnej, o czym donoszą liczne źródła literaturowe (Schnitzenbaumer i in., 2012; Schnitzenbaumer i Arendt, 2013; Schnitzenbaumer i Arendt, 2014; Kordialik-Bogacka i in., 2014).

Dodatek tego zboża nadaje piwu delikatny i przyjemny smak, co przyciąga uwagę konsumentów i smakoszy tego produktu. Niemniej, możliwym ograniczeniem w stosowaniu owsa w browarnictwie jest ryzyko znacznego zmętnienia brzeczki i piwa oraz wzrost ich lepkości. Poza tym, stosowanie znacznych ilości owsa w mieszance słodu (ponad 20-40%) wymaga jednocześnie zastosowania enzymów egzogennych w celu zapewnienia skutecznego procesu zacierania i fermentacji (Schnitzenbaumer i Arendt, 2014; Kordialik-Bogacka i in., 2014). Podobne tendencje w zmianach parametrów jakościowych zarówno brzeczki jak i piwa odnotowano w przypadku stosowania zarówno licznych odmian owsa nagiego tak i łuskanego (do 20-40% w mieszance słodu) (Schnitzenbaumer i Arendt, 2013).

Sorgo

Potencjał sorgo (*Sorghum bicolor*), jako zamiennika jęczmienia, odkryto w Afryce jeszcze pod koniec XX wieku. Związane to było przede wszystkim z ciężkimi warunkami uprawy, które dyskwalifikowały jęczmień (Igyor i in., 2001). Sorgo, zarówno surowe, jak i słodowane było popularne w browarnictwie w krajach tropikalnych, które potrzebowały zastąpienia kosztownego słodu jęczmiennego innymi surowcami (Aisen i Muts, 1987; Okolo i Ezeogu, 1996). Wówczas, wielu autorów podjęło się prowadzenia różnych eksperymentów, na drodze których powstały także zalecenia parametrów technologicznych w produkcji słodu z sorgo. Moczenie należy prowadzić przez 8 godzin w temperaturze 20-25°C. Następnie, na 2 godziny ziarno należy rozłożyć na płaskiej powierzchni i zostawić na powietrzu. Po czym następuje kolejna faza moczenia trwająca 14 godzin. Kiełkowanie prowadzi się przez 120 godzin w tej samej temperaturze, co i moczenie. Suszenie słodu zielonego przebiega w 50°C przez 24 godziny. Podobnie jak w przypadku stosowania owsa, sorgo może przyczynić się do wzrostu pH brzeczki piwnej. Można też się spodziewać znacznych utrudnień procesu filtracji brzeczki, zmętnienia i wzrostu lepkości zarówno brzeczki, jak i piwa (Agu i Palmer, 1997; Agu i Palmer, 1999; Obeta i in., 2000; Okungbowa i in., 2002).

Ryż

Ziarno ryżu (*Oryza L.*) jest typowym surowcem dla krajów azjatyckich, m.in., Japonii czy Chin. Szeroko jest znany tradycyjny japoński trunk, zwany sake. Niemniej, w branży browarniczej również zainteresowano się ryżem jako dodatkiem niesłodowanym do mieszanki słodu przed zacieraniem. Jako jedną z przyczyn tego faktu, należy wymienić również koszt stosowania ryżu, który był i jest znacznie tańszy od jęczmienia browarnego i słodu jęczmiennego (Coors, 1976; Yoshizawa i Kishi, 1985). Pierwsze doniesienia naukowców wskazały na przydatność stosowania ryżu do produkcji piw typu lager (Okafor i Iwouno, 1990; Aniche i Palmer, 1992).

Moczenie prowadzi się przez 48-60 godzin w 15°C. Następnie ziarno kiełkuje w ciągu 72 godzin w 18-19°C. Suszenie trwa 48 godzin, a temperatura stopniowo wzrasta od 32,2 do 65,5°C. Niemniej, początkowo badacze wskazywali głównie na negatywne skutki stosowania ryżu w browarnictwie (trudności w zacieraniu, gorzki smak). Mogło to być związane z niedopracowaniem metod moczenia i słodowania ziarna ryżu. Obecnie, potwierdza się przydatność stosowania ryżu jako surowca lub dodatku w produkcji piwa. Może wzrastać zawartość kwasu wanilinowego i monomerycznych antocyjanów w brzeczce. Możliwa jest też poprawa aktywności przeciwutleniającej piwa (Gonu i Withayagiat, 2021; Gonu i Withayagiat, 2022).

Kukurydza

Kukurydza (*Zea mays*) była tradycyjnym surowcem w browarnictwie m.in. u Indian w Meksyku. Obecnie jest też często wykorzystywana do tych celów na kontynencie afrykańskim (Lanares, 1992; Shephard i in., 2005). Znaczącym utrudnieniem w łańcuchu produkcyjnym słodu zielonego jest konieczność stosowania wysokich temperatur do kiełkowania ziarna kukurydzy. Wówczas znacząco wzrasta ryzyko rozwoju pleśni i grzybów. Niemniej, liczne współczesne doniesienia naukowe wskazują na perspektywiczność stosowania ziarna kukurydzy jako dodatku w mieszance ze słodem jęczmiennym, ze względu na jego znacznie wyższą aktywność enzymatyczną (Romero-Medina i in., 2020; Blšáková i in., 2021; Flores-Calderón i in., 2022).

Ciekawą metodą jest również stosowanie chlebow, m.in. kukurydzianego w procesie warzenia piwa. Takie piwa charakteryzują się niższą intensywnością smakową, wykazują niskie wartości pod względem barwy, zmętnienia, zawartości alkoholu i ekstraktu oraz całkowitej zawartości polifenoli. Można stwierdzić, iż piwo z chleba kukurydzianego jest lżejsze i słabsze (Martin-Lobera i in., 2022). Poza tym, kukurydza jest jednym z najbardziej perspektywicznych surowców do produkcji tzw. piw bezglutenowych (Cadenas i in., 2021).

Gryka

Ziarno gryki (*Fagopyrum esculentum*) stanowi bogate źródło białka. Jego wartość odżywcza jest wyższa w porównaniu do prosa, ryżu czy pszenicy (Harasym, 2009).

Doniesienia z początku XXI wieku wykazują znaczne zróżnicowanie w zaleceniach co do parametrów technologicznych słodowania ziarna gryki. Zalecany czas moczenia waha się od 10 do 96 godzin, wilgotność względna powietrza osiąga od 35 do 47%, a czas kiełkowania wynosi 96 lub 120 godzin w 15 czy 19°C (Wijngaard i in., 2005; Zarnkow i in., 2005; Nic Phiarais i in., 2006; Wijngaard i Arendt, 2006). Niemniej, jednoznacznie jest potwierdzone, iż wydłużenie czasu suszenia nawet w 40°C prowadzi do znacznej inaktywacji enzymów (Nic Phiarais i in., 2005). Nic Phiarais i in. (2006) proponują zastosowanie wieloetapowego

procesu suszenia. Wyodrębnili oni trzy etapy, gdzie sład zielony suszono początkowo przez 5 godzin w 40°C, następnie przez 3 godziny w 50°C i finalnie, w ciągu 3 godzin w 60°C.

Brasil i in. (2020) zastosowali dodatek 45% ziarna gryki w mieszance ze słodem tradycyjnym. Udowodniono, że użycie sładu gryczanego podniosło zawartość białka w brzezce o ponad 89%, przy czym 4-krotnie zmniejszyła się zawartość glutenu. Autorzy podkreślają, iż ziarno gryki jest przydatnym surowcem w produkcji piwa pilzneńskiego.

Według Ciocan i in. (2023), piwo wyprodukowane z mieszanki lub ze sładu gryczanego oceniane jest na poziomie akceptowalnym w analizie organoleptycznej (aromat, barwa, goryczka). Jednocześnie autorzy podkreślają potrzebę stosowania enzymów w celu usprawnienia procesu zacierania brzezki, szczególnie w przypadku, gdy 100% zacieru stanowi sład z ziarna gryki.

Co ważne, kontynuowane są badania mające na celu optymalizację procesu słodowania ziarna gryki. Dabija i in. (2021) podają, że odpowiednie parametry jakościowe sładu i brzezki uzyskano w trakcie stosowania następujących parametrów słodowania: 1 godzina moczenia w wodzie w 20°C, następnie dodanie roztworu NaOH 0,3% i płukanie wodą, po czym – 1 godzina relaksacji ziarna, a następnie kolejne 19 godzin moczenia w wodzie. Po czym ziarno należy kielkować w ciągu 5 dni. Suszenie należy przeprowadzić dwuetapowo, początkowo przez 5 godzin w 40°C, a następnie przez 19 godzin w 50°C.

Podobnie jak kukurydza, gryka również jest wartościowym bezglutenowym zamiennikiem sładów stosowanych powszechnie (Brasil i in., 2020; Dabija i in., 2022; Salamon i in., 2023).

2.3. Czyszczenie ziarna

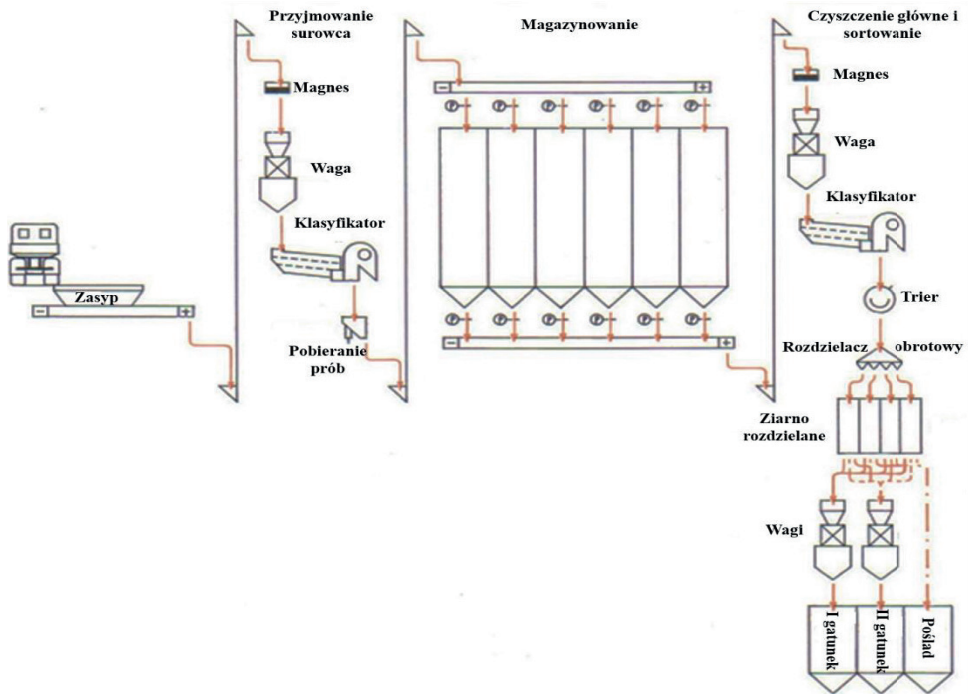
Ziarno jeszcze przed dostarczeniem do słodowni najczęściej jest już wstępnie poddane procesowi czyszczenia i jest magazynowane przez około 3 miesiące, aby uzyskać wymaganą zdolność kielkowania. Oczyszczanie ziarna w słodowni przebiega według schematu przedstawionego na rysunku 3.

W słodowni czyszczenie ostatecznie przygotowuje ziarno do kontaktu z wodą i do słodowania. Czyszczenie ziarna ma następujące zadania:

- usunąć domieszki oraz zanieczyszczenia (np. nasiona chwastów, części roślin, kawałki gleby, piasek, kamienie),
- sortowanie ziarna (ziarno zostaje wyrównane pod względem wielkości).

Również proces czyszczenia można rozdzielić na poszczególne etapy, na których stopniowo dochodzi do usuwania zanieczyszczeń różnego charakteru i pochodzenia. Mianowicie, są to etapy:

- usuwanie dużych zanieczyszczeń,
- usuwanie obcych ziaren,
- oddzielenie zanieczyszczeń w postaci kawałków lub części metalu,
- odplewianie ziarna,
- usuwanie piasku, drobnych frakcji gleby,
- usuwanie nasion chwastów o kształcie okrągłym,
- sortowanie ziarna względem jego grubości,
- ważenie partii ziarna.

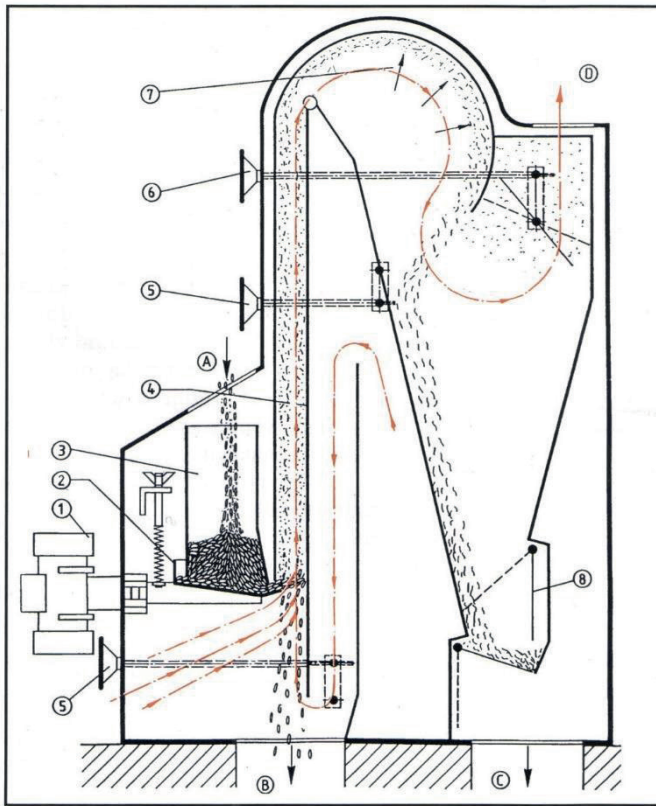


Rys. 3. Urządzenia do czyszczenia i sortowania ziarna (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996)

Na przestrzeni lat powstało wiele urządzeń służących usuwaniu zanieczyszczeń z partii ziarna. Są to między innymi aspiratory, przesiewacze, wialnie, tryjery, czy sortowniki sitowe i bębnowe.

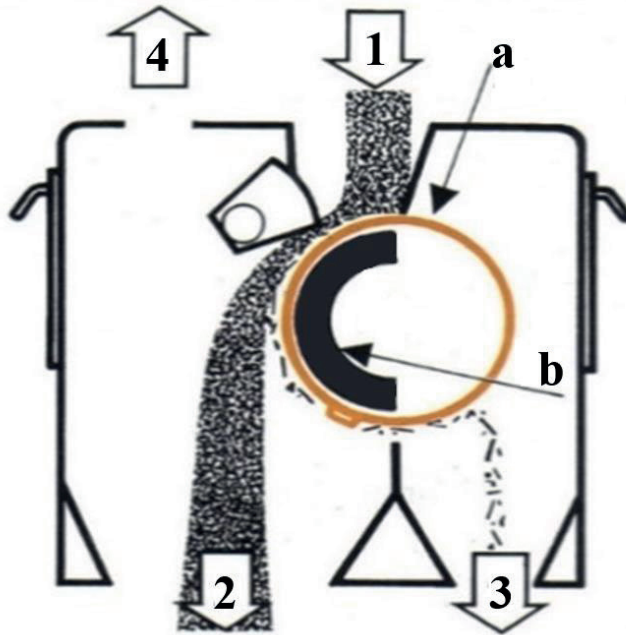
Proces z reguły zaczyna się od usunięcia zanieczyszczeń grubych, w tym części drewna, materiałów sztucznych, a także piasku i pyłu. Następnie ma miejsce proces aspiracji, gdzie wraz z wysysaniem powietrza dochodzi do usunięcia kurzu i innych lekkich zanieczyszczeń. Wciąż produkowanym typem urządzenia jest wialnia aspiracyjna „Classifier”. Jest ona wyposażona w dwa sита o różnych grubościach oczka, gdzie są usuwane różne frakcje zanieczyszczeń. Po przejściu przez sита, ziarno spadając strumieniem trafia do kanału, w którym jest zasysane powietrze (Kunze, 1996).

Ważnym zagadnieniem jest dotrzymanie czystości urządzeń i pomieszczeń roboczych. Często dobrym rozwiązaniem jest stosowanie urządzeń (wialni) o zamkniętym obiegu powietrza (rysunek 4). W takim urządzeniu powietrze cyklicznie jest zawracane kanałami, a zanieczyszczenia opadają na dno komory, skąd są następnie usuwane (Briggs, 1998).



Rys. 4. Wialnia o zamkniętym obiegu powietrza (Kunze, 1996): 1 – silnik z mimośrodowym obciążeniem, 2 – dno zasobnika z regulacją położenia, 3 – skrzynia zasobnika, 4 – przesuwalna ściana kanału powietrznego, 5 – urządzenie do przesuwania ścian kanału powietrznego, 6 – urządzenie do regulowania przepływu powietrza, 7 – komora rozprężania i spowalniania przepływu powietrza, 8 – urządzenie samowyladowcze; A – wlot jęczmienia, B – wylot oczyszczonego jęczmienia, C – wylot grubych zanieczyszczeń, D – odpływ powietrza z lekkimi zanieczyszczeniami

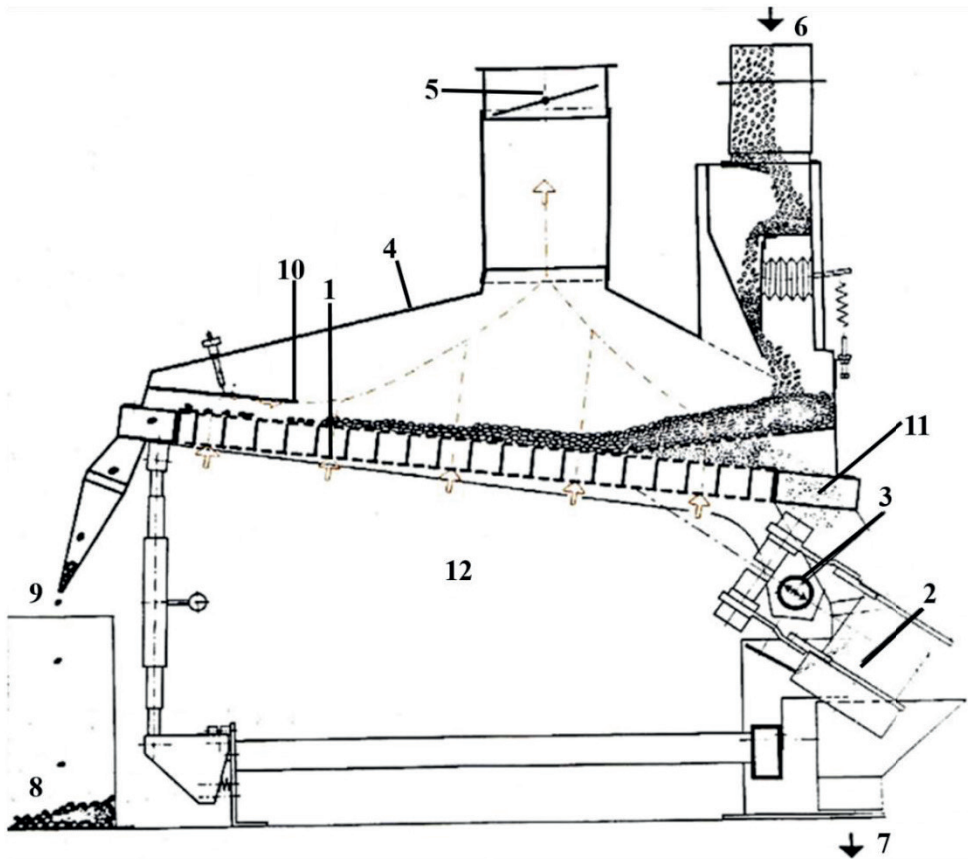
Części i kawałki metalu nie wpływają na przebieg procesu słodowania ziarna. Niemniej, stanowią one zagrożenie dla urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym, m.in. dla rozdrabniaczy i śrutowników. W celu ich usunięcia, stosowane są separatory magnetyczne. Mogą to być urządzenia o bardzo prostej konstrukcji, gdzie magnes jest zamontowany do płaskiej powierzchni pochylonej w taki sposób, by ziarno zsypanyło się po nim. Niestety, takie urządzenie musi być stale monitorowane, a kawałki metalu usuwane z powierzchni, pod którą znajduje się magnes. Z kolei w pełni automatyczne są bębnowe oddzielacze magnetyczne. Przykład takiego separatora zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 5. Bębnowy oddzielnik magnetyczny (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996):
 1 – wlot jęczmienia, 2 – wylot jęczmienia, 3 – części żelazne, 4 – połączenie z układem odkurzającym, a – obracający się bęben, b – magnes

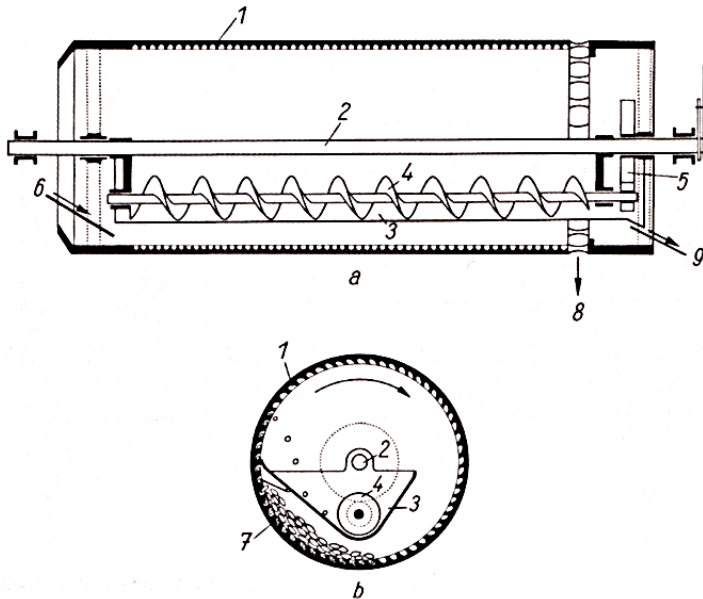
Podobnie jak w sytuacji z zanieczyszczeniami kawałkami metalu, kamienie również nie stanowią zagrożenia dla surowca, tj. słodu. Niemniej, ich usunięcie będzie chroniło maszyny wykorzystywane w dalszych procesach produkcji. Najczęściej odkamieniacz wykorzystuje siłę drgań oraz nadmuch powietrzaw celu odseparowania ziarna od kamieni. Kamienie będąc cięższe od ziarna są transportowane na taśmie dalej, gdzie ostatecznie trafiają do zbiornika. Przykład odkamieniacza zaprezentowano na rysunku 6.

Partia ziarna zawsze zawiera zanieczyszczenia w postaci nasion chwastów, ale też uszkodzonych ziaren. Te ostatnie również przyczyniają się znacząco do obniżenia jakości słodu, gdyż nie zachodzą w nich procesy życiowe, słodowanie nie przebiega właściwie. Wówczas dochodzić może do gnicia, czy pleśnienia na różnych etapach produkcji. Natomiast, tego typu domieszki nie podlegają usunięciu przez wyżej opisane maszyny. Dzieje się tak, gdyż charakteryzują się one często masą i kształtem zbliżonymi do pełnowartościowych ziaren stosowanych w produkcji.



Rys. 6. Odkamieniacz (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996): 1 – pochyła płaszczyzna robocza, 2 – napęd (silnik), 3 – kierunek działania silnika, 4 – pokrywa maszyny, 5 – przewód zasysający powietrze z dławikiem motylkowym do regulacji, 6 – wlot jęczmienia, 7 – wylot jęczmienia, 8 – kamienie, 9 – wylot kamieni, 10 – koniec strefy oddzielania, 11 – jęczmień, 12 – dopływ powietrza

Przykładem separatora do usuwania zanieczyszczeń w postaci chwastów lub uszkodzonych ziaren jest sortownik gniazdkowy (tryjer), przedstawiony na rysunku 7. Jest to obracający się bęben, w którym pełnowartościowe ziarna zostają na dnie, gdyż nie mieszczą się w gniazdkach, natomiast zanieczyszczenia są przenoszone wyżej, gdzie zsypują się do zbiornika. Dosyć często, wykorzystuje się dodatkowe cylindry tryjera, które są ustawiane za cylindrem głównym. Dzięki temu, zwiększa się efektywność oczyszczania (Kunze, 1996).



Rys. 7. Sortownik gniazdkowy (Kunze, 1996): a – przekrój podłużny, b – przekrój poprzeczny
 1 – płaszcz cylindra roboczego, 2 – oś główna, 3 – koryto odbierające powłoki ziarna,
 4 – przenośnik ślimakowy, 5 – napęd przenośnika, 6 – wlot jęczmienia, 7 – przekrój warstwy jęczmienia, 8 – wylot jęczmienia, 9 – wylot połówek ziarna oraz ziaren kulistych

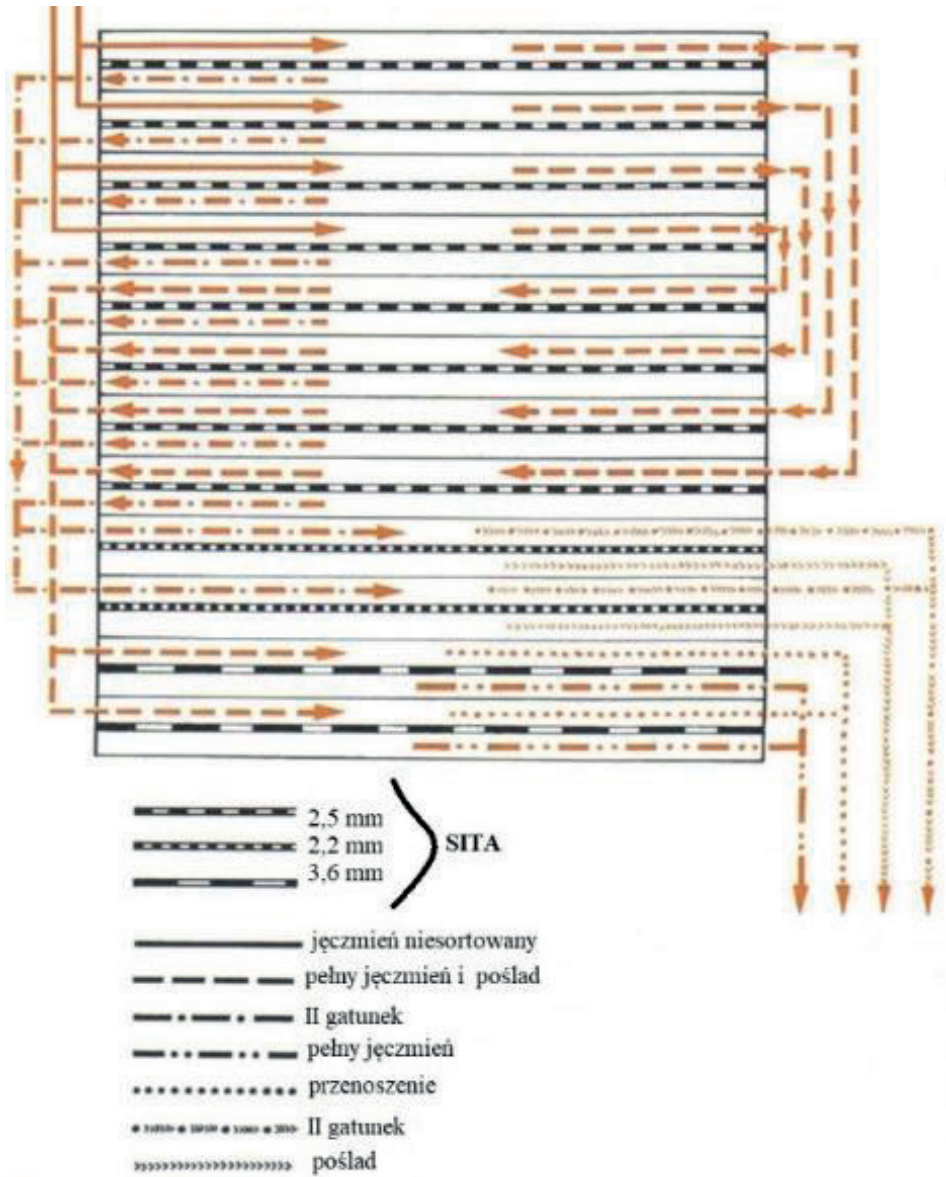
Sortowanie ziarna jest kolejnym etapem przygotowania przed słodowaniem. Choć należy wspomnieć, iż obecnie, słodownie często rezygnują z prowadzenia dodatkowego sortowania ziarna. Niemniej, ten proces aplikowany jest w celu wyrównania wielkości ziarna w partii. Jest to ważne na wczesnym etapie moczenia surowca, gdyż obserwowane są różnice w pobieraniu wody przez większe i mniejsze ziarna.

Można wydzielić trzy podstawowe frakcje ziarna, mianowicie (Dylkowski, 1978)

- o grubości powyżej 2,5 mm,
- o grubości poniżej 2,5 mm, ale powyżej 2,2 mm,
- o grubości poniżej 2,2 mm – tzw. poślad.

Poślad nie jest poddawany słodowaniu.

Ogółem sortowniki można podzielić na bębnowe oraz płaskie. Bębnowe dodatkowo są wyposażone w wirniki, które zapobiegają zatykaniu się sita oraz gwarantują równomierny kontakt ziarna z sitem. Z kolei, sortownik płaski, przedstawiony na rysunku 8 składa się z ram sitowych ułożonych jedno na drugim. Ziarno jest wprowadzane na sito porcjami, zamiast jednym dużym strumieniem. Cała konstrukcja jest stale ruchoma, zmienia też swój kierunek ruchu i położenie.



Rys. 8. Zasada działania sortownika płaskiego (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996)

2.4. Moczenie ziarna

Głównym zadaniem tego etapu jest pobudzenie procesów życiowych, przemian biochemicznych i strukturalnych wewnątrz ziarna. Woda przenikająca do środka ziarna aktywuje enzymy oraz ich wytwarzanie. W słodownictwie stosuje się moczenie wodno – powietrzne. Ziarno przebywa naprzemiennie pod wodą (faza wodna) i bez wody (faza powietrzna). Zarówno w fazie wodnej jak i w fazie powietrznej ziarno jest intensywnie napowietrzane (Kunze, 1996).

W procesie moczenia ziarna mamy do czynienia ze wzajemnym oddziaływaniem trzech układów:

- ziarna,
- wody,
- otoczenia.

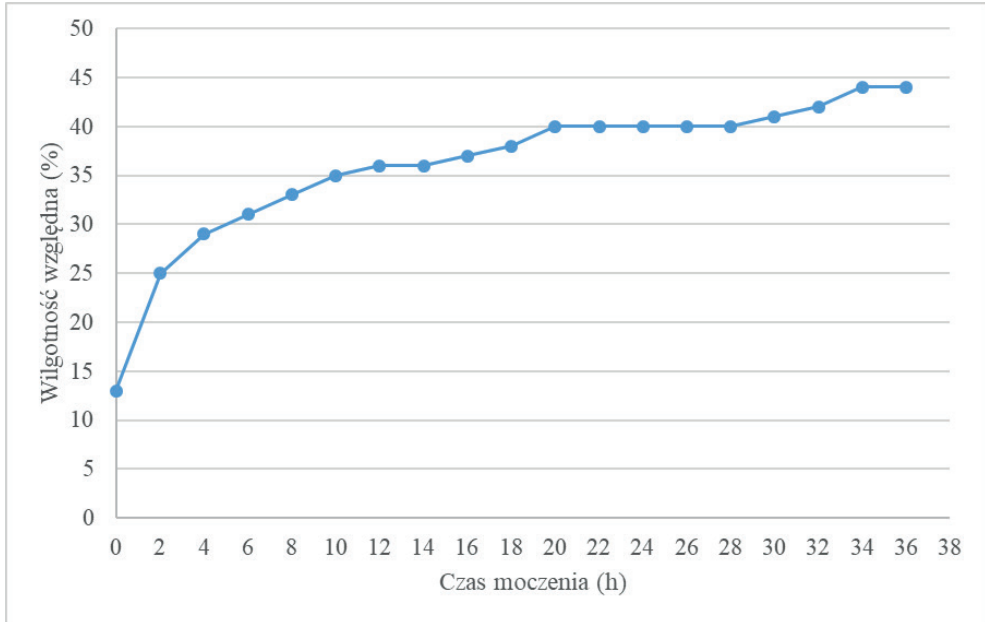
Prędkość wnikania wody do ziarna zależy od wielu czynników. Najważniejsze z nich związane są z ziarnem i jego właściwościami. Wszystkie czynniki wpływające na wzajemne relacje w tym procesie można podzielić na:

- czynniki związane z właściwościami ziarna,
- czynniki związane z wodą,
- czynniki wpływające ze strony otoczenia.

W pierwszej grupie należy wymienić: budowę i stan okrywy ziaren, szereg parametrów fizycznych i chemicznych takich jak wielkość ziaren, czy skład chemiczny oraz warunki termiczne suszenia pozbiorowego. Do drugiej grupy zaliczamy temperaturę wody, właściwości fizykochemiczne wody (głównie pH). W trzeciej grupie znajdują się oddziaływania ultradźwiękowe, obecność tlenu, czy ciśnienie.

W czasie moczenia zmianom ulegają właściwości ziarna, np. obserwowane są w trakcie procesu moczenia zmiany temperatur kleikowania skrobi, co może świadczyć o jej modyfikacji. Temperatura kleikowania skrobi w czasie moczenia zwiększa się, równocześnie zawęża się przedział temperatur w których ten proces zachodzi.

Woda dostaje się przede wszystkim do zarodka, a następnie wypełnia okrywę ziarna. Wchłanianie wody przebiega najszybciej na początku, a wraz z upływem czasu stopniowo maleje. W procesie nawilżania, a szczególnie w początkowym jego etapie najważniejszym zjawiskiem warunkującym dużą początkową szybkość wnikania wody jest hydratacja koloidów ziaren, objawiająca się ich pęcznieniem. Zjawisko to nazywa się imbibicją i charakteryzuje się pojawieniem się dużych ciśnień ssania wody dochodzących do 100 MPa. Potencjał imbibicji ziaren pszenicy wynosi około 400 MPa (Mc Donald i in., 1988). W napęczniałych ziarnach pojawiają się warunki do intensyfikacji procesów życiowych. W procesie nawilżania ważną rolę w pochłanianiu, a ściślej dystrybucji wody zaczyna spełniać osmoza. Ponadto w procesach wymiany wody między ziarnem a otoczeniem uczestniczą siły metaboliczne, których znaczenie jest szczególnie ważne, kiedy w ziarnie zachodzą już procesy życiowe z dużym natężeniem. Siły te znacznie komplikują stosunki wodne ziaren (Grzesiuk i Kulka 1988). Na rysunku 90 zaprezentowano zmiany wilgotności ziarna jęczmienia w czasie moczenia.



Rys. 9. Zmiany wilgotności ziarna jęczmienia w czasie moczenia (opracowanie własne na podstawie Rydzak i in., 2023a, 2023b)

Co ważne, ciepłe otoczenie i ciepła woda przyspieszają proces nawadniania. W pierwszej fazie moczenia wodnego również dochodzi dodatkowo do wypłukania ziarna z ewentualnych zanieczyszczeń, usuwane są zarodniki grzybów i pleśni.

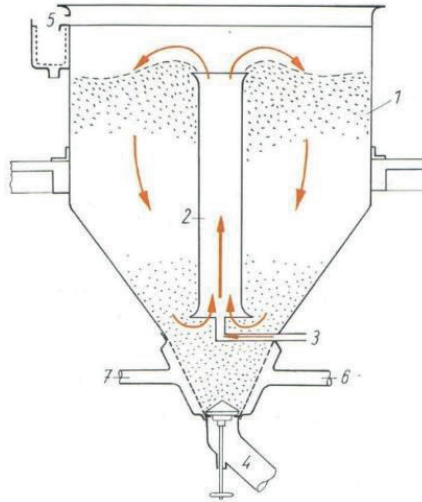
Stopień namoczenia ziarna wyraża ilość pobranej przez ziarno wody. Wieloetapowe moczenie może pozwolić na uzyskanie stopnia namoczenia nawet na poziomie 48%. Dla produkcji sładów jasnych pożądanym stopniem namoczenia jest zakres od 42 do 44%. Z kolei, dla sładów ciemnych, wskaźnik ten wynosi około 44-47%. Dla wielu odmian jęczmienia browarnego wysoki stopień namoczenia jest nawet pożądanym i koniecznym (Dylkowski, 1978).

Co ważne – wraz z aktywacją procesów życiowych, zaczyna się i wzrasta intensywność procesu oddychania ziarna. Dlatego też, ważnym jest dostęp tlenu, którego brak może prowadzić do zamierania zarodka lub zakłócenia procesu kiełkowania. Często słodownie rezygnują ze stosowania długotrwałego kontaktu ziarna z wodą. Natomiast stosowane jest moczenie powietrzne, w trakcie którego materiał jest zraszany wodą.

W słodowniach stosowane są specjalistyczne zamaczalniki. Ciekawym i popularnym sposobem jest namaczanie zgodnie z technologią Wilda. W tym przypadku do wnętrza komory zamaczalnika jest podawany strumień powietrza. Ziarno w zamaczalniku jest wówczas stale mieszane, po wyjściu z urządzenia partia jest równomiernie namoczona i napowietrzona, a jednocześnie dodatkowo umyta.

Powstały także konstrukcje zamaczalników z płaskim dnem, zamaczalników bębnowych, ślimakowych, czy stożkowych. Wszystkie te typy urządzeń mają swoje zalety, ale i wady. Zaletą zamaczalników stożkowych jest duża pojemność (50-60 t), bębnowe są szczególnie

przydatne w pierwszej fazie moczenia. Z kolei, zamaczalniki płaskie wymagają większych powierzchni. Są też one wykorzystywane w obróbce dużych partii ziarna, ale charakteryzują się bardzo wysokim zużyciem wody. Jedną z konstrukcji zamaczalnika, jest zamaczalnik przedstawiony na rysunku 10.



Rys. 10. Zasada działania zamaczalnika Wilda (Kunze, 1996): 1- zbiornik, 2 – centralna rura obiegu ziarna z wodą, 3 – dopływ sprężonego powietrza, 4 – wysyp namoczonego zboża, 5 – sito na szałki, 6 – dopływ świeżej wody, 7 – odpływ zużytej wody

Zamaczalnik Wilda jest zbiornikiem, do którego w dolnej części doprowadzone jest sprężone powietrze. W centralnej części urządzenia znajduje się rura cyrkulacyjna, która zapewnia równomierne napowietrzenie ziarna zarówno w fazie moczenia wodnego, jak i powietrznego.

Ważnym zagadnieniem jest zużycie wody w procesie moczenia oraz możliwie maksymalne jej zaoszczędzenie. Ciekawą praktyką jest powtórne użycie wody, ale wykorzystywanej tylko do pierwszego moczenia nowej partii ziarna. Taka metoda może także pozytywnie wpłynąć na jakość mikrobiologiczną słodu. W tabeli 1 zaprezentowano przykładowy schemat moczenia metodą trzyetapową, po której ziarno jest kierowane do słodowni.

Odpowiednio intensywny proces moczenia może prowadzić do bardzo szybkiego procesu kiełkowania, a oczko kiełkowania może pojawić się jeszcze pod koniec etapu moczenia. Namaczanie jest prowadzone do momentu, aż ziarno nie osiągnie zawartości wody na poziomie ok. 40%. Wówczas ważnym jest utrzymanie dostępu tlenu do ziarna oraz wymiana wody.

Tab. 1. Schemat moczenia ziarna metodą trzyetapową (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996)

Czynność	Czas rozpoczęcia	Czas aplikowania czynności	Stopień nawodnienia
Moczenie wodne z napowietrzaniem	Początek	4 h, co 15 minut	30%
Moczenie suche	Po 4 h	20 h	34%
Moczenie wodne z napowietrzaniem	Po 24 h	3 h, co 15 minut	38%

2.5. Słodowanie

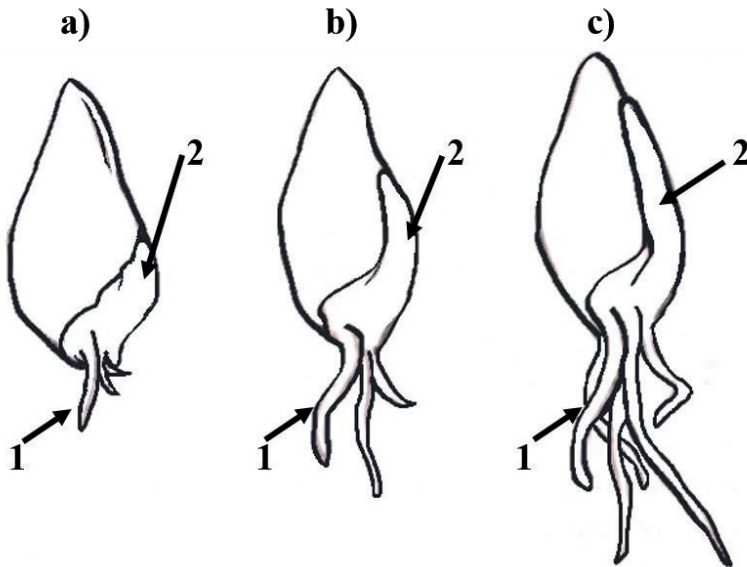
Proces słodowania jest niczym innym, jak kiełkowaniem ziarna. Głównym wynikiem etapu słodowania powinno być wytworzenie enzymów. W trakcie kiełkowania można wydzielić 3 podstawowe procesy:

- wzrost kielków,
- wytworzenie enzymów,
- przemiana materii.

Pierwszym objawem aktywizacji procesów życiowych w ziarnie jest pojawienie się oczka wzrostu kielka korzonkowego. Przebieg procesu słodowania przebiega pomyślnie, jeśli po 2 dniach kiełkowania utworzyły się 2-4 korzonki. Przy produkcji sładów jasnych na końcowym etapie słodowania długość korzonków nie powinna przewyższać długości ziarna bardziej niż 1,5 raza. Z kolei przy sładach ciemnych wartość ta może być nawet dwukrotnie wyższa (Briggs, 1998).

Z kolei, po wzroście kielków korzonkowych dochodzi do rozwoju kielka liścieniowego. Długość kielków liścieniowych świadczy o stopniu rozluźnienia ziarna. Do produkcji sładów jasnych (np. pilzneński), akceptowalna jest długość kielków liścieniowych na poziomie od 2/3 do 3/4 długości ziarna. W produkcji sładów ciemnych, kielek może osiągać długość od 3/4 długości ziarna lub równać jego długości. Przy odpowiednio dobranej temperaturze słodowania, kielek liścieniowy nie wyrasta z ziarna i nie przebija ziarna na jego czubku. Na rysunku 11 przedstawiono fazy wzrostu kielków ziarna jęczmienia (Kunze, 1996).

Z badań własnych wynika, iż w produkcji różnych sładów akceptowalnym jest zakres temperatur od 10 do 18°C. Aczkolwiek, przy temperaturze na poziomie 10°C, ziarno mniej aktywnie pobiera wodę. Poza tym, wytworzenie kielków w takiej temperaturze zajmuje więcej czasu, a w efekcie końcowym ziarno jest słabo rozluźnione. Natomiast utrzymanie temperatury na poziomie 18°C wiąże się z ryzykiem namnożenia drobnoustrojów. Wówczas cała partia ziarna musi być zutylizowana. Jednakże w produkcji przemysłowej stosowanie temperatur powyżej tego progu jest normalną praktyką przy produkcji sładów ciemnych (Rydzak i in., 2023a, 2023b).



Rys. 11. Proces kiełkowania ziarna jęczmienia (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996): a) I dzień, b) III dzień, c) V dzień; 1 – korzonki, 2 – kielek liścieniowy

Co ważne – wraz z biegiem czasu słodowania wzrasta temperatura wewnątrz warstwy ziarna, stąd kluczowa jest ścisła kontrola temperatury. Na przykład, temperatura wewnątrz warstwy ziarna przy kiełkowaniu dla słodu jasnego (np. pilzneńskiego) powinna się utrzymywać w przedziale 17-18°C. Z kolei, dla słodu ciemnego granice te wynoszą od 23 do 25°C (Dylkowski, 1978).

2.5.1. Przemiany w ziarnie

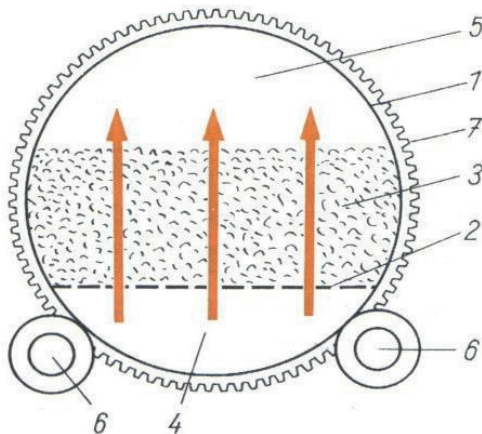
Większość enzymów, które mają kluczowe znaczenie w produkcji brzezki, są zawarte w surowym jęczmieniu jeszcze przed rozpoczęciem procesu słodowania. Mowa tutaj o α i β -amylazie, cytazie, β -glukanazie, proteazach, lipazach i fosfatazach. Za wytworzenie enzymów odpowiada tarczka zarodkowa ziarna, w której zawarte są hormony składające się m.in. z kwasu giberelinowego. Wraz z pobieraną przez ziarno wodą, hormony z tarczki zarodkowej przechodzą do warstwy aleuronowej. W tym miejscu uwalniane są aminokwasy, z udziałem których powstają β -glukanaza, α -amylaza oraz proteazy. Ważnym aspektem powstawania enzymów jest prawidłowy proces oddychania ziarna. Odpowiedni dopływ powietrza gwarantuje wczesne rozpoczęcie wytwarzania enzymów oraz w wyniku końcowym większą objętość enzymów. Poza enzymami odpowiadającymi za rozkład skrobi, w jęczmieniu na 3-4 dzień słodowania powstają również enzymy cytolityczne oraz proteolityczne. W czasie wytwarzania jednych grup enzymów ziarno korzysta z innych, zawartych w jęczmieniu surowym. Jest to związane z procesem przemian biochemicznych, które zapewniają zarodkowi odpowiednie odżywianie. Dochodzi również do rozkładu skrobi i białka oraz rozkładu ścian komórkowych bielma (Kunze, 1996; Briggs, 1998).

Ściana komórkowa bielma ziarna składa się głównie z białka oraz hemicelulozy. Za rozkład ściany komórkowej odpowiada kompleks enzymów cytolitycznych (m.in. enzymy hemicelulaza i β -glukanaza). Wskaźnikiem skutecznego przebiegu procesu słodowania jest wzrastająca kruchość ziarna. W praktyce można to sprawdzić poprzez rozcieranie ziarna w palcach – powinno łatwo dochodzić do jego roztarcia. Mówimy wówczas o kruchości ziarna, która wskazuje na stopień rozluźnienia słołu zielonego (przed wysuszeniem). Do oceny tego parametru stosowane są dwa wskaźniki, tj. liczba Kolbacha informująca o rozluźnieniu białkowym oraz wartość friabilimetryczna (kruchość ziarna). Rozluźnienie białkowe wyrażane jest w procentach i wskazuje na zawartość substancji białkowych, które w trakcie słodowania uległy rozłożeniu do form rozpuszczalnych. Powinno ono zawierać się w zakresie od 38 do 42% (Kunze, 1996).

2.5.2. Urządzenia słodownicze

Historia przemysłu browarniczego zna różne przykłady stosowanych konstrukcji słodowni. Niemniej, warto wspomnieć o tych podstawowych i powszechnie znanych.

Na rysunku 12 przedstawiono słodownię bębnowo - skrzyniową.

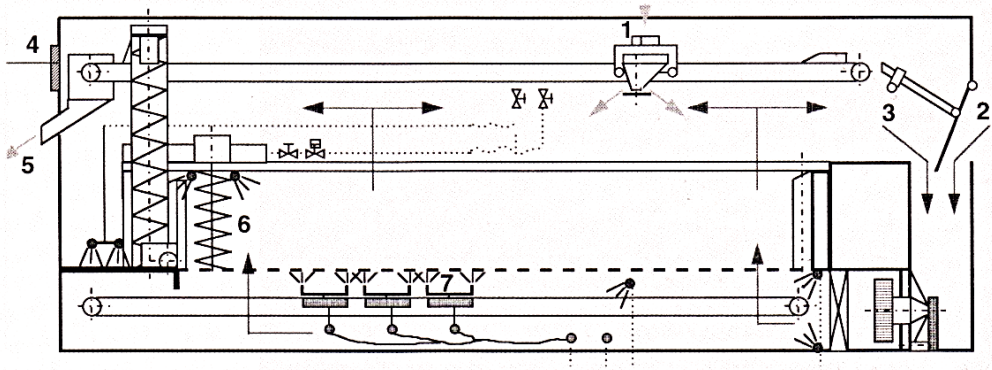


Rys. 12. Słodownia bębnowo – skrzyniowa (Kunze, 1996): 1 – cylinder, 2 – perforowane dno, 3 – słoł, 4 – wilgotne powietrze, 5 – zużyte powietrze, 6 – roleki podtrzymujące bęben, 7 – ślimak napędzający bęben

Ziarno znajduje się w środku bębna, do którego również jest dostarczana woda oraz zapewniony stały dopływ tlenu. Ziarno w takiej słodowni jest dobrze i równomiernie napowietrzane nawilżanym powietrzem. Jednocześnie ziarno nie opada na dno bębna, a rozłożone jest na siatce, pod którą również znajduje się nadmuch powietrza. Bęben mocowany jest na rolkach bieżnych i obraca się cyklicznie, najpierw w jednym kierunku, później w przeciwnym. Mieszanie takie jest bardzo delikatne, co pozytywnie przekłada się na stan partii ziarna, tj. niemal nie ulega ono uszkodzeniom mechanicznym. Niestety, główną wadą tego typu słodowni jest ich nieekonomiczność (Kunze, 1996).

Kolejnym typem słodowni są, bardzo popularne i praktyczne, słodownie skrzyniowe. Ogólną zaletą tych słodowni jest ich szeroki zakres dostosowania do potrzeb producenta siodu. Mogą to być urządzenia o wsadzie od 5 do 500 ton jęczmienia. W takich słodowniach na ogół ziarno w trakcie kielkowania stale znajduje się na siatce. Powietrze jest dostarczane od dołu, co w połączeniu z ruchomym ślimakiem zapewnia mieszanie partii ziarna (Kunze, 1996).

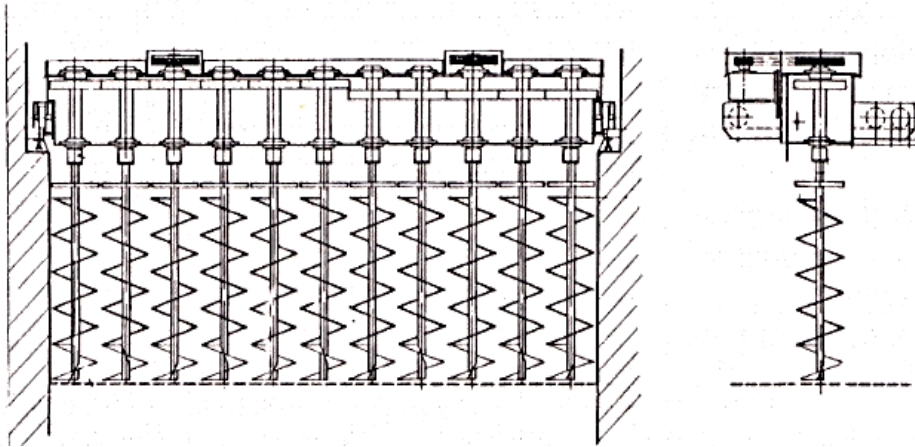
Na rysunku 13 przedstawiona jest słodownia skrzyniowa Saladina.



Rys. 134. Skrzyniowa słodownia Saladina (Kunze, 1996): 1 – podajnik namoczonego ziarna, 2 – dopływ świeżego powietrza, 3 – zwrotne powietrze, 4 – odpływ zużytego powietrza, 5 – transport mokrego siodu do suszarni, 6 – odwracacz ślimakowy, 7 – natrysk wodą

Urządzenia tego typu wykonywane są z betonu zbrojonego lub są murowane, wymagają więc dużych hal produkcyjnych z możliwością zapewnienia lekkiego nadciśnienia. W takich słodowniach warstwa ziarna na sitach nośnych w momencie rozpoczęcia procesu siodowania może wynosić od 0,5 do 0,9 m, a pod koniec – od 0,8 do 1,3 m. Pod sitami, oprócz dopływu powietrza znajduje się również natrysk wodą, umożliwiający dokładne mycie urządzenia (Kunze, 1996). W połączeniu z w/w słodownią w celu spulchniania ziarna stosowane są odwracacze ślimakowe lub śrubowe, które przedstawiono na rysunku 14.

Odwracacze wykonują ok. 8 obrotów na minutę, a sam proces przewracania ziarna wykonywany jest 2 razy na dobę. Wyjątek stanowią ostatnie dni siodowania, kiedy ziarno jest przewracane tylko raz dziennie. Istnieją również okrągłe słodownie, które niewiele różnią się od skrzyniowych. Ruchomym elementem jest w nich dno siatkowe, które stale się obraca. Kielki są gromadzone równomiernie na dnie siatkowym pod przewracaczem. Ciekawym rozwiązaniem są słodownie połączone z suszarnią, systemu Lausmanna. Są one podzielone na pola dobowe, które zaczynają się tuż po namaczalniku. Przemieszczanie ziarna zapewnia przewracacz taśmowy ze zgarniakami. Dużą zaletą tych słodowni jest pełna automatyzacja i wysoka kontrola procesu (Briggs, 1998).



Rys. 14. Schemat przewracacza ślimakowego (rzut boczny i od przodu) (Kunze, 1996)

2.6. Suszenie zielonego słodu

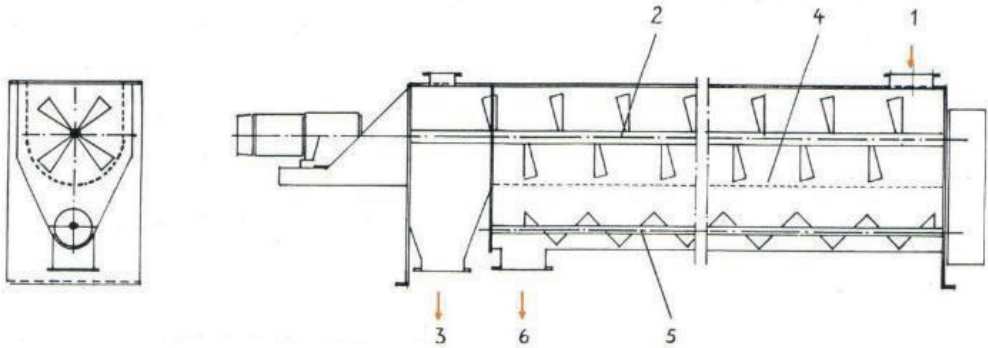
Suszenie przerywa procesy życiowe w ziarnie oraz mocno redukuje zawartość wody. Poza tym, wysuszane są kiełki korzonkowe, do suszenia należy usunąć z ziarna.

Zawartość wody w słodzie zielonym kształtuje się na poziomie około 40%, zaś w słodzie suchym – ok. 5%. Wynik ten jest osiąganym poprzez stały dopływ ciepłego powietrza do słodu, z reguły z zastosowaniem delikatnego wstępnego podsuszania i późniejszego suszenia właściwego. Taką metodę stosuje się ze względu na konieczność zachowania enzymów w ziarnie, które mogą zostać rozłożone przy aplikacji wysokich temperatur na zielony sład o wysokiej zawartości wody. Po prawidłowym procesie suszenia można mówić o utrwaleniu składu chemicznego i przemian w słodzie (Dylkowski, 1978).

Stosowanie wysokich temperatur w trakcie suszenia może przyczynić się do zmian w barwie i aromacie słodu. Zachodzą wtedy tzw. reakcje Maillarda, produktami których są ogólnie nazywane związki Maillarda. Do utworzenia tych związków dochodzi w wyniku reakcji cukrów z aminokwasami pod oddziaływaniem wysokich temperatur. Między innymi powstają barwne połączenia związków, zwanych aldehydami Streckera i aminokwasów. Negatywnym skutkiem pojawienia się tych związków są zmiany w smaku i zapachu produktu końcowego, tj. piwa. Wówczas charakteryzuje się ono nietypowym, nieprzyjemnym i zestarzałym posmakiem i aromatem. Metodą zapobiegawczą jest stosowanie procedury wędnięcia w temperaturze 35-50°C, a następnie dosuszanie np. przez 3 h w 85°C. Niemniej jednak, w przypadku produkcji sładów ciemnych, wyższe temperatury są stosowane już na etapie wędnięcia ziarna (Cohen i Yang, 1995).

2.7. Usuwanie kielków

Kielki stanowią około 34% suchej masy jęczmienia użytego do produkcji słodu i muszą być one oddzielone od ziarna. Na rysunku 15 przedstawiono schemat odkielkownicy do słodu.



Rys. 15. Urządzenie do usuwania kielków (Kunze, 1996): 1 – wysyp słodu, 2 – ukośne łopatki, 3 – wylot słodu, 4 – sito półcyldryczne, 5 – przenośnik ślimakowy do kielków, 6 – wylot kielków. Kielki zawierają około 45% węglowodanów i nawet 30% białka. Kielki oddzielają się od ziarna już na etapie suszenia a także transportu do odkielkownicy. W jej wnętrzu ziarna zostają wprowadzone w ruch obrotowy za pomocą obrotowego wału wyposażonego w ukośne łopatki (2). Kielki są usuwane przez półcyldryczne sito (4), ocierając się o siebie i elementy robocze odkielkownicy. W czasie odkielkowania ziarna nie powinny zostać uszkodzone.

Bezpośrednio po słodowaniu, świeżo wysuszony sód nie nadaje się do produkcji piwa musi on dojrzeć w czasie składowania. Część słodu przed wysyłką poddaje się polerowaniu w celu usunięcia pyłów i oddzielających się łusek. Ze 100 kg oczyszczonego jęczmienia otrzymujemy 148 kg jęczmienia namoczonego, 140 kg słodu zielonego (mokrego), 78 kg słodu świeżo wysuszonego i 80 kg słodu po składowaniu. W trakcie słodowania utrata masy wynosi więc 20%. Główną przyczyną tych strat jest oddychanie jęczmienia w czasie słodowania. Oddychanie ziarna w przypadku słodu jasnego jest przyczyną 60% strat, a usunięte kielki są powodem około 37% strat. Straty w przypadku produkcji sładów ciemnych są o ponad 25% wyższe niż w przypadku sładów jasnych. Do wyprodukowania jednego hektolitru piwa o ekstrakcie brzeczki podstawowej 11% potrzeba około 17 kg słodu (Dylkowski, 1978).

2.8. Rodzaje sładów

Najbardziej rozpowszechnionym sładem jest sód jasny typu pilzneńskiego. Powinien on spełniać następujące wymagania (Kunze, 1996):

- zawartość i białka poniżej 10,8%,
- liczba Kolbacha - od 38 do 42%,
- zawartość ekstraktu - ponad 80%,

- różnica ekstraktu mąka - śruta od 1,2 do 1,8%,
- lepkość brzezki - poniżej 1,55 mPa s,
- barwa - poniżej 3,4 jednostek EBC,
- barwa po gotowaniu - poniżej 5,9 jednostek EBC,
- zawartość azotu w słodzie - ponad 0,65 g na 100 g s.s.,
- kruchość ziarna - od 80 do 86%,
- ilość ziaren szklistych - poniżej 2%,
- zawartość wody - poniżej 5%,
- zawartość pośladu - poniżej 0,8%.

Do produkcji piwa ciemnego wykorzystywane są słody ciemne typu monachijskiego, do wytwarzania których powinno używać się jęczmienia o wysokiej zawartości białka. Proces słodowania powinien przebiegać w temperaturze 18 - 20°C. W produkcji tego słodu stopień namoczenia musi być wyższy niż w przypadku słodu jęczmiennego typu pilzneńskiego i powinien wynosić od 48 do 50%. W czasie suszenia temperaturę podnosi się do 105°C przez ostatnie 4 - 5 godzin. Barwa brzezki kongresowej w przypadku słodu monachijskiego powinna wynosić od 15 do 25 jednostek EBC, a różnica ekstraktów mąka - śruta powinna wynosić od 2 do 3%. Słody ciemne typu monachijskiego stanowią do 85% zasypu (Briggs, 1998).

Słód wiedeński jest wykorzystywany do korekty barwy piwa w przypadku jego produkcji z bardzo jasnych sładów. Stopień namoczenia w produkcji słodu wiedeńskiego wynosi od 44 do 46%. Słód ten suszony jest w temperaturach sięgających nawet 90°C, w ostatniej fazie suszenia. Barwa brzezki kongresowej powinna wynosić od 5,5 do 6 jednostek EBC. Słód wiedeński wykorzystuje się szczególnie do produkcji piwa marcowego i piw mocnych (Pazera i Rzemieniuk, 1998).

Słód karmelowy wytwarza się ze słodu mokrego zielonego o zawartości wody od 45 do 50%. W ostatniej fazie słodowania temperaturę grzędy podnosi się do 50°C, co uaktywnia enzymy szczególnie rozkładające białka do aminokwasów. Następnie taki słód przenosi się ze słodowni do zbiornika, gdzie w temperaturze 68°C przez 60 do 90 minut poddawany jest on przemianom enzymatycznym. W dalszym ciągu obróbki słód karmelowy jest poddawany prażeniu w temperaturze 150-180°C i w czasie do 2 godzin w zależności od tego jaką barwę brzezki chcemy uzyskać. Jasne słody karmelowe mają barwę od 25 do 30 jednostek EBC, a ciemne słody karmelowe - od 80 do 1150 jednostek EBC. Słody karmelowe mogą stanowić nawet 15% wsadu (Goode i Arendt, 2006).

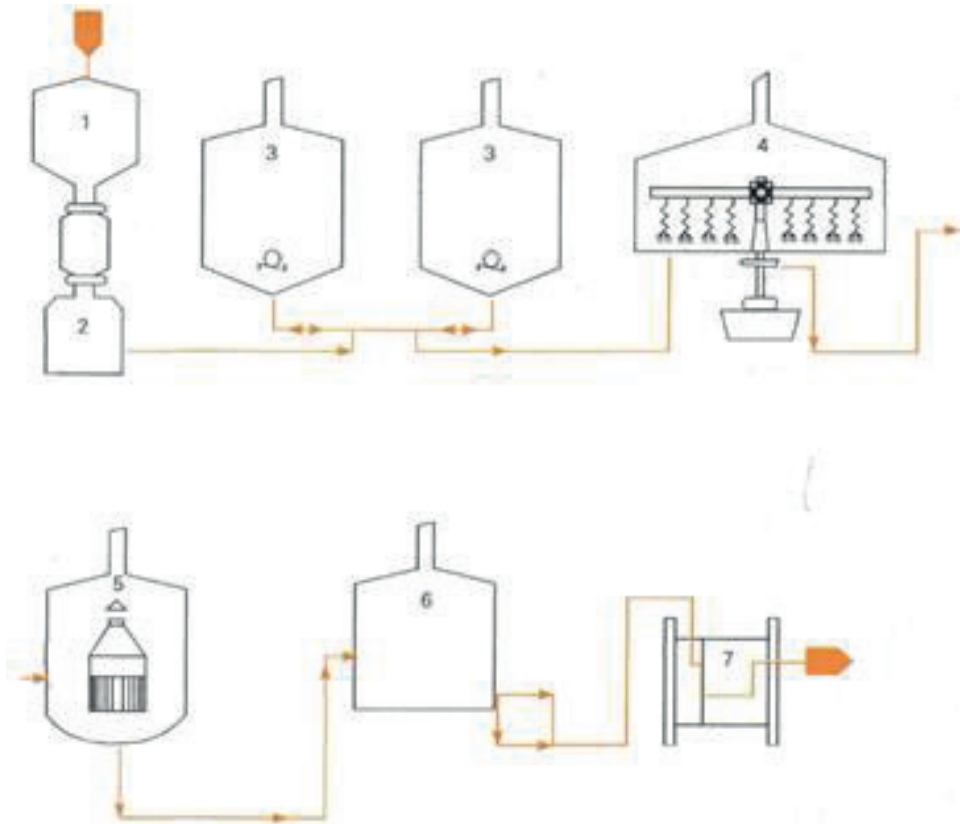
Słody barwiące (brązowe, czekoladowe i czarne) powstają z dobrze rozluźnionego jasnego słodu suszonego. Następnie poddawane są prażeniu, które rozpoczyna się w temperaturze 70°C przy zwiększeniu zawartości wody w słodzie o 5%. Po 2 godzinach następuje prażenie właściwe w temperaturze od 175 do 200°C. Na koniec taki słód jest szybko schładzany (Kunze, 1996).

W przypadku sładów parzonych w ostatnich 36 godzinach słodowania temperaturę grzędy podnosi się do 40-50°C i w warunkach ograniczonego dostępu tlenu uzyskuje się słód bardzo rozluźniony, poprzez ograniczenie wzrostu kielków, a następnie jest on do suszony przez kilka godzin w temperaturach od 80 - 90°C. Barwa słodu parzonego powinna wynosić od 30 do 40 jednostek EBC. Słodu parzonego używa się w ilości do 50% ze słodem jasnym lub ciemnym w celu poprawienia aromatu piwa (Bamforth i Barclay, 1993).

3. PRODUKCJA PIWA

Piwo wytwarzane jest poprzez fermentację cukrów zawartych w brzeczce do alkoholu i dwutlenku węgla. Warunkiem koniecznym zajścia fermentacji jest przemiana niefermentowalnych i nierozpuszczalnych składników brzeczki, głównie skrobi w cukry fermentujące. Ten proces odbywa się w warzelnicy. Produkt warzelnicy jest bazą dla działu browaru, w którym prowadzi się fermentację, a następnie leżakowanie.

Schemat procesu wytwarzania brzeczki piwnej zaprezentowano na rysunku 16.



Rys. 16. Proces wytwarzania brzeczki piwnej (Kunze, 1996): 1 – zbiornik słodowy, 2 – śrutownik, 3 – naczynia zacierne, 4 – kadź filtracyjna, 5 – kocioł warzelnicy, 6 – whirlpool, 7 – płytowy wymiennik ciepła

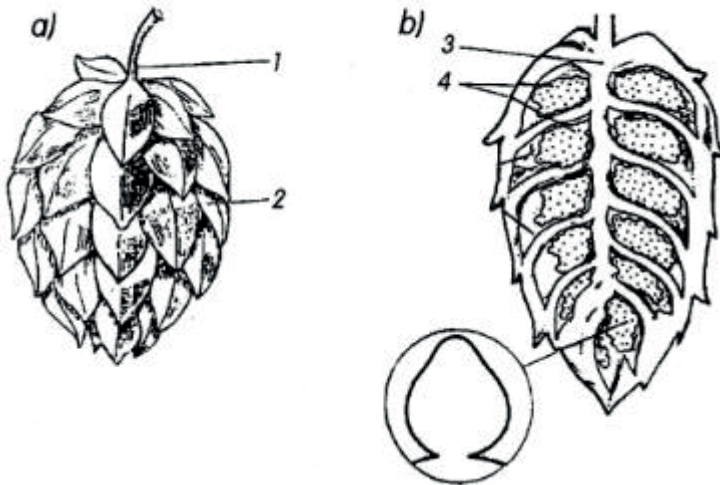
Ze zbiornika magazynowego sładów trafia do śrutownika, w którym zostaje rozdrobniony. Po zmieszaniu z wodą, które odbywa się już w warzelnicy rozpoczyna się proces zacierania. Po zacieraniu następuje oddzielenie powstałego ekstraktu (brzeczki) od pozostałości sładów (młota) w kadzi filtracyjnej. Następnie brzeczka jest gotowana w kotle warzelnym z chmie-

lem. Gorąca brzeczka trafia do whirlpoola lub wirówki, w których następuje oddzielenie gorącego osadu. Po schłodzeniu w płytowym wymienniku ciepła brzeczka trafia do fermentacji. Po fermentacji młode piwo kierowane jest do zbiorników leżakowych. Zarówno fermentacja jak i leżakowanie odbywa się współcześnie w tankach cylindryczno - stożkowych. W celu usunięcia osadów zimnych, po fermentacji piwo poddawane jest wymrażaniu.

3.1. Surowce piwowarskie

3.1.1. Chmiel

Chmiel (*Humulus lupulus*) zalicza się do roślin pnących, wieloletnich. Do produkcji piwa używa się jedynie szyszki chmielowe stanowiące kwiatostany żeńskie (rysunek 17). Szyszki te nie powinny być zapłodnione, ponieważ są wtedy uboższe w związki goryczkowe. W tym celu z plantacji regularnie usuwa się osobniki o owocostanie męskim. Szyszki powinny spełniać następujące wymagania jakościowe: powinny mieć jednolitą zieloną barwę, być zwarte i posiadać drobne gruczoły żółtej barwy zawierające ziarna lupuliny (Pazera i Rzemieniuk, 1998).



Rys. 17. Budowa szyszki chmielowej (Pazera i Rzemieniuk, 1998): a) szyszka b) przekrój podłużny szyszki. 1 – ogonek, 2 – listki okrywające, 3 – osadka, 4 – lupulina

Jakość piwa w dużym stopniu zależy od składu chemicznego szyszek chmielu. przeciętnie, szyszka chmielu zawiera (Pazera i Rzemieniuk, 1998)

- substancje goryczkowe - 18,5 %,
- olejki chmielowe - 0,5%,
- garbniki - 3,5%,
- białko - 20,0%,
- związki mineralne - 8,0%.

Reszta składników to głównie celuloza oraz inne substancje, które nie odgrywają znaczącej roli w procesie chmielenia brzeczki. Najważniejszymi dla piwa składnikami chmielu są żywice miękkie. Można je podzielić na α -kwas i β -kwas. To α -kwas (humulony) odgrywa największą rolę przy chmieleniu, gdyż dzięki nim piwo zyskuje odpowiednio goryczkowy smak. Substancje te są nierozpuszczalne w wodzie, lecz w czasie warzenia brzeczki przekształcają się w rozpuszczalne izo- α -związki. Substancje goryczkowe utralają pianę w piwie, a także mają właściwości bakteriostatyczne, w związku z czym w niewielkim stopniu hamują rozwój drobnoustrojów. Działanie to jest jednak zbyt nikłe, by w znaczącym stopniu podnieść trwałość mikrobiologiczną piwa. Szkodliwy wpływ na zawartość substancji aktywnych w szyszce chmielu ma podwyższona temperatura, podwyższona wilgotność oraz obecność tlenu. Przez te czynniki α -kwas ulegają przyspieszonym przemianom, a końcowym produktem utleniania jest przemiana α -kwasów i β -kwasów w żywice twarde, które nie są przydatne w procesie produkcji piwa. W związku z tym wysuszony chmiel powinno się przechowywać w suchych, schłodzonych pomieszczeniach, bez dostępu tlenu (Briggs, 1998).

W chmielu zawarte są również olejki eteryczne. Ich ilość zależy od odmiany chmielu i wynosi od 0,5 do 1,2%. Olejki te są mieszaninami około 250 substancji eterycznych, które nadają chmielowi charakterystyczny zapach. Podczas gotowania brzeczki większość z nich zostaje odparowana, w związku z czym przy chmieleniu warzonej brzeczki, należy rozróżnić chmielenie na goryczkę odmianami goryczkowymi (o zawartości α -kwasów powyżej 6%) w początkowej fazie warzenia, a pod koniec warzenia chmielenie na aromat odmianami aromatycznymi (o zawartości α -kwasów na poziomie około 4-6%), by ich olejki nie zdążyły odparować (Kunze, 1996).

W skład chmielu wchodzi również garbniki (od 2 do 5% w suchej substancji), które nadają piwu ściągający smak, a także wchodzi w reakcje z innymi związkami, w tym z białkami, tworząc kompleksy, które ulegają wytrąceniu oraz w reakcję z solami żelaza. Wyróżnia się odmiany chmielu: aromatyczne, goryczkowe i wysokogoryczkowe. Pierwsze z nich charakteryzują się przyjemnym aromatem oraz niską zawartością α -kwasów (Kunze, 1996).

3.1.2. Woda

Największy ilościowo udział w produkcji piwa ma woda której jakość i sposób uzdatniania ma znaczący wpływ na jego właściwości organoleptyczne. Część zużycia wody związana jest bezpośrednio z produktem, lecz znaczna jej ilość jest wykorzystywana do płukania i mycia. Jej zużycie w browarze wynosi ok. 5 hl na 1 hl gotowego produktu. W związku z tym, by ograniczyć zużycie droższej wody miejskiej, większość browarów ma własne studnie, z których czerpie wodę (Dylkowski, 1978).

Woda wykorzystywana do produkcji piwa musi spełniać takie same wymagania jak woda pitna, zarówno pod względem mikrobiologicznym, chemicznym i fizykochemicznym. Powinna być czysta, bezbarwna, bez zmutnień, bezwonna, a co do zawartości substancji rozpuszczonych, musi spełniać obowiązujące dyrektywy Unii Europejskiej. Wymagania dotyczące wody dla przemysłu m.in. piwowarskiego opisano w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 listopada 2015 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Równie wysokie wymagania stawia się wodzie w zakresie zanieczyszczeń drobnoustrojami. Ilość bakterii jest uzależniona od stopnia zanieczyszczenia gleby. Grubsza warstwa

ziemi, przez którą przesiąka woda zapewnia zwiększoną czystość. Korzystne więc jest pobieranie wody z głębszych ujęć, co zapewnia poprawę właściwości biologicznych wody (Kunze, 1996).

Pierwszym z etapów uzdatniania wody jest usuwanie zawiesin. Składają się na nie najczęściej nierozpuszczalne części ziemi i roślin, bądź pochodzące z nich substancje. Usuwanie zawiesin odbywa się dwuetapowo. Początkowo woda kierowana jest do odstojuników w celu zmniejszenia szybkości przepływu. Skuteczność klarowania jest uzależniona od wielkości odstojunika. Im jest większy tym proporcjonalnie wyższa jest skuteczność klarowania, dlatego często jego funkcję spełniają zapory wodne. W tym procesie usuwanych jest od 60 do 70% zmętnień. W kolejnym etapie stosuje się proces filtracji, w którym wykorzystywane są filtry piaskowe. Woda przepływa przez warstwę prażonego piasku kwarcowego o zbliżonej wielkości ziaren, na których zostają odseparowane resztki zawiesin (Briggs, 1998).

Kolejnym etapem uzdatniania wody jest dezynfekcja wody. W tym procesie stosuje się następujące substancje chemiczne (Kunze, 1996):

- aktywny chlor,
- dwutlenek chloru,
- ozon.

Doprowadzenie chloru w postaci gazowej do wody powoduje powstawanie kwasu podchlorynowego (HOCL), który rozpada się na kwas solny i agresywny tlen o bardzo dużej sile utleniającej i bakteriobójczej. Metoda ta jest skuteczna i nieskomplikowana, lecz niepozbawiona wad. Jeśli woda posiada związki organiczne lub fenole, w czasie reakcji tworzą się substancje szkodliwe dla zdrowia. Dwutlenek chloru jest otrzymywany z kwasu solnego i podchlorynu sodowego. Powstała substancja to gaz niestabilny, który musi być natychmiast dozowany do wody. Metoda ta pozwala wytworzyć mniej szkodliwych związków, jest tania i skuteczna, a do tego nie wywołuje zmiany smaku wody. Jednak z drugiej strony wymaga poświęcenia czasu, precyzji oraz wzmoczonej kontroli. Ozon jest silnym utleniaczem, który niszczy drobnoustroje zawarte w wodzie. Ozonowanie wody jest skuteczne, a sam proces stabilny, lecz jego używanie wiąże się z kosztowną instalacją (Pazera i Rzemieniuk, 1998).

3.1.3. Drożdże

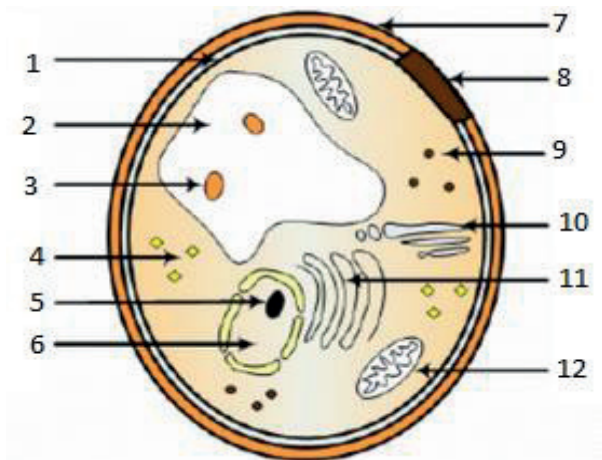
Drożdże to grzyby jednokomórkowe. Można podzielić je na te, które czerpią energię w obecności tlenu przez oddychanie (warunki aerobowe) oraz takie, które generują energię bez tlenu poprzez fermentację (anaerobowe).

Komórka drożdży piwowarskich ma kształt owalny. Jej długość wynosi od 6 do 10 μm , a szerokość od 5 do 7 μm . Każda zawiera ok 75% wody, a skład substancji suchej wynosi w przybliżeniu (Pazera i Rzemieniuk 1998):

- ciała białkowe - 45-60%,
- węglowodany - 25-35%,
- tłuszcze - 4-7%,
- związki mineralne - 6-9%.

Komórka drożdżowa zbudowana jest z cytoplazmy otoczonej błoną i ścianą komórkową. Cytoplazma zawiera organelle, które są odpowiedzialne za przemiany materii. Najistotniejszą częścią komórki jest jądro komórkowe, które zawiera chromosomy, DNA i RNA. Jądro otacza dwuwarstwowa błona jądrowa. Jej pory umożliwiają przenikanie substancji wielocząsteczkowych z jądra do cytoplazmy. W komórce drożdżowej (rysunek 18) występują liczne mitochondria. Są one wypełnione treścią zawierającą DNA oraz enzymy. W nich przebiegają procesy oddychania i wytwarzania energii, stąd są nazywane „agregatami energetycznymi komórki” (Kunze, 1996).

Kolejnym elementem komórki jest retikulum endoplazmatyczne, występujące jako sieć kanalików, naczyń i woreczków. Można je podzielić na część gładką i szorstką - pokrytą rybosomami. Pełni funkcje transportowe, wydalnicze i syntetyczne. Bierze udział w tworzeniu ścian komórkowych. Od strony centrum komórki znajduje się aparat Golgiego, w którym przebiega synteza glikoprotein. Dzięki jego udziału wytwarzane są ziarnistości zawierające enzymy i metabolity, w tym alkohol (Szostak-Kot, 2000).



Rys. 18. Budowa komórki drożdżowej (<https://www.slideshare.net/>): 1 – błona cytoplazmatyczna, 2 – wakuola, 3 – krople tłuszczu, 4 – glikogen, 5 – jąderko, 6 – jądro, 7 – ściana komórkowa, 8 – blizna, 9 – rybosomy, 10 – aparat Golgiego, 11 – retikulum endoplazmatyczne, 12 – mitochondrium

W browarze drożdże występują w postaci gęstwy. Jest to półpłynna substancja o barwie brunatno-szarej. W każdym jej mililitrze znajduje się około miliarda indywidualnych niezależnych od siebie komórek drożdżowych. Populacja drożdży przelana do odpowiednio przygotowanej pożywki zaczyna się rozwijać. Przy produkcji piwa nazywa się to nastawem brzezki z drożdżami. W rozwoju populacji drożdżowych można wyodrębnić sześć faz (Szostak-Kot, 2000):

1. faza pobudzenia (wstępna) polega na uaktywnieniu procesów przemiany materii w komórkach. Długość tej fazy zależy od szczepu drożdży, wieku kultury i warunków środowiska, w którym się rozwijają. Faza ta kończy się w momencie pierwszego podziału komórki,

2. **faza opóźniona.** W tej fazie komórki rozwijają się lecz ich podział występuje stosunkowo rzadko. Podziały te ulegają stopniowemu przyspieszeniu,
3. **faza logarytmicznego przyrostu komórek.** W fazie tej wszystkie komórki pączkują lub ulegają podziałowi. Czas podwojenia ich liczby jest wartością stałą. W browarach czas ten wynosi zwykle kilka godzin,
4. **faza zwolniona.** Wskutek działania różnych czynników, przede wszystkim wyczerpania cukrów, tempo rozmnażania komórek maleje i nie przebiega logarymicznie,
5. **faza stacjonarna** (stanu nasycenia). W tym okresie ustala się na podobnym poziomie liczba komórek powstających i obumierających. Liczba żywych komórek w podłożu utrzymuje się na stałym poziomie,
6. **faza obumierania komórek.** Jest to ostatnia faza, w której w wyniku zahamowanego rozmnażania i przyspieszonego obumierania komórek następuje spadek liczebności populacji drożdży. Intensywność i czas trwania poszczególnych faz rozwoju populacji zależą od jakości pożywki, temperatury, pH, natlenienia i stanu fizjologicznego komórek drożdżowych.

W przemyśle browarniczym używa się drożdży z rodzaju *Sacharomyces cerevisiae*, z których można wyróżnić liczne szczepy. Dzieli się je na drożdże górnej i dolnej fermentacji. Różnią się one pod względem fizjologicznym i morfologicznym.

Drożdże dolnej fermentacji w przeważającym stopniu wykorzystują beztlenowy typ przemiany materii. Natomiast w przypadku drożdży górnej fermentacji proces ten przebiega przy udziale tlenu. Drożdże dolnej fermentacji charakteryzuje ograniczona zdolność zarodnikowania. Tworzenie zarodników jest mniej częste i trwa dłużej niż w przypadku drożdży fermentacji górnej, co daje się zaobserwować poprzez plon biomasy drożdży zebranych po fermentacji. Nazwanie ich mianem drożdży górnej i dolnej fermentacji nawiązuje do tego, że pierwsze z nich gromadzą się w pianie na powierzchni brzezki poddanej fermentacji, a dopiero na samym końcu procesu osiadają na dnie. Ponadto ich optymalna temperatura „pracy” wynosi 15-25°C (Szostak-Kot, 2000).

Natomiast drożdże dolnej fermentacji bardzo szybko tworzą warstwę na dnie zbiornika, a temperatura w jakiej przeprowadza się fermentację z ich udziałem jest znacznie niższa i wynosi zwykle 7-15°C. Cechą charakterystyczną tego rodzaju drożdży jest zróżnicowana zdolność tworzenia kłaczkowatych konglomeratów. Można je podzielić na pyliste i kłaczkujące. Pierwsze z nich pozostają zawieszony w brzezce na czas fermentacji, a po zakończeniu procesu powoli osiadają na dno. Natomiast drożdże kłaczkujące łączą się w duże grupy, po kilka tysięcy komórek, wyglądem przypominając kłaczki i szybko osiadają na dnie (Szostak-Kot, 2000).

3.2. Rozdrabnianie słodu

Słód jest rozdrabniany w celu umożliwienia dostępu enzymom do substancji zawartych w słodzie. Słód używany do jednej warki nazywany jest zasypem. Podczas mechanicznego rozdrabniania słodu należy chronić łuskę przed jej rozdrobnieniem, ponieważ jest ona niezbędna podczas filtracji jako składnik przegrody filtracyjnej. Stąd bardzo często, aby ją uelastycznić poddaje się ją kondycjonowaniu wodą. Rozdrabnianie słodu odbywa się w śrutownikach. Może ono przebiegać na sucho lub na mokro. Do tego celu używa się najczęściej śrutowników walcowych lub mlewników udarowych (Grochowicz, 1996).

Przed rozdrabnianiem słód jest oczyszczany zgodnie ze schematem opisanym w rozdziale 2.3. Dokonuje się tego pomimo, że ziarno jęczmienia przeznaczone na słód było już oczyszczone w słodowni. Rozdrabnianie w browarnictwie przeprowadzane jest na urządzeniach typowych dla przemysłu zbożowo-młynarskiego. Najczęściej wykorzystywane są do tego celu rozdrabniacze bijakowe i młowniki walcowe (Grochowicz, 1996).

3.2. Wytwarzanie brzezki piwnej

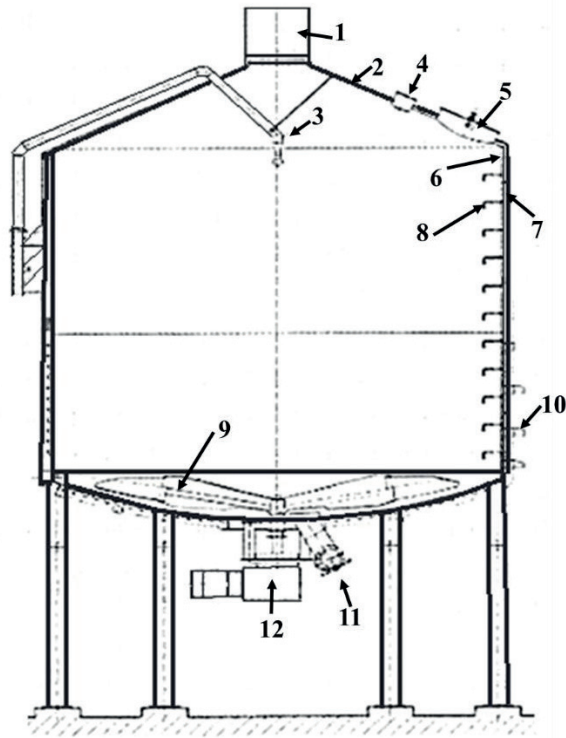
3.2.1. Zacieranie

Celem zacierania jest przemiana nierozpuszczalnych substancji zawartych w słodzie, głównie skrobi na cukry prostsze (w większości maltozę) podlegające fermentacji alkoholowej oraz dekstryny, które nie są fermentowalne, ale nadają piwu treściwości. Innymi składnikami nierozpuszczalnymi, zawartymi w słodzie są celuloza, wysokocząsteczkowe substancje białkowe i inne związki, które po filtracji zostają w wysłodzinach. Wszystkie substancje przechodzące ze słodu do roztworu nazywa się ekstraktem. Należy zwrócić uwagę, że do ekstraktu przechodzą również substancje niepożądane takie jak garbniki, występujące głównie na łusce, które powodują cierpki smak piwa i posmaki ściągające oraz substancje o charakterze białkowym, przez które piwo staje się mętne (Briggs, 1998).

Rozkład substancji w czasie zacierania odbywa się dzięki aktywności enzymów. Każdy enzym posiada optymalne warunki działania. Należy zapewnić im odpowiednią temperaturę oraz pH. Dla α -amylazy temperatura ta mieści się w granicach 72-75°C, a przy 80°C ulega ona dezaktywacji. Najkorzystniejsze pH wynosi 5,6-5,8. Działanie β -amylazy wymaga 62-65°C oraz pH w przedziale 5,4-5,5. Dezaktywacja tego enzymu odbywa się przy 70°C. Maksimum aktywności enzymatycznej powstaje po około 10-20 minutach zacierania (Vogel, 2008). W praktyce stosuje się następujący schemat zacierania, wynikający z optymalnych temperatur dla aktywności enzymów (Kunze, 1996):

- 45-50°C- przerwa białkowa i β -glukanowa,
- 62-65°C- przerwa wytwarzania maltozy,
- 70-75°C- przerwa scukrzenia,
- 78°C- temperatura zakończenia zacierania.

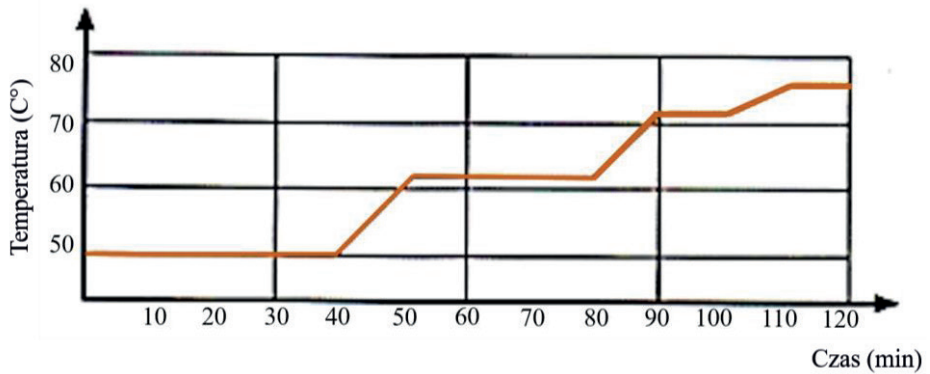
Tradycyjne metody zacierania można podzielić na infuzyjne i dekokcyjne. Metoda infuzyjna jest najczęściej współcześnie wykorzystywana i polega na stopniowym podgrzewaniu zaciera w jednym naczyniu (Kunze, 1996). Budowę takiego naczynia zaprezentowano na rysunku 19. Kadzio-kocioł jest zbiornikiem wyposażonym w mieszało (9) i płaszcz grzejny (6).



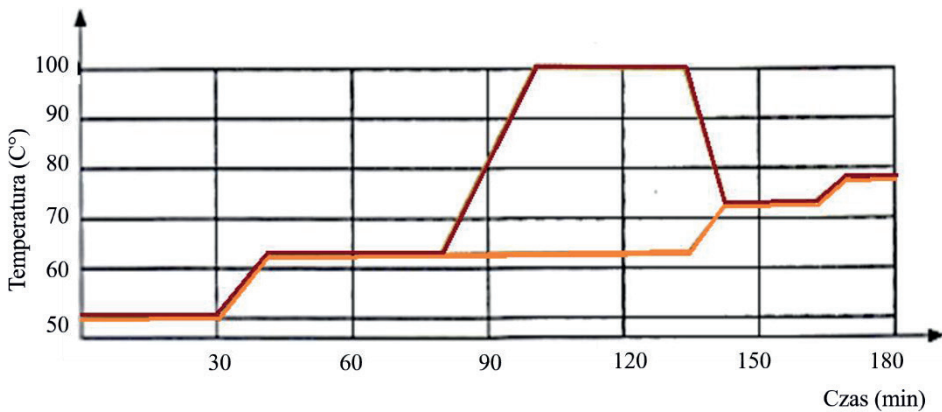
Rys. 19. Kadzio-kocioł zacierny (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996):
 1 – komin do oparów, 2 – kopuła, 3 – mycie CIP, 4 – oświetlenie wewnętrzne, 5 – otwór
 wzrotny i wejściowy, 6 – ogrzewanie płaszczowe, 7 – izolacja, 8 – szczelne drabiny,
 9 – mieszadło, 10 – rura grzewcza, 11 – doprowadzanie i odprowadzanie zacieru,
 12 – napęd mieszadła

Zacieranie infuzyjne przebiega zwykle od temperatury 50°C aż do 76°C, z przerwami scukrzającymi przez określony czas w odpowiednich temperaturach. W metodzie dekokcyjnej wykorzystywanych jest kilka naczyń (ilość zależy od systemu jedno, dwu lub trójwarowego). W metodzie jednowarowej zacier podgrzewa się do ustalonej temperatury ok. 52°C, a następnie odpompowuje się około 1/3 objętości do drugiego naczynia i podwyższa temperaturę najpierw do 64°C, z zastosowaniem przerwy scukrzającej. W kolejnym etapie tą samą część zacieru ogrzewa się do 72°C i stosuje kolejną przerwę. Pozostałą część zacieru gotuje się w 100°C i łączy z pozostałym. Po ich zamieszaniu temperatura zacieru powinna oscylować w granicach ok 76°C (Błażejczak, 2014).

Przebieg zacierania metodą infuzyjną pokazano na rysunku 20, a metodą dekokcyjną na rysunku 21.



Rys. 20. Przebieg procesu zacierania metodą infuzyjną (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996)



Rys. 21. Przebieg procesu zacierania metodą dekokcyjną (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996)

3.2.2. Filtracja brzezki

Bezpośrednio po procesie zacierania, brzezka przepompowywana jest do kadzi filtracyjnej, w której następuje filtracja zacieru (rysunek 22). Polega ona na wypłukaniu jak największej części ekstraktu i oddzieleniu brzezki od tak zwanych wysłodzin. Wysłodziny to nierozpuszczalne części zacieru, w których składzie znajdują się głównie rozdrobnione części słodu w tym: łuski, zarodki i inne substancje, które podczas zacierania nie przeszły do wodnego roztworu.

Podczas tego rodzaju filtracji rolę filtru pełnią wysłodziny. Zaraz po przepompowaniu zacier w kadzi filtracyjnej wprowadzany jest w kilkuminutową cyrkulację. Ma ona na celu równomierne wymieszanie części stałych i ciekłych zacieru, dzięki czemu w wyniku sedymentacji wysłodziny tworzą równomierną warstwę na całej powierzchni sit kadzi, a brzezka w ułatwiony sposób znajduje ujście między cząstkami skruszonego słołu i łuski. W chwili zatrzymania cyrkulacji uruchamiana jest sekwencja krojenia warstwy filtracyjnej za pomocą noży spulchniających. Prędkość krojenia jest nieznaczna i wynosi jeden obrót na kilka minut, głębokość krojenia sterowana automatycznie, wyznaczana na podstawie różnicy ciśnień. Powstałe w ten sposób szczeliny znacznie przyspieszają grawitacyjny spływ cieczy na dno kadzi. Ciecz odfiltrowana od zacieru to brzezka przednia. Charakteryzuje się ona wysoką zawartością ekstraktu (Kunze (1996)).

Według Kunze (1996) musi ona zawierać od 4 do 6% ekstraktu więcej niż wytwarzane piwo, tj. przy 12-procentowym piwie, od 16 do 20%. Po spływie brzezki przedniej w wysłodzinach pozostaje ekstrakt, którego niewykorzystanie byłoby marnotrawstwem. Dlatego kolejną częścią filtracji jest wymywanie wysłodzin wodą o odpowiedniej temperaturze. Wodę taką podaje się w kilku cyklach w zależności od przyjętej technologii, a każdy cykl nazywany jest wodami wysłodkowymi. Im więcej wód wysładzających przepłynie przez warstwę wysłodzin, tym intensywniej oddadzą one ekstrakt, a jednocześnie zwiększy się wydajność procesu .



Rys. 22. Wnętrze kadzi filtracyjnej (<https://www.globalfilter.com/beer-filtration/>)

Należy jednak pamiętać, że pod koniec wysładzania, wyplukiwanych jest więcej substancji garbnikowych i kwasu krzemowego, które są niepożądane. W browarach, którym zależy na najwyższej jakości produktu, filtrację przerywa się, kiedy wody wysłodkowe zawierają około 2°Błg. W wielkich koncernach browarniczych nastawionych na maksymalizację wydajności i oszczędności wyługowuje się znacznie dłużej, a otrzymaną ciecz zwaną cienkuszem wykorzystuje się w następnej warce piwa. Program filtracji zostaje zakończony po ściągnięciu określonej ilości brzezki. Wtedy to uruchamiana jest sekwencja ściągania, podczas której odpompowuje się resztkę cieczy z wysłodzin. Cała brzezka trafia do kotła warzelnego lub tak zwanego piątego naczynia, gdzie czeka na przepompowanie do kotła warzelnego (zależnie od zastosowanej technologii). Kolejnym etapem jest usuwanie młota słodowego. W prostych kadziach filtracyjnych prace tą wykonuje się ręcznie, natomiast w nowoczesnych kadziach zostają wypięte listwy do usuwania młota. Wysłodziny pchane są do otworów zrzutowych i spadają przez nie na transporter do wysłodzin. Ślimak porcuje młoto, które przy pomocy sprężonego powietrza transportowane jest rurociągami do silosu wysłodzin.

3.2.3. Warzenie piwa

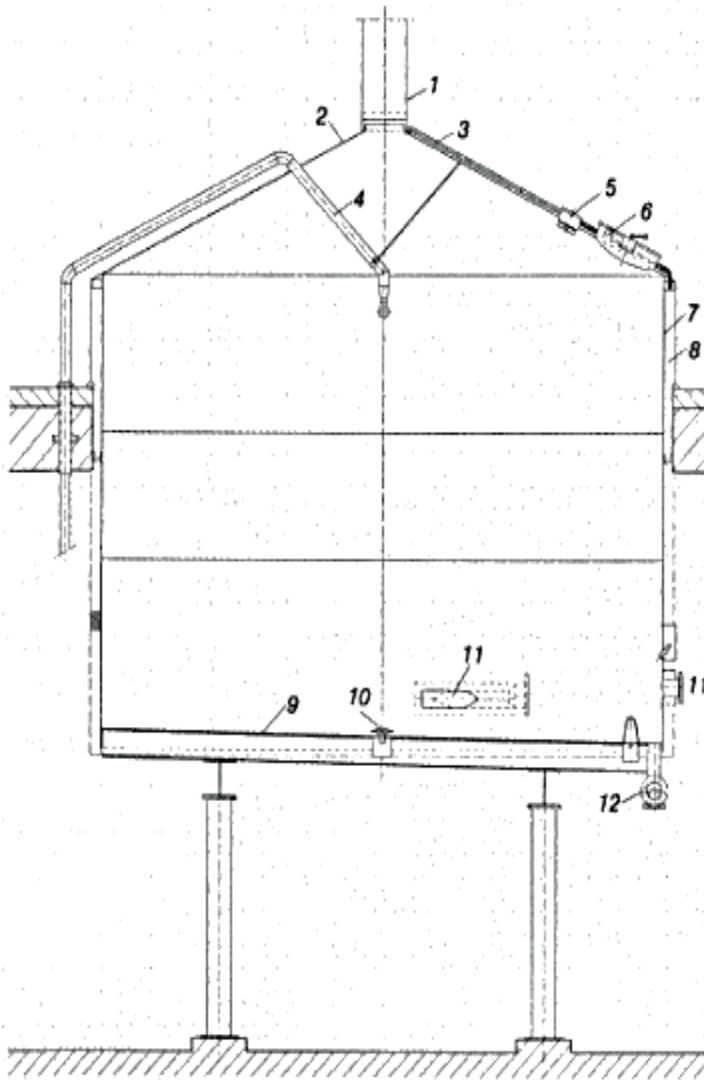
Proces warzenia polega na gotowaniu odfiltrowanej brzezki z dodatkiem chmielu w temperaturze około 100°C przez okres 1-2 godziny. Przebiega on w urządzeniu o podobnej konstrukcji do tej, zaprezentowanej na rysunku 23. Czas ten można skrócić dzięki zastosowaniu kotłów warzelnych ciśnieniowych, przy zwiększonym ciśnieniu. Podczas tej czynności występuje szereg procesów, które mają kluczowy wpływ na cechy organoleptyczne piwa. Są to (Kunze, 1996) :

- sterylizacja,
- zagęszczenie brzezki,
- zniszczenie enzymów,
- wytworzenie i wytrącenie związków białkowo- garbnikowych,
- odparowanie siarczku dwumetylu (DMS),
- zmiana barwy brzezki,
- rozpuszczenie składników chmielu i izomeryzacja α -kwasów.

Ugotowana brzezka staje się sterylna. Jej stopień utrwalenia sprawdza się w laboratorium. Brzezka nastawna powinna mieć trwałość mikrobiologiczną nie krótszą niż 7 dni.

W fazie intensywnego warzenia następuje częściowe odparowanie wody, w związku z czym zwiększa się ekstrakt brzezki nastawnej. Wraz z wodą odparowywane są również inne substancje niekorzystne dla smaku i aromatu, które pochodzą z chmielu i siodu (głównie DMS). Odparowanie to jest wprost proporcjonalne do dostarczonej ilości energii cieplnej oraz czasu (Kunze, 1996) .

Izomeryzacja α -kwasów oraz rozpuszczenie innych związków chmielu następuje w pierwszych 30 minutach gotowania (ok. 90% przemian). Dlatego chmielenie na goryczkę należy zastosować w chwili osiągnięcia przez brzezkę temperatury 100°C. Przez osiągnięcie tej temperatury dezaktywowane zostają enzymy, dzięki czemu zapobiegamy dalszym przemianom enzymatycznym. Wynikiem reakcji Maillarda podczas warzenia jest zmiana barwy brzezki. Polega ona na tworzeniu się melanoidów przez połączenie cukrów prostych z aminokwasami. Do przyciemnienia barwy przyczynia się również reakcja karmelizacji cukrów oraz utleniania polifenoli (Briggs, 1998).



Rys. 23. Kadź osadowa „whirlpool” (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996):

1 – wyciąg oparów, 2 – kopuła wyciągu oparów, 3 – odpływ wody kondensacyjnej, 4 – mycie CIP, 5 – oświetlenie, 6 – okno wzierne z włazem, 7 – płaszcz, 8 – izolacja, 9 – dno, 10 – dysza denna CIP, 11 – wypływ styczny, 12 – wypływ

Według Pazery i Rzemieniuka (1998), podczas warzenia, w wyniku reakcji białka z garbnikami, poprzez wytrącenie osadu garbnikowo-białko-*wego, następuje obniżenie zawartości związków azotowych. Wytrącenie całego białka koagulującego podczas warzenia jest niemożliwe.

Pod koniec procesu warzenia brzezki należy sprawdzić, czy jej parametry odpowiadają wymaganiom. Podczas tej czynności kontroluje się stężenie, objętość, pH oraz barwę brzezki, a także ocenia przełom - osad złożony głównie z białek i garbników, wytrącający się w postaci kłaczków w trakcie gotowania brzezki z chmielem. Jeśli jedno z powyższych kryteriów nie jest spełnione, często można je unormować. Zbyt niskie stężenie cukru regulować można przez dodanie syropu glukozowo-fruktozowego, zbyt wysokie pH poprzez dodanie środka obniżającego pH (najczęściej jest to roztwór kwasu mlekowego), zbyt niską barwę przez dolanie karmelu barwiącego (Kunze, 1996).

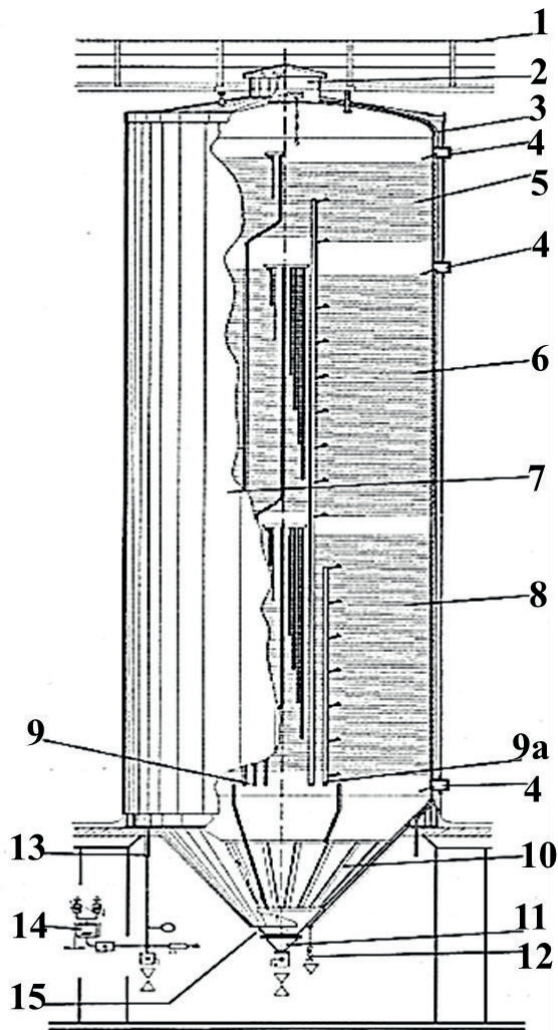
Po fazie kontroli dochodzi do wybicia - przepompowania brzezki z kotła warzelnego do następnego naczynia - najczęściej kadzi osadowej potocznie zwanej „whirlpool” (rysunek 24).

Rura wlotowa do cylindrycznej kadzi osadowej umieszczona jest od jej zewnętrznej ściany, dzięki czemu wpływająca brzezka wprawiana jest w ruch wirowy. Po około 15 minutach dzięki zjawisku sedymentacji, ciała stałe (resztki chmielu i związki białkowe) całkowicie opadają na dno, a dzięki uprzednio wytworzonemu ruchowi wirowemu cieczy, zbierają się pośrodku naczynia tworząc stożek. Dzięki takiemu rozwiązaniu można odpompować prawie całą klarowną brzezkę. Osad i resztkę pozostałej w kadzi osadowej brzezki można rozbić wodą, splukać i zawrócić do kadzi filtracyjnej jako woda wysłodkowa, w ten sposób odzyskujemy każdą kroplę ekstraktu i generujemy oszczędności nie wylewając ich do ścieków (Kunze, 1996).

3.3. Fermentacja i leżakowanie

Głównym celem fermentacji brzezki jest zamiana cukrów fermentujących na alkohol etylowy, dwutlenek węgla i produkty uboczne. Przemiana ta zachodzi dzięki działaniu drożdży w optymalnych warunkach ich pracy. Fermentację można podzielić na dwa podstawowe etapy. Pierwszy zachodzi zaraz po dodaniu drożdży. W fazie tej zachodzi intensywne rozmnażanie drożdży oraz fermentacja burzliwa. Dla piw dolnej fermentacji przebiega ona w temperaturze 6-8,5°C. Przyjmuje się, że fermentacja burzliwa trwa taką ilość dni, ile procent ekstraktu zawiera brzezka nastawna, minus 2 dni (Szostak-Kot, 2010).

Fermentację brzezki przeprowadza się w tankach cylindryczno – stożkowych (rysunek 24).



Rys. 24. Zbiornik cylindryczno-stożkowy (opracowanie własne na podstawie Kunze, 1996):
 1 – pomost dla personelu, 2 – kopuła zbiornika z armaturą, 3 – kable i rura odwadniająca w strefie izolacyjnej, 4 – czujnik termometru, 5 – mała strefa chłodzenia dla leżakowania, 6, 8 – strefy chłodzenia fermentacji głównej, 7 – izolacja, 9 – przewody ciekłego amoniaku, 9a – odprowadzanie oparów amoniaku, 10 – strefa chłodzenia stożka, 11 – króciec spustowy stożka i zamknięcie wjazdu, 12 – kurek probierczy, 13 – przewody łączące z kopułą, 14 – zawór czopujący, 15 – sonda poziomu zawartości zbiornika

Proces fermentacji przebiega wg wzoru sumarycznego (Dylkowski, 1978):



Proces fermentacji można podzielić na cztery stadia (Pazera i Rzemieniuk, 1998):

Faza namnażania drożdży trwa w przybliżeniu 24 godziny i charakteryzuje się wysokim przyrostem liczby komórek drożdżowych - nawet 3-4 krotnym. Faza ta kończy się z chwilą wykorzystania rozpuszczonego w brzeczce tlenu.

Faza niskich krażków, to burzliwa fermentacja alkoholowa. Charakteryzuje się tym, że na powierzchni powstaje biała piana, która z czasem gęstnieje, a wytrącające się żywice chmielowe nadają miejscowego brunatnej barwy pianie.

Stadium wysokich krażków, to etap, w którym warstwa piany staje się dużo grubsza, a fermentacja osiąga swoje maksimum.

Opadanie krażków, to zanikanie procesu fermentacji. Drożdże osiadają na dno dzięki czemu młode piwo powoli się klaruje. Warstwa piany staje się cienka i jednolicie brunatna (tzw. powłoka pofermentacyjna).

Drugim etapem fermentacji jest leżakowanie. Proces ten polega na oddzieleniu nadmiaru drożdży i powolnej fermentacji pozostałych cukrów. Zwykle przeprowadza się go w obniżonej temperaturze do 1-2°C, dzięki czemu piwo lepiej nasycy się dwutlenkiem węgla i klaruje oraz nabiera odpowiedniego bukietu smakowo-zapachowego. Leżakowanie piwa powinno odbywać się w warunkach nadciśnienia ok. 0,03 MPa (Kunze, 1996). Leżakowanie piwa przeprowadza się, tak jak fermentację, w tankach cylindryczno – stożkowych (rys. 29).

Drożdże powinny być odbierane z tanków tak szybko i tak często jak to jest możliwe. Po sfermentowaniu cukrów ich komórki ulegają autolizie. Produkty autolizy bardzo niekorzystnie wpływają na jakość piwa. Aminokwasy i enzymy proteolityczne obniżają trwałość piany, kwasy tłuszczowe, zwłaszcza nienasycone, mają negatywny wpływ na stabilność piwa w czasie przechowywania, a przy tym wzrasta pH piwa. Drożdże odbiera się z części stożkowej tanku, przed spuszczeniem piwa. Po leżakowaniu drożdże są również usuwane najczęściej przez odwirowanie (Kunze, 1996).

Na koniec piwo poddawane jest obróbce końcowej na którą się składają standardowe procedury obowiązujące w branży napojów. Filtracja najczęściej przebiega w różnorodnych filtrach, z różnorodnymi przegrodami filtracyjnymi oraz z udziałem substancji pomocniczych, takich jak np. ziemia okrzemkowa, ziemia krzemionkowa, czy perlit. Nowością w branży jest fakt pojawienia się w ostatnich latach filtrów membranowych. W następnej fazie obróbki końcowej piwo podlega rozlewowi oraz pasteryzacji. Cała obróbka finalna odbywa się w instalacjach wypełnionych gazowym CO₂, aby uniknąć jego strat (Briggs, 1998).

4. IMPREGNACJA PRÓŻNIOWA

Impregnacja, czyli nasycanie materiałów dodatkowymi składnikami ciekłymi jest znanym i szeroko stosowanym procesem od ponad 100 lat. Często w życiu codziennym spotykamy się z impregnowanymi produktami, takimi jak: drewno, beton, papier, tkaniny czy wyroby skórzane, nie zdając sobie sprawy z tego, że część ich właściwości użytkowych jest wynikiem właśnie procesu impregnacji. Od końca lat 60-tych ubiegłego wieku można obserwować pojawienie się i ekspansję wykorzystania w skali przemysłowej procesu impregnacji, realizowanego w warunkach obniżonego ciśnienia. Impregnacja taka zarówno w literaturze naukowej, jak też branżowej nazywana jest impregnacją próżniową (vacuum impregnation). O jej znaczeniu może świadczyć fakt, że znajduje się ona wśród procesów objętych standardami amerykańskiego przemysłu obronnego (MIL-STD-276A). Proces impregnacji próżniowej jest również przedmiotem zainteresowania Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN (Projekt MS-3898/TE/LHC) (D'Alfonzo, 2013a, 2013b).

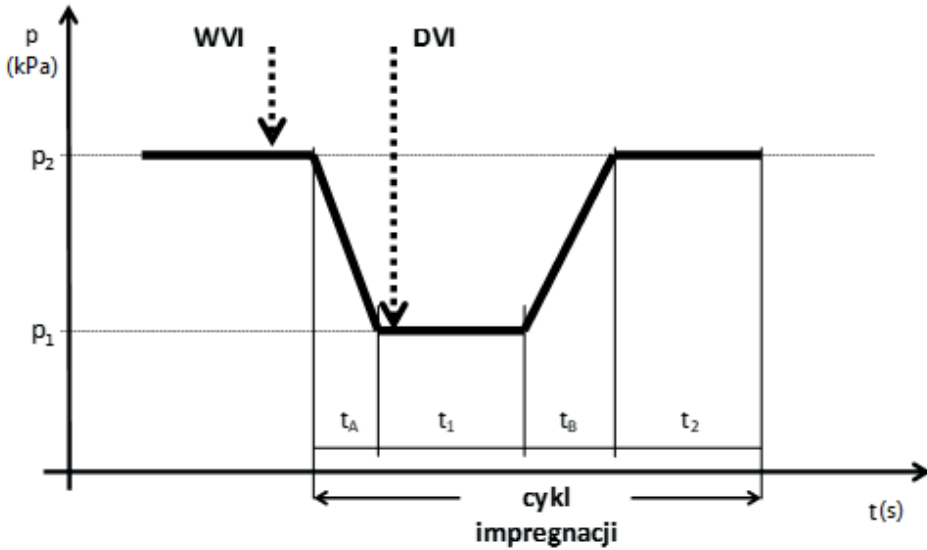
Według Sivamma i in. (2021), pojęcia „impregnacja” używają w przypadku, gdy proces ten przebiega w warunkach ciśnienia atmosferycznego ($1,013 \cdot 10^5$ Pa). Natomiast pojęcie „impregnacja próżniowa” należy odnosić do poziomu zastosowanego podciśnienia. W zależności od zastosowanego poziomu próżni „impregnację próżniową” można podzielić na sześć zakresów. Dla próżni niskiej (do $3 \cdot 10^3$ Pa), średniej (do $1 \cdot 10^{-1}$ Pa), wysokiej (do $1 \cdot 10^{-7}$ Pa), ultrawysokiej (do $1 \cdot 10^{-10}$ Pa), ekstremalnie wysokiej ($< 1 \cdot 10^{-10}$ Pa), próżni kosmicznej ($1 \cdot 10^{-4}$ do $< 3 \cdot 10^{-15}$ Pa) i próżni doskonałej (0 Pa). W zastosowaniach impregnacji próżniowej w branży spożywczej najczęściej stosowane jest ciśnienie 5 kPa, więc doprecyzowując, należałoby mówić o impregnacji niskopróżniowej (Sivamma i in., 2021).

W zastosowaniach tradycyjnych, celem impregnacji jest zapewnienie szczelności oraz likwidacja porowatości różnych materiałów. Najczęściej znajduje on zastosowanie w produkcji bloków i głowic silników w przemyśle motoryzacyjnym oraz systemów zasilania, systemów hamulcowych i elementów systemów podwozia w branży lotniczej. Firmy wykorzystujące impregnację w tego typu zastosowaniach mają siedziby w USA. W Europie lokują się jedynie przedstawiciele firm amerykańskich, choć np. koncern Henkel zajmuje się wytwarzaniem cieczy wykorzystywanych w impregnacji. Poza Europą - jedynie Indie posiadają dobrze rozwinięty rynek wykorzystujący impregnację próżniową w procesie utrwalania pędów bambusa.

Od połowy lat 90-tych XX wieku obserwuje się wzrost zainteresowania impregnacją próżniową ze strony nauk związanych z produkcją żywności. Zaczęły się pojawiać prace naukowe dotyczące wykorzystania impregnacji próżniowej w przemyśle spożywczym, gdyż proces ten w znaczący sposób przyspiesza wymianę masy w układzie ciecz - ciało stałe. Wymiana masy jest z kolei podstawą wielu innych, różnorodnych procesów stosowanych w produkcji żywności. Niestety do tej pory, w ofercie firm działających na rynku nie ma urządzeń do impregnacji surowców żywnościowych i w konsekwencji brak jest produktów wytwarzanych z użyciem impregnacji. Specyfika materiałów żywnościowych sprawia, że bezpośrednie przeniesienie wiedzy dotyczącej tego procesu z innych obszarów jego wykorzystywania nie jest możliwe. Od strony naukowej proces impregnacji surowców spożywczych nie jest jeszcze do końca poznany, stąd rynek wytwórczy podchodzi do niego z dużą rezerwą. Wiedza już zgromadzona pozwala na stwierdzenie, że impregnacja jest procesem, który umożliwia kształtowanie struktury, sensorycznych i funkcjonalnych właściwości produktów oraz

zwiększa ich stabilność fizykochemiczną (Vargas i in. 2009). W ostatnich latach obserwowany jest szybki rozwój nowej gałęzi inżynierii żywności, określanej jako: Food Matrix Engineering, która m.in. zajmuje się badaniem struktury (architektury przestrzennej) materiałów (Mebatsion i in., 2008).

Typowy przebieg procesu impregnacji próżniowej przedstawiono na rysunku 25, w formie wykresu obrazującego zmiany ciśnienia w czasie.



Rys. 25. Przebieg impregnacji próżniowej i sposoby jej realizacji (opracowanie własne na podstawie Shantz i Versmold, 2013).

Proces impregnacji próżniowej można podzielić na 4 fazy (Fito i in., 1996):

1. faza 1, to faza obniżania ciśnienia w układzie. Czas jej trwania wynosi t_A . Ciśnienie zmienia się od p_2 do p_1 . W impregnacji materiałów roślinnych, w których cieczą impregującą jest najczęściej woda i jej roztwory, stosowane są ciśnienia p_1 o wartości wyższej niż ciśnienie, w którym woda ulega wrzeniu w danej temperaturze. Woda wrze w temperaturze 20°C , pod ciśnieniem $2,34\text{ kPa}$, stąd najczęściej ciśnienia p_1 stosowane w impregnacji próżniowej są wyższe niż 3 kPa . Ta faza impregnacji jest pomijana w literaturze dotyczącej tematu. W dostępnych pracach wpływ dynamiki zmian ciśnienia na rezultaty procesu nie jest uwzględniany,
2. faza 2, to faza utrzymania obniżonego do wartości p_1 ciśnienia przez czas t_1 ,
3. faza 3, to faza przywrócenia w układzie ciśnienia atmosferycznego p_2 . Jej czas trwania wynosi t_B . Ta faza, a ściślej dynamika zmian ciśnienia w tej fazie, również nie znajduje odzwierciedlenia w dostępnych, przeprowadzonych dotąd badaniach, dotyczących wpływu różnych czynników na efekty impregnacji,

4. faza 4, to faza utrzymania układu pod ciśnieniem atmosferycznym w czasie t_2 , zwanym w literaturze czasem relaksacji.

Impregnacja próżniowa może być realizowana na wiele sposobów. W terminologii branżowej najczęściej stosowana jest klasyfikacja, w której kryterium podziału jest moment kontaktu materiału impregnowanego i cieczy impregnującej. Jeżeli kontakt ten występuje przed fazą 1, to taką impregnację nazywamy mokrą. Jeżeli kontakt cieczy impregnującej i materiału impregnowanego następuje w fazie 2, to taka impregnacja nazywana jest suchą. Dodatkowo impregnacja mokra i sucha mogą być wspomagane nadciśnieniem w fazie 4 (Fito i in., 1996).

Według lidera rynku impregnacji próżniowej w USA, firmy Godfrey & Wing Inc. wyróżniamy (Shantz i Versmold, 2013) :

- impregnację próżniową suchą (Dry Vacuum Impregnation) **DVI**,
- impregnację próżniową mokrą (Wet Vacuum Impregnation) **WVI**,
- impregnację próżniową suchą wspomaganą nadciśnieniem (Dry Vacuum Impregnation and Pressure) **DVP**.

Jest to klasyfikacja niepełna. Te trzy sposoby realizacji procesu wykorzystuje się w 95% zastosowań impregnacji na rynku komercyjnym (Shantz i Versmold, 2013).

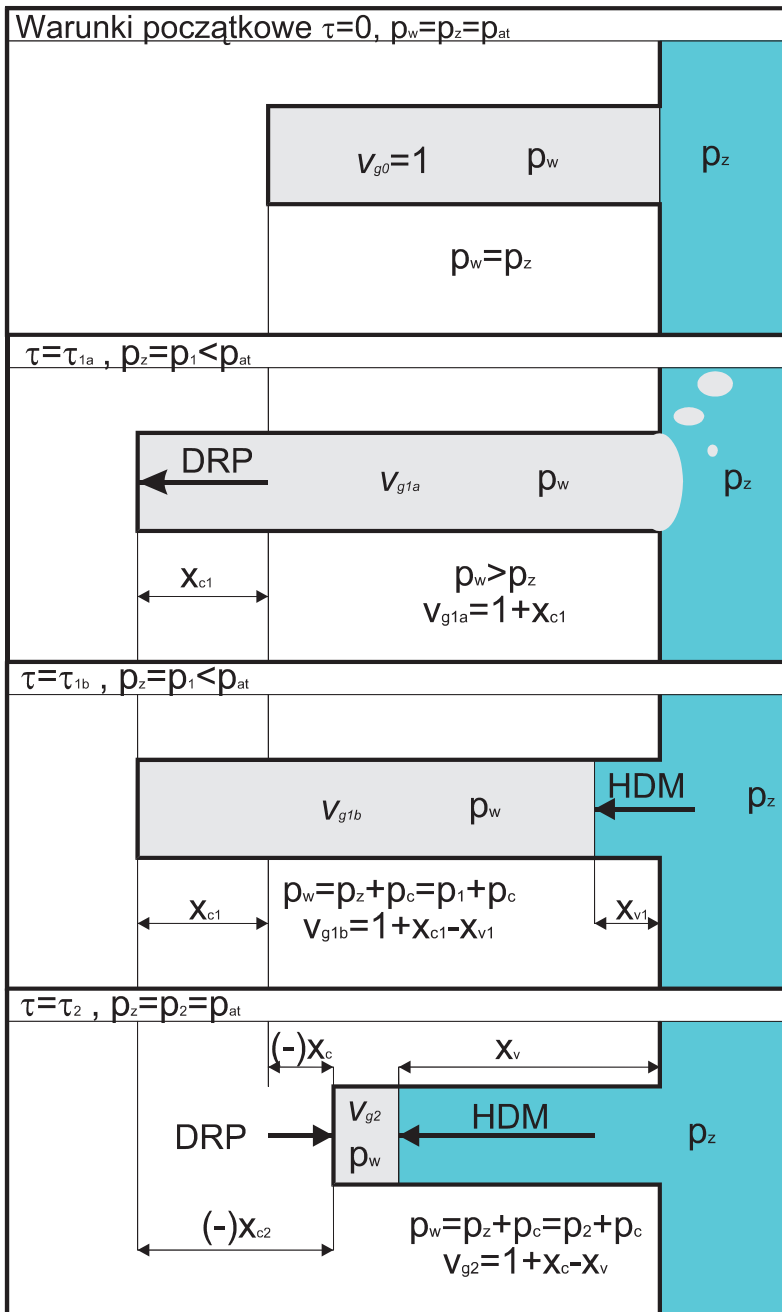
W przebiegu impregnacji próżniowej, w układzie porowaty surowiec żywnościowy – ciecz, można wyróżnić dwie grupy sprzężonych ze sobą zjawisk (Fito i in., 1996):

- zjawisko odkształcenia materiału i jego odprężenia (Deformation Relaxation Phenomena DRP) - dominujące w fazie 1 i 2 procesu,
- zjawiska związane z działaniem mechanizmu hydrodynamicznego (Hydrodynamic Mechanism HDM) - w fazach 3 i 4.

W fazie 1 i 2, w czasie t_A obniżania ciśnienia w układzie i w czasie t_1 utrzymania obniżonego ciśnienia dochodzi do odkształcenia materiału i zwiększenia jego objętości na skutek ekspansji gazu zamkniętego wewnątrz porów. W tym czasie pęcherzyki gazu wydostają się z porów, wypływają też w niewielkim stopniu substancje ciekłe znajdujące się w przestrzeniach wolnych i następuje odprężenie materiału. Ciecz impregnująca wpływa w strukturę materiału, dzięki działaniu ciśnienia kapilarnego (Fito i in. 1996).

W fazach 3 i 4, przywrócenie ciśnienia atmosferycznego w układzie prowadzi do wtłoczenia cieczy impregnującej w strukturę materiału dzięki działaniu HDM. Na tym etapie występuje również zjawisko odkształcenia i odprężenia materiału, oddziaływanie to w tych fazach procesu ma jednak przeciwny zwrot niż w fazie 1 i 2 (kompresja). Objętość porów zmniejsza się, aż do ustalenia się nowej równowagi (Fito i in. 1996).

Działanie DRP i HDM zaprezentowano na rysunku 26.



Rys. 26. Przemiany zachodzące w układzie materiał – ciecz w czasie impregnacji próżniowej (Fito i in., 1996)

Impregnacja próżniowa jest więc procesem, który prowadzi do przyspieszenia procesu osmozy, który wspomagany jest przez sprzężenie działania HDM i DRP. Zabieg ten może więc być stosowany w realizacji procesów, których siłą napędową jest wymiana masy w układzie ciało stałe – ciecz, np. w procesach, których celem jest modyfikacja składu żywności, jej wzbogacenie w składniki odżywcze, czy też probiotyki (Betoret i in., 2015). Należy dodać, że istnieje wiele naukowych dowodów popartych badaniami mikroskopowymi, że impregnacja nie narusza pierwotnej, naturalnej struktury komórkowej tkanek surowców żywnościowych (Chiralt i in., 1999).

Fito i in. (1996) analizowali zjawiska zachodzące w czasie impregnacji próżniowej na granicy kontaktu materiału (surowca roślinnego) poddawanego procesowi i otaczającej go cieczy, przy założeniu, że pory tego materiału mają kształt cylindryczny. Graficzny obraz tej analizy przedstawiono na rysunku 27.

Ilość gazu zamkniętego w porach charakteryzuje objętość względna v_g , określana jako stosunek objętości gazu zamkniętego w porze do objętości gazu w porze w warunkach początkowych ($\tau=0$).

W warunkach początkowych przyjmuje ona wartość (Fito i in., 1996) :

$$v_{g0}=1. \quad (1)$$

Materiał biologiczny charakteryzuje się porowatością określoną jako (Fito i in., 1996) :

$$\varepsilon_e = \frac{v_{g0}}{v_0} \cdot 100. \quad (2)$$

Stan równowagi ciśnień wewnętrznego p_w i zewnętrznego p_z w warunkach początkowych ($\tau=0$) zostaje zachwiany wraz z obniżaniem ciśnienia w otoczeniu. W tym czasie gazy wpływają z porów i dochodzi do ich deformacji (DRP) (rysunek 27).

Wielkość tej deformacji opisuje objętość względna pora wywołana deformacją x_c , określona jako stosunek przyrostu objętości wywołanego deformacją i objętości pora w warunkach początkowych ($\tau=0$).

Następnie do wnętrza porów wpływa otaczająca je ciecz, zajmując część ich objętości dzięki działaniu ciśnienia kapilarnego p_c . Wielkość części pora, którą penetruje ciecz charakteryzuje objętość względna pora zajmowana przez ciecz x_v , określona jako stosunek objętości części pora zajmowanej przez ciecz i objętości pora w warunkach początkowych ($\tau=0$). Wraz z wejściem cieczy do pora zaczyna działać mechanizm wymiany masy HDM. Po obniżeniu ciśnienia w otoczeniu do p_1 (rysunek 27) objętość względna gazu zamkniętego w porze przedstawia się równaniem:

$$v_{g1b}= 1+x_{c1}-x_{v1}. \quad (3)$$

W ostatniej fazie procesu w otoczeniu przywracane jest ciśnienie atmosferyczne – p_2 (rysunek 27). Objętość względna gazu zamkniętego w porze zmienia się i przyjmuje wartość (Fito i in., 1996) :

$$v_{g2}= 1+x_c-x_v. \quad (4)$$

Uwzględniając całkowitą objętość materiału – ilość cieczy, która wniknęła do jego wnętrza w wyniku działania HDM charakteryzuje objętość względna materiału zajmowana przez ciecz X , określona jako stosunek sumarycznej objętości części porów, które zajmuje ciecz i objętości materiału w warunkach początkowych ($\tau=0$) (Fito i in., 1996):

$$X = \varepsilon_e x_v. \quad (5)$$

Natomiast stopień deformacji materiału określony jako stosunek sumarycznej objętości części porów wywołany ich deformacją i objętości materiału w warunkach początkowych ($\tau=0$) wyrażony jest równaniem (Fito i in., 1996):

$$\gamma = \varepsilon_e x_c. \quad (6)$$

Zmiany ciśnienia w układzie materiał – ciecz wywołują izotermiczną kompresję gazu zamkniętego w porach. Przemianę tę można opisać równaniem (Fito i in., 1996):

$$\frac{v_{gj+1}}{v_{gj}} = \frac{p_j}{p_{j+1}}. \quad (7)$$

Po procesie impregnacji próżniowej i sprowadzeniu ciśnienia w układzie do atmosferycznego (rysunek 27) otrzymujemy równanie (Fito i in., 1996):

$$\frac{v_{g2}}{v_{g1a}} = \frac{p_1}{p_2 + p_c} = \frac{1}{r_2} = \frac{1 + x_c - x_v}{1 + x_{c1}}. \quad (8)$$

Po pomnożeniu składników równania (8) przez ε_e i wprowadzeniu wielkości (Fito i in., 1996):

$$\gamma_1 = \varepsilon_e x_{c1}, \quad (9)$$

otrzymujemy (Fito i in., 1996):

$$X - \gamma = (\varepsilon_e + \gamma) \cdot \left(1 - \frac{1}{r_2}\right) - \gamma_1. \quad (10)$$

Stąd ε_e opisane może być równaniem (Fito i in., 1996) :

$$\varepsilon_e = \frac{(X - \gamma) \cdot r_2 + \gamma_1}{r_2 - 1}. \quad (11)$$

W bardzo małych ciśnieniach p_1 , r_2 przyjmuje duże wartości oraz przy założeniu braku deformacji materiału mamy (Fito i in., 1996):

$$(X - \gamma) \cdot r_2 \gg \gamma_1 \quad (12)$$

oraz

$$\gamma = 0. \quad (13)$$

Przy takich uproszczeniach otrzymujemy równanie, określające objętość względną materiału zajmowaną przez ciecz impregnującą (Fito i in., 1996):

$$X = \varepsilon_e \left(1 - \frac{1}{r_2}\right).$$

(14)

Równanie to nie uwzględnia deformacji struktury porów w czasie zmian ciśnienia w układzie (Fito i in. 1996).

Eksperymentalne wyznaczenie X , γ , czy ε_e nie jest proste, mimo to podejmowane są takie próby. Metodyka takich badań opiera się na dokładnym i ciągłym pomiarze masy impregnowanego materiału na wszystkich etapach procesu, również w próżni, co jest główną przyczyną trudności. Z tego wynikają pewne rozbieżności uzyskiwanych wyników w pracach różnych badaczy (Fito i in. 1996, Salvatori i in. 1998).

Dotychczas przeprowadzone badania procesu impregnacji różnych tkanek roślinnych wykazują, że materiały te zachowują się w trakcie impregnacji w zróżnicowany sposób. W tkance jabłka impregnowanej pod ciśnieniem 50 hPa i czasie $t_1=t_2=15$ min zaobserwowano silną ekspansję gazu w porach i niski poziom oddziaływania HDM w fazie próżniowej (w czasie t_1). Zjawisko to tłumaczone jest naturalnym w tej fazie wpływem cieczy z porów pod wpływem działania gradientu ciśnienia. Dopiero po przywróceniu ciśnienia atmosferycznego w układzie, obserwowano silne oddziaływanie HDM (Salvatori i in., 1998).

Z kolei tkanka mango, brzoskwini oraz pomarańczy wykazywała silną deformację struktury porowatej nie tylko w fazie próżniowej, ale również po przywróceniu w układzie ciśnienia atmosferycznego (Salvatori i in., 1998).

Warto również zwrócić uwagę, że powyższy model dotyczy tylko impregnacji mokrej (WVI), natomiast brakuje opisu fizycznego dla impregnacji suchej (DVI).

Komory próżniowe są wykonywane z różnych materiałów, przede wszystkim w zależności od wybranych parametrów impregnacji oraz rodzaju prób poddawanych obróbce. Wśród takich materiałów można wymienić stal nierdzewną, aluminium lub poliwęglan (Stutzman, 2003).

Na proces impregnacji wpływa wiele różnorodnych czynników. Najczęściej dzieli się je na dwie grupy: czynniki zewnętrzne i wewnętrzne (Derossi i in., 2012). Do zewnętrznych zaliczane są parametry samego procesu i warunki w jakich jest prowadzony oraz właściwości cieczy impregnującej, a wewnętrzne – to właściwości materiału impregnowanego.

W pierwszej grupie, wymienić należy: ciśnienie p_1 , czas utrzymywania obniżonego ciśnienia t_1 , czas odprężenia t_2 , współczynnik lepkości η i stężenie roztworu impregnującego, temperaturę, stosunek masowy produkt – roztwór, czy nawet wielkość i kształt materiału. Natomiast wewnętrzne czynniki, związane z materiałem impregnowanym, to: właściwości biologiczne i mechaniczne oraz zespół cech materiału określane w literaturze terminem „budowa przestrzenna” (*ang. three dimensional architecture*). Pojęcie to obejmuje porowatość materiału, rozmiar i kształt porów, ich przebieg itp. Wpływ wymienionych czynników często wykazuje synergizm, co rodzi trudności w hierarchizacji ich ważności (Derossi i in. 2012).

Skład roztworu, w którym zanurzony jest materiał również ma duże znaczenie. Badania, które mają wyraźny cel aplikacyjny nie koncentrują się wyłącznie na samym procesie, ale także na kompozycji cieczy impregnujących. Na rynku komercyjnym to kompozycja cieczy impregnującej stanowi zasadnicze „know-how”, gdyż tylko jej skład i właściwości są możliwe do utrzymania w tajemnicy. W literaturze naukowej można też napotkać roztwory, o których kompozycji autorzy milczą, a których funkcja jest wyraźnie innowacyjna np. zabezpieczenie produktu przed rozrywaniem i rozpadaniem się komórek podczas osuszania, puszgowania lub zamrażania (Cruz i in., 2009).

Niska lepkość roztworu szczególnie sprzyja mechanizmowi hydrodynamicznemu (Betroret i in., 2015). Innym ważnym czynnikiem, który bezpośrednio wpływa na skuteczność impregnacji, jest stosunek objętości roztworu do objętości zanurzonej w nim próby. Stosowanie niewystarczającej objętości roztworu może skutkować nierównomiernym nasiąkaniem próby, obniżona wówczas jest skuteczność penetracji (Salvatori i in., 1998).

Kolejnym czynnikiem, który wpływa na skuteczność impregnacji jest przygotowanie materiału do procesu. Przykładowo, w doświadczeniach poświęconych impregnacji warzyw czy owoców, często rozważanym problemem jest sposób krojenia materiału. Na przykład, jabłka mogą być poddawane impregnacji w postaci plasterów lub kostek. Rozmiar sporządzonych kawałków (grubość) bezpośrednio będzie się przekładał na skuteczność procesu (Assis i in., 2019; González-Pérez i in., 2022).

4.1. Zastosowania impregnacji w przetwórstwie żywności

Impregnacja próżniowa uznawana jest za niedestrukcyjną technologię, która modyfikuje oryginalny skład żywności poprzez dodanie składników funkcjonalnych bez uszkodzenia struktury komórkowej (Panayampadan i in., 2022). Podczas procesu roztwór przenika w strukturę tkanek materiału. Zastosowanie obniżonego ciśnienia jest koniecznym warunkiem osiągnięcia tego celu, zwiększając wydajność transferu masy. Przy czym, czas aplikacji jest krótki, a koszty operacyjne - niskie. Ponadto, impregnacja próżniowa pozwala na równomierne dostanie się i rozprowadzenie w materiale substancji funkcjonalnych (Ertek i in., 2023). Niemniej, bardzo ważnym jest dostosowanie parametrów procesu do właściwości materiału poddawanego obróbce, a także właściwości roztworu. Chodzi o poziom ciśnienia i czas aplikacji, czas relaksacji materiału oraz uwzględnienie struktury komórkowej materiału badanego, czy właściwościach fizykochemicznych roztworu (Radziejewska-Kubzdela i in., 2014). Dziś impregnacja próżniowa jest technologią znajdującą zastosowanie w kilku sektorach przemysłu, głównie w formowaniu materiałów o strukturze niejednorodnej, konserwacji drewna czy metali i modyfikacji oraz tworzeniu produktów w sektorze spożywczym (Saleena i in., 2023).

Zastosowania impregnacji w przetwórstwie żywności można podzielić na dwie grupy, a ich celem jest (Derossi i in., 2012) :

- skrócenie czasu trwania procesów produkcji poprzez redukcję czasu trwania operacji technologicznych albo operacji przygotowawczych,
- modyfikacja składu materiału, nadanie mu nowych cech, wprowadzenie w strukturę produktu różnorodnych substancji, czyli poprawa jakości żywności.

Wartą uwagi zaletą stosowania impregnacji próżniowej w obróbce i wzbogacaniu żywności jest możliwość stosowania niskiej temperatury procesowej. Wówczas obniża się ryzyko uszkodzeń materiału poprzez narażenie na działanie zbyt wysokich temperatur (Perez-Cabrera i in. 2011). Ważną zaletą wdrażania impregnacji próżniowej do procesu technologicznego jest dodatkowe dbanie o bezpieczeństwo i jakość żywności. Roztwór impregnujący może zostać sporządzony, by zwalczać i hamować rozwój i namnażanie drobnoustrojów (Vargas i in., 2009). Częściowe usunięcie wody ze struktur komórkowych materiału, regulacja poziomu kwasowości, zabezpieczenie przed drobnoustrojami – dzięki tym efektom w wyniku końcowym można powiedzieć o wydłużonym terminie przydatności produktów

spożywczych (Castello i in., 2006). Można też mówić wówczas o podwyższeniu stabilności fizykochemicznej materiału (Galindo i Yusof, 2015).

Chiralt i in. (2001) twierdzą, że najmniej podatne na impregnację są produkty odzwierzęce (np. mięso, ser). Natomiast, o wiele bardziej podatne na ten proces są warzywa (np. marchew, ziemniaki lub buraki). Jest to związane na ogół z podatnością tkanek na impregnację, ze względu na ich wysoką porowatość oraz zawartość wody. Owoce i warzywa mogą zostać wzbogacone w dodatki za pomocą techniki impregnacji, przy czym bez wpływu na ich integralność (Occhino i in., 2011; Schulze i in., 2012). Z kolei przy obróbce mięsa, serów czy ryb, impregnacja próżniowa jest szczególnie przydatna w trakcie solenia tych produktów (Chiralt i in., 1999; Pavia i in., 1999).

Produkty pochodzenia zwierzęcego (mięso, sery), czy ryby, w swojej porowatej strukturze charakteryzują się niską objętością gazów w wolnej fazie płynnej. W tej fazie uwalnianie gazów jest spowalniane, co powoduje trudności w osiągnięciu mechanicznej równowagi na etapie aplikacji próżni. Równowaga mechaniczna musi być osiągnięta zanim ciśnienie wróci do poziomu atmosferycznego. W przeciwnym razie znacząco wzrasta wpływ czasu aplikowania próżni. Z kolei, w przypadku obróbki produktów charakteryzujących się bardziej lepką strukturą, zainicjowanie kompresji w układzie wiąże się z zamknięciem porów, co obniża efektywność procesu impregnacji lub całkowicie zakłóca jej przebieg (Fito i in., 1996).

Najbardziej zauważalne po zastosowaniu impregnacji są zmiany właściwości fizycznych materiału, przede wszystkim jego gęstości. Te zmiany z kolei prowadzą do innych, m.in. zmian w przewodności ciepła. Jest to uzależnione przede wszystkim od całkowitej porowatości powiązanej z ustawieniem kierunku strumienia ciepła, a także zastosowanych składników w roztworze impregnującym (Martinez-Monzo i in., 2000).

W literaturze można spotkać doświadczenia, gdzie jako roztworu do impregnacji używano zarówno substancji naturalnych (np. soki owocowe), ale też takich substancji jak kwas askorbinowy, dekstroza, chlorek wapnia czy chlorek sodu.

4.2 Potencjał aplikacyjny impregnacji próżniowej w słodownictwie i browarnictwie

Rozwój badań naukowych w zakresie stosowania impregnacji próżniowej w obróbce ziarna nastąpił nieco później, w stosunku do obróbki innych surowców żywnościowych. Jednak pewnym jest stwierdzenie, iż ziarno bez względu na gatunek pobiera więcej wody w warunkach podciśnienia. Zawartość wody w ziarnie o wilgotności poniżej 14% po zabiegu impregnacji pod ciśnieniem 5 kPa znacznie przekracza 20%. Z kolei, zawartość wody w ziarnie namaczanym w warunkach ciśnienia atmosferycznego w tym samym czasie i w tych samych warunkach temperaturowych nie przekracza progu 20%. Co jest również ważne, aplikacja próżni istotnie rozluźnia wiązanie okrywy nasiennej, która np. w przypadku ziarna roślin bobowatych jest wybitnie gruba i wytrzymała (Rydzak, 2005).

Jednym z najbardziej długotrwałych procesów w produkcji słodu jest kiełkowanie (słodowanie) ziarna. Z reguły, ziarno w warunkach magazynowych charakteryzuje się zawartością wody na poziomie ok. 13%. Natomiast, sład zielony (namoczony i wykiełkowany) zawiera około 40-46% wody (Back i in., 2020). Proces moczenia i słodowania może zająć nawet 72h (Gonu i in., 2023). Zarówno badania własne, jak i literatura światowa wskazują na jedną główną zaletę impregnacji próżniowej w procesie produkcji słodu, mianowicie –

istotne zmniejszenie czasu produkcji poprzez skrócenie etapu moczenia ziarna. Przykładowo, ziarno jęczmienia browarnego odmiany Kangoo w temperaturach z zakresu 12-18°C pozwala skrócić czas moczenia o około 6h, nie wywołując przy tym zmian struktury ziarna skutkujących spowolnieniem kiełkowania, czy też spadkiem zdolności i energii kiełkowania (Kobus i in., 2021; Panayampadan i in., 2022; Rydzak i in., 2023a; Rydzak i in., 2023b). Impregnacja próżniowa pozwala na szybkie usunięcie powietrza z porów i wypełnienie porowatej powierzchni ziarna wodą (Panayampadan i in., 2022).

Technika ta może również przyczynić się do zmniejszenia zużycia wody. Jednak jej zastosowanie w słodowaniu wciąż jest na etapie badań naukowych. Na przykład wysoka intensywność i krótki czas impregnacji przed kiełkowaniem ryżu spowodowały negatywny efekt w postaci zniszczenia struktur komórkowych i pęknięcia błon komórkowych, powodując niższą zdolność kiełkowania i zmniejszoną produkcję metabolitów (Kamjijam i in., 2021). Istnieje wiele pytań, zwłaszcza dotyczących jakości słodu produkowanego przy użyciu impregnacji (Gonu i Zarnkow, 2023). Wśród ważnych cech jakościowych słodu jest poziom ekstraktywności i poziom lepkości uzyskanej brzezczki. Więc, ważnym aspektem zastosowania tego procesu jest odpowiednie dobranie czasu aplikowania próżni oraz intensywności powrotu do ciśnienia atmosferycznego.

5. OBRÓBKA PROMIENIOWANIEM MIKROFALOWYM

Promienie mikrofalowe znajduje swoje zastosowanie na ogół w gospodarstwach domowych (przy rozmrażaniu produktów lub podgrzewaniu potraw). Niemniej jednak, obecnie obróbka ta wykorzystywana jest w przemyśle coraz częściej. Charakterystyczną cechą promieni mikrofalowych jest zdolność do przenikania przez tkankę surowca. Dzięki temu mikrofałe dogłębnie oddziałują na surowiec, w przeciwieństwie do promieni podczerwonych. Obecnie studiując literaturę fachową i naukową można jednoznacznie stwierdzić, iż przemysł spożywczy na szerszą skalę wykorzystuje mikrofałe zarówno w procesach odwadniania żywności, jak i do wstępnej obróbki cieplnej.

Suszenie jest jedną z najstarszych metod konserwacji żywności; jest przydatne do zachowania jakości i stabilności żywności oraz zapobiegania psuciu się i zanieczyszczeniu podczas przechowywania (Elhussein and Sahin, 2018; Ozcan-Sinir i in., 2019). Proces suszenia był badany przez dziesięciolecia przy użyciu systemów suszenia przewodzącego, konwekcyjnego i radiacyjnego do obecnych systemów suszenia na zimno (Therdthai and Zhou, 2009; Kantrong i in., 2012; Radoiu, 2020; Mingxia i in. 2024).

Procesy te są metodami stosowanymi, jednak ich czas trwania jest bardzo długi. Co więcej, suszenie konwekcyjne nie sprzyja jakości produktu, ponieważ powoduje poważne straty smaku, barwy, tekstury i zawartości składników odżywczych (Tian i in., 2015). W związku z tym poszukiwane są nowe alternatywy, aby zapewnić technologię suszenia, która pozwala na uzyskanie wysokiej jakości produktów w krótkim okresie (Xidong i in. 2015). Prawie każda metoda przetwarzania surowej żywności ma niekorzystny wpływ na niektóre jej składniki odżywcze. Akceptowalność obejmuje szeroką gamę atrybutów, takich jak atrakcyjność wizualna, aromat, smak i konsystencja (Warchalewski i in., 1998). Ogólna jakość produktu jest oceniana na podstawie szeregu parametrów. Dobra jakość jest oceniana na podstawie świeżości, oczekiwanego wyglądu, smaku i tekstury. Zmiany jakościowe, które mogą wystąpić w każdym produkcie podczas suszenia, to zmiany właściwości optycznych (barwa, wygląd), właściwości sensorycznych (zapach, smak, smak), właściwości strukturalnych (gęstość, porowatość, objętość właściwa), właściwości teksturalnych, właściwości rehydracyjnych (szybkość rehydratacji, zdolność rehydratacji) i właściwości odżywczych (witaminy, białka) (Krokida i Maroulis, 2001).

Uszkodzenia termiczne produktu podczas suszenia są wprost proporcjonalne do temperatury i czasu suszenia. Wyższa temperatura i dłuższy czas suszenia w konwencjonalnym suszeniu mogą spowodować poważne zmiany cech jakościowych produktu, takich jak smak, barwa, składniki odżywcze oraz zmniejszenie gęstości i zdolności do nawadniania suszonego produktu (Lin i in., 1998; Drouzas i in., 1999). Ze względu na wysoką temperaturę i długi czas suszenia, lotne związki są odparowywane i tracone wraz z parą wodną, co powoduje znaczną utratę charakterystycznego aromatu suszonych produktów. Utwardzanie struktury jest powszechnym problemem w suszonych owocach z powodu szybkiego suszenia. W miarę postępu suszenia tempo odparowywania wody jest szybsze niż tempo przemieszczania się wody na powierzchnię produktu, przez co zewnętrzna skórka staje się sucha (Yongsawatdigul i Gunasekaran, 1996).

Kolejną wadą konwencjonalnego suszenia żywności jest niska wydajność energetyczna. W związku z tym poszukuje się alternatywnej, wydajnej metody suszenia, która mogłaby być wykorzystana w przemyśle spożywczym w celu przetwarzania i konserwacji produktów

o wysokiej jakości. Chęć wyeliminowania istniejących problemów w suszeniu oraz osiągnięcia szybkiego i skutecznego przetwarzania termicznego spowodowała wzrost zainteresowania wykorzystaniem mikrofal do suszenia żywności.

Ogrzewanie mikrofalowe opiera się na przekształcaniu zmiennej energii pola elektromagnetycznego w energię cieplną poprzez oddziaływanie na cząsteczki polarne materiału. Najważniejszą cechą ogrzewania mikrofalowego jest ogrzewanie objętościowe (Mullin, 1995). Konwencjonalne ogrzewanie odbywa się poprzez konwekcję, a następnie przewodzenie, gdzie ciepło musi dyfundować z powierzchni materiału. Ogrzewanie objętościowe oznacza, że materiały mogą bezpośrednio i wewnątrznie absorbować energię mikrofalową i przekształcać ją w ciepło. W ogrzewaniu mikrofalowym ciepło jest generowane w całym materiale, co prowadzi do szybszego nagrzewania w porównaniu z ogrzewaniem konwencjonalnym, w którym ciepło jest zwykle przenoszone z powierzchni do wnętrza. Suszenie mikrofalowe jest spowodowane różnicami ciśnienia pary wodnej między obszarami wewnętrznymi i powierzchniowymi, które zapewniają siłę napędową do przenoszenia wilgoci (Gowen i in., 2006).

Suszenie mikrofalowe zapewnia wysoką wydajność termiczną, krótszy czas suszenia i lepszą jakość produktu w porównaniu z konwencjonalnym suszeniem gorącym powietrzem. Suszenie mikrofalowe pomaga usunąć wilgoć z produktów spożywczych bez problemu twardnienia (Prabhanjan i in., 1995). W porównaniu z suszeniem gorącym powietrzem, suszenie mikrofalowe gorącym powietrzem może znacznie skrócić czas suszenia materiałów biologicznych bez szkody dla jakości gotowych produktów (Ren and Chen, 1998). Suszenie mikrofalowe wymaga mniejszej powierzchni w porównaniu do konwencjonalnych suszarek, ponieważ postęp technologiczny umożliwia zaprojektowanie bardziej kompaktowego sprzętu, a tym samym można zwiększyć wydajność zakładu bez dodatkowej przestrzeni budowlanej. Na przykład, pieczenie chleba może być wykonane w czasie o 50% krótszym, gdy wykorzystywana jest energia mikrofalowa (Mullin, 1995). W przypadku suszenia mikrofalowego koszty operacyjne są niższe, ponieważ energia nie jest zużywana na ogrzewanie ścian urządzenia lub otoczenia (Mullin, 1995; Thuery, 1992).

Ogrzewanie mikrofalowe jako drugie po suszeniu konwekcyjnym jest szeroko stosowane w przetwórstwie żywności ze względu na jego charakterystyczne zalety w osiąganiu ogrzewania objętościowego z szybkim tempem ogrzewania, łatwą obsługą i wydajnością energetyczną (Guo i in. 2017).

W badaniach ankietowych przeprowadzonych wśród pracowników naukowych amerykańskich uczelni, promieniowanie mikrofalowe ma większy potencjał niż w przeszłości, wraz z przetwarzaniem wspomaganiem mikrofalami. Inne technologie, w tym wysokie ciśnienie, pulsujące światło i pulsujące pole elektryczne mają zdaniem badanych mniejszy potencjał (Barbosa-Cánovas, 2002; Morris, 1998).

Obecnie istnieje wiele metod termicznego przetwarzania biomateriałów. Oprócz tradycyjnego i konwencjonalnego przetwarzania ciągłego (ogrzewanie parą lub gorącą wodą pod ciśnieniem), istnieją procesy ogrzewania omowego (elektryczne ogrzewanie oporowe), obróbka mikrofalami, promieniowaniem podczerwonym lub o częstotliwościach radiowych (Saravacos i Maroulis 2011).

Metody przetwarzania nietermicznego, takie jak wysokie ciśnienie, pola elektryczne lub magnetyczne, ogrzewanie omowe, mikrofałe itp. są również łagodniejszymi metodami obróbki, choć nie są zaliczane do grupy technik minimalnego przetwarzania (Knorr 1993; Knorr 1994).

Mikrofałe używane w domowych i przemysłowych zastosowaniach grzewczych są częścią widma elektromagnetycznego o określonej częstotliwości 915 lub 2450 MHz. Fale mają zdolność przenikania do żywności i wytwarzania ciepła poprzez tarcie dipolowych cząsteczek wody, które próbują zorientować się i wyrównać z polem elektromagnetycznym. Ten efekt prowadzi do wzrostu temperatury wewnątrz materiału (Gedye i in. 1988).

Niektóre prace wskazują na efekt wyższych temperatur osiągniętych przez ogrzewanie mikrofalowe w stosunku do obróbki konwencjonalnej. Według Gedye (1988, 1991), możliwe jest, że reakcje mikrofalowe mogą prowadzić do wytworzenia innych produktów niż uzyskane przy użyciu konwencjonalnych technik. Ponieważ ogrzewanie mikrofalowe znacznie zwiększa temperaturę reakcji, możliwe jest, że temperatura reakcji mikrofalowej może przekroczyć temperaturę wymaganą do nowej reakcji, która nie była możliwa w niższej temperaturze reakcji. Mikrofałe zapewniają znacznie szybszą i bardziej wydajną (wyższą temperaturę) metodę przeprowadzania ogrzewania (Gedye i in. 1988; Gedye i in. 1991).

W latach 90-ch ubiegłego wieku o promieniowaniu mikrofalowym pisano jako o nowocześniejszej, lecz już efektywnej metodzie suszenia produktów roślinnych. Szczególnie przydatne jest to przy obróbce owoców i warzyw. Jest to związane z faktem, iż woda stanowi większość składnika dielektrycznego tych produktów roślinnych (Prabhanjan i in., 1995). W systemie suszenia mikrofalowego, mikrofałe mogą łatwo przenikać przez suche warstwy i być absorbowane bezpośrednio przez wilgoć na froncie wodnym. Szybka absorpcja energii powoduje szybkie parowanie (wrzenie) wody, tworząc strumień szybko ulatniającej się pary (Lyons i in., 1972). Niezwykle efektywnym jest również łączenie dwóch metod suszenia. Przykładowo, rozpoczęcie procesu suszenia od suszenia konwekcyjnego z wymuszonym obiegiem powietrza, a następnie zastosowanie promieni mikrofalowych. Mowa tutaj o skróceniu całkowitego czasu suszenia nawet o 80 lub 90%. Doniesienia wspominające o efektywności połączenia tych dwóch metod suszenia sięgają lat 90-ch XX wieku oraz początku XXI wieku (Prabhanjan i in., 1995; Sharma i Prasad, 2001). Łączone metody suszenia są efektywne, gdyż promienie mikrofalowe szybko i skutecznie powodują wypchnięcie pary wodnej z produktu na zewnątrz, natomiast ruch gorącego powietrza prowadzi do całkowitego usunięcia wilgotnego powietrza z komory (Andrés i in., 2004).

Co ciekawe, bardziej efektywnym jest stosowane wyższych mocy mikrofal niż niższych. Przykładowo, Ozkan i in. (2007) do suszenia liści szpinaku wykorzystali kuchenkę mikrofalową, stosując poziomy mocy 1000, 850, 750, 650, 500, 350, 160 i 90 W. Autorzy podają, że optymalną mocą do suszenia liści szpinaku jest poziom 750 W. Zachowywane są wówczas parametry jakościowe, skład chemiczny (zawartość witamin, aminokwasów), natomiast cechy organoleptyczne (barwa) są nieco zróżnicowane i przybierają pożądane wartości zarówno przy 500 W, jak i 850 W.

Warto też wspomnieć, iż promienie mikrofalowe znajdują zastosowanie również jako wstępna metoda obróbki produktów. Na przykład, mogą być używane w celu podsmażania produktów mięsnych (Cohen i Yang, 1995), ale też są skuteczne przy rozmrażaniu np. steków (Wang i Sri, 1999).

Dziś nie ulega wątpliwości, iż rynek suszonych produktów roślinnych zajmuje znaczące miejsce w branży spożywczej. Znaczący wzrost zapotrzebowania i wytwarzania takich surowców obserwowano już od lat 90-ch ubiegłego wieku (Zhang i in., 2006). Jest to związane przede wszystkim z faktem zaliczania produktów odwodnionych do tzw. żywności wygod-

nej. Wówczas charakteryzują się one odpowiednimi cechami, tj. są one gotowe do bezpośredniego spożycia lub wymagają niewielkiej obróbki kulinarnej; są porcjowane i pakowane; charakteryzują się wysoką trwałością (Pucek, 2017).

Z drugiej strony, warto wspomnieć o pewnych ograniczeniach i wadach stosowania promieni podczerwonych. Zagrożeniem wydaje się być nierównomierne ogrzewanie surowców, szczególnie zawierających wysokie odsetki wody. Poza tym, aplikowanie zbyt wysokiej mocy może prowadzić do podpalenia surowca, pęcznienia lub całkowitego wysuszenia, które nie jest odwracalne (Clark, 1996; Nijhuis i in., 1998). Dlatego też, należy zapewnić możliwość stałego ruchu rotacyjnego materiałów wewnątrz komory w czasie ogrzewania (Cohen i Yang, 1995).

Kierunki badań wpływu obróbki mikrofalami na surowce żywnościowe są dwa. Dzielone są na (Bulhões Bezerra Cavalcante i in. 2021) :

- związane z termicznymi efektami ogrzewania mikrofalowego,
- związane z nietermicznymi efektami ogrzewania mikrofalowego.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na drobnoustroje

Aby rozróżnić efekty termiczne i nietermiczne, większość badań opiera się na eksperymentalnej ocenie istniejących różnic w niszczeniu drobnoustrojów lub enzymów w trakcie ogrzewania i porównaniu efektów konwencjonalnego ogrzewania i obróbki mikrofalowej. Badania potwierdzające pozytywną rolę mikrofal w stosunku do tego powodowanego przez ciepło są jednak krytykowane za brak wiarygodnych pomiarów temperatury lub niekontrolowane ogrzewanie. Co zaskakujące, badania potwierdzające jedynie efekty termiczne nie są poddawane takiej krytyce, chociaż są przeprowadzane w podobnie wątpliwych warunkach. Przedstawiono wyniki kilku badań przeprowadzonych w warunkach ciągłego przepływu mikrofal i konwencjonalnych systemów grzewczych, aby porównać stopień zniszczenia drobnoustrojów (*E. coli*, *L. plantarum* i *S. cerevisiae*) i inaktywacji enzymów (metyloesterazy pektynowej) (Lechowicz i in., 1969; Fujikawa i in., 1992) .

Badania modelowe wykazały, że przeżywalności mikroorganizmów były prawie o rząd wielkości niższe dla mikrofal niż uzyskane w porównywalnych warunkach ogrzewania w łaźni wodnej. Takie spójne wyniki uzyskane dla mikroorganizmów i enzymów w różnych systemach wyraźnie pokazują, że śmiertelności w warunkach ogrzewania mikrofalowego nie można wyjaśnić wyłącznie na podstawie rozkładu czasowo-temperaturowego, co sugeruje istnienie dodatkowych efektów wywołanych oddziaływaniem mikrofal (Saravacos i Maroulis 2011).

W związku ze stwierdzonym dodatkowym wzmocnieniem niszczenia drobnoustrojów i enzymów przez energię mikrofalową, poniższe badania wskazują i wspierają zjawiska nietermicznych i specyficznych efektów mikrofal. Po pierwsze, należy wspomnieć o badaniu Culkin i Fung (1975). Wystawili oni pojedyncze porcje zup zaszczerpione bakteriami *E. coli* i *S. typhimurium* na działanie mikrofal o częstotliwości 915 MHz i stwierdzili, że dla dowolnego czasu ekspozycji, im bliżej szczytu znajdowały się badane organizmy, tym niższy był ich poziom przeżywalności. Zasugerowali oni, że samo ciepło generowane podczas ekspozycji na mikrofałe jest niewystarczające, aby w pełni wyjaśnić charakter śmiertelnego działania mikrofal (Culkin i Fung, 1975).

Badania wcześniejsze nie wykazały różnic w inaktywacji *E. coli* i *B. subtilis* poddanych tym samym warunkom czasowo-temperaturowym ogrzewania mikrofalowego i konwencjonalnego (Goldblith i Wang, 1967; Goldblith i in. 1968).

Lechowich i in. (1969) badali ekspozycję *S. faecalis* i *S. cerevisiae* na mikrofałe o częstotliwości 2450 MHz i konwencjonalne ogrzewanie i doszli do wniosku, że inaktywację mikrofalami można wyjaśnić wyłącznie w kategoriach ciepła generowanego podczas ekspozycji.

Zniszczenie *E. coli*, *S. aureus*, *P. fluorescens* i zarodników *B. cereus* przez promieniowanie mikrofalowe przy trzech poziomach (100, 200 i 300 W) mocy zostało zbadane przez Fujikawa i in. (1992) oraz Fujikawa (1994). Zakładając równomierne rozkłady temperatury, autorzy ci również nie znaleźli żadnej znaczącej różnicy i doszli do wniosku, że głównie efekty termiczne mogą być powodem niszczenia drobnoustrojów przez ekspozycję mikrofalową.

Dreyfuss i Chipley (1980) scharakteryzowali niektóre efekty ogrzewania mikrofalowego na komórki *S. aureus*. Oznaczyli oni wyższą aktywność enzymatyczną w komórkach poddanych działaniu mikrofal, której nie można wyjaśnić wyłącznie efektami termicznymi. Jednak wyniki nie mogą być porównywane z innymi ze względu na brak kontroli temperatury. Mudgett (1986) stworzył model śmiertelności szczepu *E. coli* w warunkach oddziaływania mikrofal i porównał ją z wartościami zmierzonymi eksperymentalnie. Eksperymentalna śmiertelność drobnoustrojów była nieco wyższa niż przewidywana przez modelowanie. Autor wyjaśnił, że mogło to wynikać z wrażliwości modelu kinetycznego na niewielkie różnice temperatury lub prawdopodobnie z efektów kinetycznych drugiego rzędu wynikających z selektywnej absorpcji energii mikrofalowej przez organizm testowy w oparciu o wysoką przewodność wewnątrzkomórkową.

W ostatnim czasie przeprowadzono szereg badań wykorzystujących różne podejścia do oceny efektów ogrzewania mikrofalowego. Koutchma (1997) badał bakteriobójczy wpływ mikrofal i konwekcyjnego ogrzewania na komórki *E. coli*. Nie stwierdził różnic w przeżywalności tych bakterii między dwoma trybami ogrzewania o identycznych profilach czasowo-temperaturowych. Wykazał, że mikrofałe powodowały większe uszkodzenia genomu komórkowego i skutkowały różnymi współczynnikami przeżywalności i interakcji w połączeniu z niskimi stężeniami nadtlenu wodoru.

Sterylizacja i dezynfekcja są niezbędnymi etapami procesu przetwarzania żywności. Powszechnie technologie obejmują sterylizację ultrawysokim ciśnieniem, sterylizację w wysokiej temperaturze, sterylizację podczerwienią itp. Jednak przetwarzanie tych metod zajmuje dużo czasu, a składniki odżywcze i naturalne właściwości żywności są łatwo uszkodzane. Sterylizacja mikrofalowa ma zalety dobrego efektu sterylizacji, krótkiego czasu przetwarzania, wygodnej obsługi i łatwej kontroli intensywności sterylizacji. Działanie bakteriobójcze mikrofal w żywności zawierającej skrobię opiera się głównie na efekcie termicznym. W porównaniu z tradycyjnymi metodami ogrzewania, mikrofałe mogą bezpośrednio przenikać do wnętrza żywności skrobiowej, a ich efekt termiczny może prowadzić do zmian właściwości składników białkowych i skrobiowych w żywności w celu osiągnięcia sterylizacji. Penumarti i in., (2017) badali wpływ obróbki mikrofalowej na poziom drobnoustrojów w mące pełnoziarnistej, a testy obciążenia mikrobiologicznego wykazały, że obróbka mikrofalowa może znacznie zmniejszyć poziom drożdży, pleśni, *Salmonelli* i *E. coli*, a po 10 minutach ogrzewania mikrofalowego poziomy tych mikroorganizmów spełniały normy określone przez

Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA) dla leków podawanych doustnie (Penumarti i in., 2017).

Li i in. (2017) zbadali wpływ obróbki mikrofalowej na śmiertelność drobnoustrojów, aktywność oksydazy polifenolowej i okres przydatności do spożycia świeżego makaronu z mąki pszennej pełnoziarnistej i stwierdził, że wzrost i szybkość namnażania mikroorganizmów zostały znacznie zahamowane, a okres przydatności do spożycia próbek po 90 s obróbki mikrofalowej został wydłużony 3-krotnie (Li i in., 2017).

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na enzymy i inne białka

Jako białka modelowe, enzymy spożywcze również przyciągają uwagę, gdy są poddawane działaniu mikrofal. Promieniowanie mikrofalowe zostało wykorzystane do katalitycznego sieciowania białek żywności indukowanego przez transglutaminazę lub laktazę, takich jak mleko i białka roślinne (Chen i Hsieh, 2016; Mu i in. 2020; Jiang i in. 2021).

Stosując procedury ogrzewania mikrofalowego i ogrzewania konwekcyjnego z tymi samymi profilami czasowo-temperaturowymi i prawie równoważnym nakładem energii zaobserwowano wpływ na aktywność enzymatyczną transglutaminazy i laktazy, zwiększając w ten sposób stopień usieciowania białek mleka podczas obróbki mikrofalowej (Cao i in. 2018; Wang i in. 2021; Cao i in. 2020). I odwrotnie, Damm i in. (2012) wykazali, że nie stwierdzono rozbieżności w rozkładzie tryptycznym białek między ogrzewaniem mikrofalowym i ogrzewaniem konwekcyjnym przy tej samej szybkości ogrzewania. Niewątpliwie na reakcje enzymatyczne drastycznie wpływają liczne warunki reakcji, takie jak źródło enzymu, środowisko reakcji i parametry mikrofalowe.

Istnieją badania, które wykazują, że ogrzewanie mikrofalowe może znacząco promować hydrolizę białek w powłoce próbek wołowiny z papainą, podczas gdy podobnego wyniku nie zaobserwowano w hydrolizie papainy w roztworze białka (Horikoshi i in. 2019). Ciepłe medium może osłabiać wpływ energii mikrofalowej na cząsteczki enzymu. Wcześniejsze badania wykazały również, że zmiany stanu wody w mieszaninie białkowo - wodnej były najważniejszymi czynnikami wpływającymi na zmiany fizykochemiczne białek podczas ogrzewania mikrofalowego (Higo i Noguchi, 2019).

Jeśli chodzi o efekty nietermiczne, to doniesienia są sprzeczne. Naukowcy zajmujący się żywnością są zdezorientowani, co do koncepcji nietermicznych efektów mikrofalowych, a w niektórych przypadkach są nawet źle rozumiani. Na przykład, zmiany spowodowane mikrofalową obróbką termiczną lub różne zjawiska występujące podczas ogrzewania mikrofalowego i ogrzewania konwekcyjnego z tą samą temperaturą końcową są zawsze uważane za efekty nietermiczne (Calabrò i Magazù, 2014; Lee i in., 2015; Gomaa i in. 2016). Oczywiście szybkość ogrzewania i pobór energii są warunkami wstępnymi do omówienia nietermicznych efektów mikrofalowych. Obecnie wdrożono szereg podejść do badania nietermicznych efektów mikrofalowych, które można podzielić na dwie kategorie: strategię izolacji pola elektromagnetycznego i strategię izolacji termicznej.

Izolacja pola elektromagnetycznego obejmuje (a) jednoczesne ogrzewanie z tą samą szybkością ogrzewania i (b) mikrofalową osłonę termiczną z materiałami pochłaniającymi mikrofałe. Izolacja termiczna obejmuje (c) promieniowanie mikrofalowe o niskiej intensywności mocy i (d) jednoczesne chłodzenie podczas ogrzewania mikrofalowego. Temat ten pozostaje jednak kontrowersyjny od dziesięcioleci (Kappe i in. 2013). Dodatkowe informacje

dotyczące koncepcyjnych i metodologicznych problemów związanych z nietermicznymi efektami mikrofalowymi można znaleźć w komentarzu omówionym przez Jiao i Fan (2022).

Woda wokół powierzchni białka odgrywa kluczową rolę w określaniu absorpcji mikrofal. Garner i in. (1990) stwierdzili, że absorpcja mikrofalowa rozpuszczalnych w wodzie biopolimerów białkowych składa się z trzech części: absorpcji w wolnej wodzie, białkach i warstwie hydratacyjnej. Z punktu widzenia spektroskopii dielektrycznej warstwa hydratacyjna białka może wpływać na proces relaksacji dielektrycznej, który jest związany z relaksacją grup aminokwasowych w makrocząsteczce białka i związanej wodzie.

Podjęto wiele prób oceny wpływu promieniowania elektromagnetycznego na biomakromolekuły (de Pomerai i in. 2000; Greschner i in. 2019; Oiao i in. 2022). Wpływ promieniowania mikrofalowego na strukturalne i funkcjonalne właściwości biomolekuł zależy od mocy mikrofal, trybu mikrofalowego i konkretnych bioaktywnych cząsteczek. Na przykład Laurence i in. (2000) stwierdzili, że impulsowa ekspozycja na mikrofały może powodować zmiany konformacyjne białek w układach biologicznych poprzez indukowanie przejściowych zmian temperatury, co oznacza, że wzorce impulsów wydają się mieć większy wpływ na układ biologiczny i makrocząsteczki (Liu i in. 2021).

Mikrofalowe ogrzewanie żywności jest kamieniem milowym w postępie technologicznym w dziedzinie rolno-spożywczej (Siegrist i Hartmann, 2020), ale jedna rzecz wydaje się być jasna: ogrzewanie to ogrzewanie, a cząsteczki wody wokół białek mogą działać jako posłańcy energii mikrofalowej. Nierówny wkład energii i różnice w szybkości ogrzewania mogą być prawdziwym winowajcą zmian strukturalnych i funkcjonalnych w białkach żywności podczas obróbki mikrofalowej. Wiąże się to również z kluczowym pytaniem naukowym: jak ustalić równoważny proces przenoszenia ciepła w celu porównania różnych metod ogrzewania.

Ogólnie rzecz biorąc, zapożyczyliśmy się z innych dyscyplin, aby dostarczyć podstawowych informacji na temat interakcji między mikrofalami a biomakromolekułami. Natężenie pola elektrycznego podczas mikrofalowego przetwarzania żywności jest niewystarczające, aby spowodować bezpośrednie zmiany w strukturze białek. Chociaż efekty nietermiczne wydają się bardziej prawdopodobne do wystąpienia w wysokich temperaturach (Bulhões Bezerra Cavalcante i in., 2021), znaczną część specyficznych efektów mikrofalowych w przetwarzaniu żywności należy przypisać nierównomiernemu ogrzewaniu i tworzeniu mikroskopijnych mikrofalowych hotspotów (Zhao i in., 2022).

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na skrobię

Skrobia jest tanim, odnawialnym i biodegradowalnym polimerem węglowodanowym o wzorze cząsteczkowym $(C_6H_{10}O_5)_n$. Zazwyczaj składa się z 25-30% polimeru o łańcuchu liniowym amylozy i 70-75% polimeru amylopektyny (Wang i in., 2020; Mingxia i in., 2024).

Wśród nich amyloza jest tworzona przez D-glukozę połączoną wiązaniami α -1,4-glikozydowymi i ma prawoskrętną strukturę spiralną. Główny łańcuch amylopektyny również składa się z D-glukozy połączonej wiązaniami α -1,4-glikozydowymi, podczas gdy rozgałęzione łańcuchy są połączone z głównym łańcuchem wiązaniami α -1,6-glikozydowymi, tworząc wysoce rozgałęzioną strukturę. Skrobia jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych naturalnych polimerów w przyrodzie (Ruhul Amin i in., 2019) i występuje głównie w postaci granulek w owocach, nasionach, bulwach i korzeniach roślin (Oyeyinka i in., 2021). Ze względu na swoje zielone, jadalne, odnawialne i biodegradowalne właściwości, jest szeroko

stosowana w takich dziedzinach jak żywność, medycyna, przemysł chemiczny i tekstylny (Oktay i in., 2024).

Jednak natywna skrobia jest słabo odporna na ekstremalne warunki przetwarzania (takie jak wysoka temperatura, wysokie ciśnienie, ścinanie itp.) napotykanego podczas przetwarzania i często konieczna jest modyfikacja skrobi w celu poprawy jej właściwości i poszerzenia jej zastosowania (Wang i in., 2022).

Metoda modyfikacji skrobi obejmuje głównie metodę fizyczną, chemiczną, enzymatyczną i modyfikację kompozytową (Ye i Baik, 2023). Modyfikacja fizyczna jest prostą, ekonomiczną i przyjazną dla środowiska metodą modyfikacji. Można ją podzielić na procesy modyfikacji termicznej i nietermicznej, a promieniowanie mikrofalowe jest jednym z rodzajów modyfikacji termicznej.

Ostatnio, promieniowanie mikrofalowe, będące modyfikacją fizyczną, jest szeroko stosowane w modyfikacji skrobi ze względu na jego zalety, takie jak przyjazność dla środowiska i mniejsza czasochłonność, wysoka wydajność, jednolite promieniowanie energetyczne, dobra przenikalność, mniejsza utrata wartości odżywczych (Brasoveanu i Nemtanu, 2014, Mingxia i in., 2024).

Wielu naukowców badało wpływ modyfikacji mikrofalowej na właściwości fizykochemiczne skrobi, takie jak morfologia granulek, charakterystyka krystalizacji i kleikowania, i uzyskało cenne wyniki (Li i in., 2021; Zhong i in., 2019). Według doniesień, czynniki takie jak źródło skrobi, zawartość wilgoci, moc mikrofal i czas ogrzewania mają różny wpływ na właściwości fizykochemiczne skrobi w jej modyfikacji mikrofalowej (Han i in., 2021).

Ogólnie rzecz biorąc, wysoka zawartość wilgoci i wysoka moc mikrofal mogą przyspieszyć fragmentację granulek skrobi. Właściwości fizykochemiczne skrobi różnego pochodzenia botanicznego różnią się po napromieniowaniu mikrofalami.

Wiele badań wykazało, że w porównaniu z pojedynczą modyfikowaną skrobią, podwójnie modyfikowana skrobia ma lepszą funkcjonalność i nowatorstwo oraz może być lepiej stosowana w przetwórstwie spożywczym (Kumari i Sit, 2023; Sun i in., 2022; Sun i in., 2023). Na przykład, w porównaniu z pojedynczą modyfikacją, skrobia ryżowa modyfikowana za pomocą mikrofal i zimnej plazmy ma niższą krystaliczność, lepkość szczytową i siłę pęcznienia, podczas gdy zawartość skrobi odpornej znacznie wzrasta (Sun i in., 2022; Mingxia i in., 2024).

Mechanizm ogrzewania mikrofalowego obejmuje efekt polaryzacji elektromagnetycznej i efekt ogrzewania dielektrycznego (Brasoveanu i Nemtanu, 2014; Fan i in., 2014; Palav i Seetharaman, 2006). Pierwszy z nich działa bezpośrednio na próbkę poprzez energię fotonów fali elektromagnetycznej (2,45 GHz), jednak energia jest zbyt niska, aby rozerwać wiązania wodorowe i wiązania chemiczne w cząsteczkach i zwykle nie powoduje zmian chemicznych (Nüchter i in., 2004).

Effekt ogrzewania dielektrycznego mikrofalami w roztworze skrobi wynika z niezdolności polarnych cząsteczek wody do natychmiastowego reagowania na zmiany kierunku pola magnetycznego i może generować energię cieplną tylko poprzez wzajemne tarcie i kolizje. Powoduje to wzrost temperatury granulek skrobi, co zmienia strukturę i właściwości fizykochemiczne skrobi (Fan i in., 2013; Fan i in., 2012; Lewandowicz i in., 2000).

Można zauważyć, że ciepło dostarczane przez promieniowanie elektromagnetyczne może powodować znaczące zmiany w strukturze i funkcji skrobi, nawet jeśli czas ogrzewania mikrofalowego jest bardzo krótki (< 1 min) (Oyeyinka i in., 2019).

Mikrofale mogą bezpośrednio lub pośrednio indukować szereg zmian w morfologii i właściwościach fizykochemicznych granulek skrobi, które są ściśle związane z właściwościami dielektrycznymi systemu. Właściwości dielektryczne odnoszą się do reakcji związanych ładunków (ładunków, które mogą poruszać się tylko w liniowym zakresie cząsteczek) na przyłożone pole elektryczne i są ważnym wskaźnikiem oceny zdolności żywności do pochłaniania mikrofalowej energii elektromagnetycznej i przekształcania jej w energię cieplną (Tao i in., 2020).

Zhu i Guo (2017) stwierdzili, że gdy zawartość wilgoci była niska (15,1 - 29,5%), stała dielektryczna i współczynnik strat dielektrycznych skrobi rosły powoli wraz ze wzrostem zawartości wilgoci, a gdy zawartość wilgoci wzrosła do 43,1%, stała dielektryczna i współczynnik strat dielektrycznych skrobi gwałtownie wzrosły. Ponadto, na właściwości dielektryczne skrobi wpływa również temperatura (Motwani i in., 2007), częstotliwość promieniowania mikrofalowego (Piyasena i in., 2003) oraz stężenie jonów soli (Fan i in., 2017).

Skrobia ma złożoną strukturę molekularną i należy do materiałów dielektrycznych o niskiej stratności. Słabo pochłania i przekształca energię mikrofalową. Właściwości dielektryczne skrobi w dużej mierze zależą od ilości wolnej wody w wodnym roztworze skrobi. Cząsteczki wody są typowymi dipolami, o silnej reakcji na pola elektromagnetyczne. W emulsjach skrobiowych o wysokiej zawartości wilgoci zawartość wolnej wody jest wysoka, płynność próbk jest dobra, a polarne cząsteczki wody silnie reagują na pole elektromagnetyczne. W tym momencie stała dielektryczna i współczynnik strat dielektrycznych skrobi gwałtownie rosną wraz ze wzrostem zawartości wilgoci (Zhu i Guo, 2017).

W przypadku emulsji skrobiowych o niskiej zawartości wilgoci, zawartość wolnej wody jest niska, a cząsteczki wody występują głównie w obszarze krystalicznym lub w zagłębieniu struktury skrobi, ściśle wiążąc się z grupami hydroksylowymi w cząsteczkach skrobi poprzez wiązania wodorowe. W tym czasie wpływ zawartości wilgoci na stałą dielektryczną skrobi jest stosunkowo niewielki. Na przykład, w swoich badaniach nad skrobią ziemniaczaną, Zhu i Guo (2017) stwierdzili, że gdy zawartość wilgoci była niska (15,1 - 29,5%), stała dielektryczna i współczynnik strat dielektrycznych skrobi rosły powoli wraz ze wzrostem zawartości wilgoci, a gdy zawartość wilgoci wzrosła do 43,1%, stała dielektryczna i współczynnik strat dielektrycznych skrobi gwałtownie wzrosły. Ponadto, na właściwości dielektryczne skrobi wpływa również temperatura (Motwani i in., 2007), częstotliwość promieniowania mikrofalowego (Piyasena i in., 2003) oraz stężenie jonów soli (Fan i in., 2017).

Skrobia natywna o różnym pochodzeniu botanicznym ma różne formy granulek, w tym kuliste, elipsoidalne, płatkowate, wielokątne i nieregularne rurkowate. Różne czasy i temperatury ogrzewania mikrofalowego mają różny wpływ na morfologię granulek skrobi. Na przykład zbadano wpływ obróbki mikrofalowej na granulki skrobi ziemniaczanej i stwierdzono, że naturalna skrobia ziemniaczana wykazuje wyraźny i regularny owalny kształt. Pęknięcia lub złamania pojawiły się na powierzchni po 5 - 10 s mikrofalowania i gdy temperatura wzrosła do 55°C, ale integralność granulek nie została uszkodzona. Po obróbce mikrofalowej przez 15-20 s i wzroście temperatury do 95°C, granulki skrobi zaczęły się zapadać i wykazywały poważne odkształcenia, pęknięcia i rozpad (Xie i in., 2013).

Oyeyinka i in., (2020, 2021), wskazał, że większość lokalnej rodzimej skrobi manioku miała nieregularny kształt, z niewielką ilością wielościennych granulek i nie było widocznych zmian w morfologii granulek po 5-15 s przy mocy mikrofal 700 W, po ogrzewaniu

przez 30 s, na powierzchni granulek zaczęły pojawiać się puste przestrzenie, a po ogrzewaniu przez 60 s, pory krytycznie wzrosły (Oyeyinka i in., 2020, 2021).

Zawartość wilgoci w skrobi może również wpływać na morfologię granulek, a wysoka zawartość wilgoci może pomóc energii mikrofalowej przeniknąć do granulek skrobi, tworząc więcej porów i zwiększając zapadanie się skrobi. Na przykład, gdy skrobia ryżowa jest modyfikowana metodą mikrofalową i hydrotermiczną, zapadanie się powierzchni granulek skrobi jest bardziej widoczne, gdy zawartość wilgoci wynosi 35% niż gdy wynosi 15% (Guo i in., 2019).

Jiang i in. (2023) poddali skrobię kukurydzianą działaniu mikrofal (300 W przez 2 min), hydrolizie enzymatycznej (α -amylaza i amyloglukozydaza), hydrolizie enzymatycznej wspomaganą mikrofalami, a wyniki wykazały, że na powierzchni granulek skrobi poddanych działaniu mikrofal i hydrolizie enzymatycznej powstała duża liczba porów, przy czym ta ostatnia ma większe pory powierzchniowe i dużą liczbę zapadających się porów; Powierzchnia granulek skrobi poddanych działaniu mikrofal i hydrolizie enzymatycznej również wykazywała dużą liczbę porów, ale ich pory były gęste i małe, a integralność granulek skrobi nie została naruszona.

Różne metody modyfikacji mają różny wpływ na krystaliczność i formę krystaliczną skrobi. Jiang i in. (2023) zmodyfikowali skrobię kukurydzianą odpowiednio metodą mikrofalową, enzymatyczną i mikrofalowo-enzymatyczną i wskazali, że forma krystaliczna skrobi była nadal typu A, ale krystaliczność uległa zmianie - krystaliczność skrobi poddanej działaniu mikrofal maleje, a krystaliczność skrobi poddanej działaniu enzymów i mikrofal wzrasta.

Yang i in. (2017) zgłosili, że rozgałęzienia w amylopektynie są głównymi składnikami krystalizacji granulek skrobi, a promieniowanie mikrofalowe preferencyjnie niszczy wiązanie α -1,6-glikozydowe w amylopektynie, zmniejszając krystaliczność (Yang i in., 2017). Wzrost krystaliczności skrobi po hydrolizie enzymatycznej może być spowodowany tym, że enzym preferencyjnie hydrolizuje amorficzną strukturę skrobi, zwiększając w ten sposób udział regionów krystalicznych (Dura i Rosell, 2016).

Jednakże, obróbka mikrofalowa skrobi przed hydrolizą enzymatyczną rozbija rozgałęzioną strukturę skrobi, umożliwiając cząsteczkom enzymu lepsze wejście do wnętrza granulek skrobi, dzięki czemu krystaliczność skrobi uzyskanej w wyniku hydrolizy mikrofalowo-enzymatycznej jest większa niż w przypadku hydrolizy enzymatycznej (Yang i in. 2017; Mingxia i in., 2024).

Kleikowanie odnosi się do procesu mieszania skrobi z wodą, podgrzaną do określonej temperatury, a granulki skrobi zaczynają pęcznieć i ostatecznie tworzą jednolity roztwór. Kleikowanie skrobi składa się z 3 etapów: odwracalnego etapu absorpcji wody, nieodwracalnego etapu absorpcji wody i etapu rozpadu granulek skrobi (Zhang i in., 2009).

Dane dotyczące modyfikacji skrobi za pomocą ogrzewania mikrofalowego ogólnie pokazują, że temperatura kleikowania skrobi modyfikowanej ogrzewanej mikrofalowo jest ogólnie podwyższona. Na przykład przeprowadzono napromieniowanie mikrofalami skrobię z soczewicy i stwierdzono, że temperatura kleikowania skrobi naturalnej wynosiła 67,5°C, podczas gdy temperatura kleikowania skrobi modyfikowanej wzrosła do 72°C (Gonzalez i Perez, 2002). Podobnie, Zhang i in. (2009) uzyskali ten sam wynik poprzez obróbkę mikrofalową bloków lodu bananów (60,94°C). Gdy moc mikrofal wynosi 800 W, temperatura kleikowania wzrasta do 72°C.

Zmiana siły pęcznienia skrobi jest związana ze zmianą krystalicznych i amorficznych obszarów skrobi. Obszar krystaliczny wewnątrz granulek skrobi jest zmieniany podczas ogrzewania mikrofalowego, tak że rozkład obszaru krystalicznego wewnątrz granulki skrobi jest bardziej losowy, co powoduje zmniejszenie ekspansji skrobi (Luo i in., 2006). Może to wynikać z faktu, że skrobia amylozowa oddziałuje z lipidami, a mikrofałe promują tę interakcję, dodatkowo zapobiegając nawodnieniu i pęcznieniu granulek skrobi. Na siłę pęcznienia skrobi wpływa również stopień usieciowania. Ogólnie rzecz biorąc, im wyższy stopień usieciowania, tym niższa siła pęcznienia skrobi (Brasoveanu i Nemetanu, 2014).

Większość badań wykazała, że ogrzewanie mikrofalowe zmniejsza lepkość skrobi, a im dłuższy czas ogrzewania mikrofalowego, tym wyraźniejszy spadek lepkości (Yang i in., 2017).

Właściwości kleikowania skrobi mogą być również związane z zawartością amylopektyny. Ma i in. (2020) przeprowadzili wstępną obróbkę mikrofalową skrobi jęczmiennej niewoskowej i woskowej, stwierdzając, że lepkość szczytowa skrobi jęczmiennej niewoskowej najpierw wzrosła, a następnie spadła wraz ze wzrostem czasu ekspozycji mikrofal (0, 60, 120 i 180 s), a lepkość szczytowa przy 180 s jest niższa niż lepkość szczytowa skrobi naturalnej. W przeciwieństwie do tego, szczytowa lepkość woskowej skrobi jęczmiennej wykazywała tendencję wzrostową. Jest to uzasadnione, ponieważ uważa się, że amylopektyna ogromnie zwiększa lepkość, podczas gdy amyloza ogranicza wzrost lepkości skrobi.

Zastosowanie żywności skrobiowej poddanej obróbce mikrofalowej koncentruje się głównie na przetwarzaniu ryżu i żywności mącznej. Xue i in. (2008) przygotował częściowo wstępnie żelowany makaron poprzez podgrzanie ciasta za pomocą mikrofal, co skróciło czas gotowania makaronu.

Podgrzewanie mikrofalowe jest powszechnym sposobem przetwarzania żywności, a proces podgrzewania zależy głównie od właściwości dielektrycznych żywności, czyli charakterystyki odpowiedzi mikrofalowej i głębokości penetracji żywności, podczas gdy czynniki takie jak gęstość, geometria i grubość żywności mogą wpływać na efekt podgrzewania poprzez wpływ na rozkład ciepła w próbce. Doniesiono, że szybkość ogrzewania żywności zmienia się w zależności od masy, grubości i właściwości dielektrycznych żywności w warstwie żywności. Na przykład Soto-Reyes i in. (2015). wykorzystali mikrofałe do ogrzewania modelowych systemów żelowych o różnych kształtach przygotowanych z agaru (5%) i sacharozy (5%), ujawniając, że geometria żywności była głównym czynnikiem wpływającym na równomierność ogrzewania mikrofalowego (Soto-Reyes i in., 2015). Van Remmen i in. (1996). wykorzystał prosty model matematyczny do obliczenia przenikania energii mikrofalowej do żywności i odkrył, że ogrzewanie żywności o kształcie kulistym i cylindrycznym koncentruje się głównie w ogniskowym punkcie żywności. (

Istnieją również eksperymenty, które symulują dynamiczną zmianę właściwości dielektrycznych zamrożonych bułek gotowanych na parze podczas rozmrażania mikrofalowego i stwierdzono, że w zakresie temperatur 10-95°C przewodność cieplna zamrożonych bułek wzrasta wraz ze wzrostem gęstości (Song i in., 2018).

Większość raportów z badań nad modyfikowaną mikrofalami skrobią koncentrowała się na skrobi kukurydzianej, ziemniaczanej i ryżowej, a wpływ mikrofal na właściwości fizykochemiczne innych obiecujących źródeł skrobi, takich jak skrobia z roślin strączkowych, może być dalej udoskonalany w przyszłości.

Według doniesień, obecnie nie ma zastosowania skrobi modyfikowanej obróbką mikrofalową w przemyśle spożywczym, ale niektóre badania wykazały, że skrobia taka ma ogromny potencjał w zastosowaniach spożywczych i medycznych.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na barwę

Ciepło generowane przez energię mikrofalową jest pochłaniane głównie przez produkt, a nie w ściankach kuchenki lub atmosferze. Dlatego straty ciepła z pieca do otoczenia są znacznie niższe, co zapewnia bardziej komfortowe temperatury pracy. W przypadku ogrzewania mikrofalowego możliwe są: szybkie uruchamianie i wyłączanie oraz precyzyjna kontrola procesu. (Warchalewski i in., 1998).

Suszenie mikrofalowe jest najskuteczniejsze przy wilgotności produktu poniżej 20%; dlatego sugeruje się, że energia mikrofalowa powinna być stosowana w okresie spadku szybkości lub przy niskiej zawartości wilgoci w celu zakończenia suszenia (Maskan, 2000), ponieważ przy wysokiej zawartości wilgoci koszt procesu nagrzewania powietrza gazem ziemnym wynosi tylko 30% kosztu energii mikrofalowej. Ponadto przy niskiej zawartości wilgoci usuwanie wilgoci za pomocą gorącego powietrza jest powolne, podczas gdy ze względu na ogrzewanie objętościowe jest szybkie w przypadku mikrofal. Suszenie mikrofalowe przyczynia się do poprawy jakości produktu, np. lepszego aromatu, szybszego i lepszego nawodnienia, znacznych oszczędności energii i znacznie krótszego czasu suszenia w porównaniu z suszeniem gorącym powietrzem (Maskan, 2001).

Suszenie mikrofalowe ma pozytywny wpływ na szybkość suszenia, elastyczność, barwa, smak, wartość odżywczą, stabilność mikrobiologiczną, inaktywację enzymów, zdolność do rehydratacji, chrupkość i świeży wygląd (Ozcan-Sinir i in., 2019).

Barwa żywności jest ważna w tytułu jej akceptowalności, a w badaniach konsumenckich jakość produktu jest związana z barwą (Eagerman, 1978). Pogorszenie barwy zostało zbadane przez kilku badaczy dla wielu produktów. Barwa produktów jest mierzona za pomocą jasności (parametr L), zaczerwienienia lub zieloności (parametr a) oraz żółtoci lub niebieskości (parametr b), podczas lub po suszeniu. Zmiany barwy są związane z reakcjami brązowienia zachodzącymi podczas suszenia owoców i warzyw. Brązowienie owoców i warzyw podczas suszenia jest spowodowane zarówno enzymatycznymi, jak i nieenzymatycznymi reakcjami brązowienia. Wzrost wartości parametru a oznacza bardziej czerwoną barwę, co wskazuje na reakcję brązowienia. Suszenie mikrofalowe powoduje mniejszy wzrost zaczerwienienia (parametr a), co oznacza, że produkty końcowe są mniej brązowe niż konwencjonalne suszone powietrzem (Warchalewski i in., 1998).

Prabhanjan i in. (1995) badali suszenie cienkowarstwowe marchwi (*Daucus carota*) i wykazali, że produkt suszony konwekcyjnie powietrzem i mikrofalami przy połowie mocy zachowywał dobrą barwę, podczas gdy te suszone przy maksymalnej mocy mikrofal były matowe. Funebo i Ohlsson (1998) badali proces odwadniania jabłek (*Malus domestica*) i wartości parametrów L, a, b były podobne dla jabłek suszonych gorącym powietrzem i mikrofalami. Sharma i Prasad (2001) badali proces suszenia czosnku (*Allium sativum*), a wyniki wykazały, że czosnek miał jaśniejszą barwę w przypadku połączonego suszenia mikrofalowego z gorącym powietrzem w porównaniu z suszeniem samym gorącym powietrzem.

Warchalewski i in. (1998) ocenili barwę pszenicy (*Triticum aestivum*) po obróbce mikrofalowej i wykazali, że wartości parametry L, a, b były wyższe w przypadku dłuższego czasu

ekspozycji, ale doszli do wniosku, że barwa nie zmienia się, gdy unika się ekstremalnych dawek i czasu obróbki. Velu i in. (2006) badali charakterystykę mielenia na sucho kukurydzy suszonej mikrofalowo (*Zea mays L.*) i wykazali, że barwa próbki suszonej mikrofalowo była jaśniejsza niż próbki kontrolnej i suszonej konwekcyjnie.

Oduro i Clarke (1999) przeprowadzili ocenę jakości gari (sfermentowana forma manioku) (*Manihot esculenta*) wysuszonego przy użyciu energii mikrofalowej i porównali go z produktami dostępnymi na rynku. Zmierzono wartości parametrów barwy (L i b), które wskazują na jasność i zażółcenie, a wartości parametru a nie zostały zarejestrowane, ponieważ mierzą poziomy zaczerwienia, co nie jest istotne w tym przypadku. Wartości L nieznacznie wzrosły wraz z upływem czasu, tworząc jasną barwę, a wartości b również wzrosły wraz z upływem czasu, tworząc bardziej zażółcone barwy. Dopuszczalny zakres wartości barwy wynosi 80-85 w przypadku L i 17-21 w przypadku b. Czasy gotowania dłuższe niż 15 minut dawały właściwości barwy, które wykraczały poza akceptowany zakres, ale próbki gotowane między 12 a 15 minutami były uważane za wysokiej jakości gari. Wartości L i b dla gari zakupionego na rynku komercyjnym wahały się odpowiednio między 77,5-85,8 i 18-27,5. W związku z tym gari wyprodukowane przy użyciu energii mikrofalowej wykazywało mniejszą zmienność w porównaniu do gari komercyjnego.

Kathirvel i in. (2006) badali właściwości barwy kolendry siewnej (*Coriander sativum L.*), mięty (*Mentha spicata L.*), kopru (*Anethum graveolens L.*) i pietruszki (*Petroselinum crispum Mill*) suszonych na powietrzu i w kuchence mikrofalowej. Suszone mikrofalowo liście wykazywały wyższe wartości dla wszystkich parametrów barwy niż próbki suszone gorącym powietrzem. Wartość barwy najbardziej zbliżoną do barwy świeżych liści uzyskano w przypadku liści suszonych przy poziomie gęstości mocy mikrofal 90 W/g.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na inne właściwości sensoryczne

Zapach żywności jest bardzo ważny dla jej akceptowalności, a niewielka zmiana zapachu przetworzonej żywności może wpływać na ogólną jakość produktu. Lin i in. (1998) badali właściwości sensoryczne plasterów marchwi suszonych próżniowo i mikrofalowo oraz suszonych na powietrzu, które były wstępnie blanszowane w wodzie. Suszone próżniowo i mikrofalowo plastry marchwi uzyskały wyższe oceny tekstury, zapachu i ogólnej akceptowalności w porównaniu z plasterkami marchwi suszonymi na powietrzu. Sharma i Prasad (2001) przeprowadzili badanie w celu zbadania możliwości suszenia czosnku za pomocą mikrofal i gorącego powietrza. Retencja lotnych składników odpowiedzialnych za aromat była większa w przypadku suszenia mikrofalowego gorącym powietrzem w porównaniu do konwencjonalnego suszenia samym gorącym powietrzem.

Fathima i in. (2001) badali wpływ suszenia mikrofalowego na okres przydatności do spożycia i cechy sensoryczne (wygląd, barwa, zapach i ogólną jakość) kolendry (*Coriander sativum*), mięty (*Mentha spicata*), kozieradki (*Trigonella foenum-graceum*), amarantusa (*Amaranthus sp.*) i shepu (*Peucedanum graveolens*). Amarantus uzyskał podobne wyniki jak w przypadku świeżych i suszonych warzyw, jednak nastąpił znaczny spadek atrybutów sensorycznych innych warzyw. Autorzy doszli do wniosku, że suszenie mikrofalowe było bardzo odpowiednie dla amarantusa, umiarkowanie odpowiednie dla shepu i kozieradki oraz mniej odpowiednie dla kolendry i mięty.

W badaniach Warchalewskiego i in. (1998) przez panel 10 członków zostały ocenione właściwości sensoryczne ziarna pszenicy. Próbką wytwarzała zapach spalenizny lub prażonego ziarna, gdy była wystawiona na długi czas ekspozycji (180 s), ale nie było znaczącej różnicy w zapachu ziarna, gdy unikano długiego czasu ekspozycji.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na charakterystykę rehydracji

Większość odwodnionych produktów jest rehydratowana przed ich ostatecznym użyciem. Charakterystyka rehydracji suszonego produktu jest wykorzystywana jako wskaźnik jakości i wskazuje na zmiany fizyczne i chemiczne podczas suszenia a zależy od warunków przetwarzania, składu próbki, przygotowania próbki oraz zakresu zaburzeń strukturalnych i chemicznych wywołanych suszeniem (Krokida i Maroulis, 2001). Szybka absorpcja energii powoduje szybkie odparowanie (wrzenie) wody, tworząc na zewnątrz strumień szybko ulatniającej się pary (Prabhanjan i in., 1995). Oprócz poprawy szybkości suszenia, ten zewnętrzny strumień może pomóc w zapobieganiu kurczeniu struktury tkanki, co dominuje w większości konwencjonalnych technik suszenia powietrzem. W związku z tym można oczekiwać lepszych właściwości rehydracji w produktach suszonych mikrofalowo (Prabhanjan i in., 1995).

Badania nad cienkowarstwowym suszeniem marchwi przeprowadzone przez Prabhanjan i in. (1995) przy użyciu konwencjonalnego i wspomaganego mikrofalami suszenia konwekcyjnego wykazały, że kurczenie się produktu było minimalne przy najwyższym poziomie mocy mikrofal. Właściwości rehydracyjne zostały poprawione przez suszenie przy wyższych poziomach mocy mikrofal, na co wskazują wyższe wartości współczynnika rehydracji (stosunek masy próbki rehydratowanej do masy próbki odwodnionej).

Funebo i Ohlsson (1998) stwierdzili, że zdolność rehydracji nie była lepsza w przypadku suszonych mikrofalowo grzybów (*Agaricus bisporus*) i jabłek (*Malus domestica*) w porównaniu do produktów suszonych gorącym powietrzem.

Khraisheh i in. (2004) badali jakość i zmiany strukturalne ziemniaków (*Solanum tuberosum*) podczas suszenia mikrofalowego i konwekcyjnego. Wyniki wskazały, że próbki ziemniaków suszone w polu mikrofalowym wykazywały mniejszy skurcz niż próbki suszone powietrzem. Rehydracja próbek ziemniaków została określona ilościowo na podstawie współczynnika rehydracji. Właściwości rehydracyjne próbek suszonych mikrofalowo są lepsze niż próbek suszonych konwekcyjnie. Zakres rehydracji również wzrastał wraz ze wzrostem poziomu mocy. Jednak przy wysokich poziomach mocy (38 W) zaobserwowano kleikowanie skrobi, co zmniejszyło stopień rehydracji.

Maskan (2001) badał suszenie plasterów bananów gorącym powietrzem, mikrofalami i gorącym powietrzem, a następnie mikrofalami. Wykazał, że warunki suszenia nie wpływają na zdolność bananów do rehydracji.

Cui i in. (2003) badali odwodnienie czosnku przy użyciu suszenia mikrofalowo-próżniowego i powietrznego. Próbki czosnku suszono mikrofalowo-próżniowo, aż wilgotność osiągnęła 10%, a następnie konwencjonalnym suszeniem gorącym powietrzem do końcowej zawartości wilgoci poniżej 5%. Próbki wchłonęły prawie taką samą ilość wilgoci niezależnie od metody suszenia. Powodem może być to, że próbki miały postać cienkich plasterów, a woda łatwo przenikała przez powierzchnię do wnętrza próbek ze względu na duże powierzchnie styku i cienkość plasterów.

Askari i in. (2006) badali wpływ suszenia gorącym powietrzem i mikrofalami na charakterystykę rehydratacji plasterów jabłka. Zdolność rehydratacji suszonych powietrzem, liofilizowanych i suszonych mikrofalami plasterów jabłek wynosiła odpowiednio 404,6%, 484,0% i 676,0%. Zdolność do rehydratacji próbek liofilizowanych była mniejsza niż próbek poddanych obróbce mikrofalowej. Ich wyniki wykazały, że szczeliny międzykomórkowe utworzone przez energię mikrofalową mogą wchłaniać duże ilości wody podczas rehydratacji i powodować zwiększoną zdolność rehydratacji.

Maskan (2001) badał kurczliwość i charakterystykę rehydratacji owoców kiwi (*Actinidia deliciosa*) podczas suszenia gorącym powietrzem i mikrofalami. Skurcz wynosił 81% i 85% odpowiednio dla suszenia gorącym powietrzem i mikrofalami. Zaobserwowano większe i szybsze kurczenie się próbek suszonych mikrofalami, co może być spowodowane intensywnym wytwarzaniem ciepła i przyspieszonym usuwaniem wody z tkanek w próbce suszonej mikrofalami. Suszone mikrofalowo plastry kiwi wykazywały niższą zdolność do rehydratacji i szybsze wchłanianie wody niż próbki suszone powietrzem.

Kathirvel i in. (2006) badali charakterystykę rehydratacji kolendry (*Coriander sativum* L), mięty (*Mentha spicata* L), kopru (*Anethum graveolens* L) i pietruszki (*Petroselinum crispum* Mill). Współczynnik rehydratacji próbek suszonych mikrofalami miał wyższe wartości niż próbek suszonych gorącym powietrzem. Wyższy współczynnik rehydratacji przy wyższej mocy mikrofal można przypisać powstawaniu większych naprężeń wewnętrznych podczas suszenia. Wyniki badań wykazały, że liście suszone mikrofalami wykazywały mniejszy skurcz i lepszą charakterystykę rehydratacji.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na właściwości strukturalne

Właściwości strukturalne są ważne dla scharakteryzowania jakości odwodnionego produktu. Struktura materiału spożywczego może być scharakteryzowana przez jego gęstość nasypową, gęstość rzeczywistą, porowatość i objętość właściwą. Gęstość nasypowa jest określana przez masę próbki i jej objętość nasypową. Gęstość nasypowa to gęstość materiału zawierającego pory powietrzne, a zatem jest funkcją zawartości wody, rodzaju ciała stałego i proporcji objętości powietrza. Gęstość rzeczywista to gęstość z wyłączeniem wszystkich porów i jest określana na podstawie masy próbki i jej rzeczywistej objętości. Porowatość charakteryzuje ogólną otwartą strukturę odwodnionego materiału. Jest to ułamek pustej objętości i jest szacowany na podstawie gęstości nasypowej i gęstości rzeczywistej. Na porowatość duży wpływ ma metoda i warunki suszenia (Krokida i Maroulis, 2001).

Krokida i Maroulis (2001) badali właściwości strukturalne odwodnionego jabłka, banana, marchwi i ziemniaka podczas rehydratacji. Gęstość nasypowa jabłek zmniejszała się wraz z usuwaniem wody dla wszystkich metod suszenia, podczas gdy gęstość bananów, marchwi i ziemniaków czasami wzrastała, a czasami malała wraz z zawartością wilgoci w zależności od metody suszenia. Metoda suszenia znacząco wpłynęła na wartość gęstości pozornej, która była wyższa lub niższa niż początkowe wartości gęstości pozornej, odpowiednio w wyniku skurczu lub rozwoju porowatości. Skurcz objętościowy lub rozszerzenie występuje podczas suszenia lub nawadniania, co jest wyrażone jako współczynnik skurczu (lub rozszerzenia).

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na właściwości teksturalne

Tekstura jest jedną z ważnych cech wskazujących na jakość produktu. Właściwości tekstury są zwykle powiązane z testami mechanicznymi, które badają lepkość sprężyste zachowanie materiału (Krokida i Maroulis, 2001). Właściwości teksturalne odwodnionych produktów są zwykle mierzone jako siła przebicia, która jest miarą twardości powierzchni produktu i jest wskaźnikiem stopnia utwardzenia obudowy, który wystąpił podczas suszenia (Lin i in., 1998).

Lin i in. (1998) badali charakterystykę tekstury plasterów marchwi suszonych próżniowo i mikrofalowo, suszonych powietrzem i liofilizowanych. Siła przebicia wymagana do przełamania plasterów marchwi suszonych próżniowo i powietrzem wynosiła odpowiednio 11,0 i 18,1 N, co wskazuje, że w przypadku plasterów marchwi suszonych próżniowo wystąpiło mniejsze utwardzenie. Liofilizowane plasterki marchwi wymagały najmniejszej siły przebicia.

Funebo i in. (2002) badali mikrofalowe odwadnianie konwekcyjne plasterów jabłka. Twardość odwodnionych kawałków jabłek wzrastała liniowo wraz z temperaturą podczas odwadniania, a jabłka były prawie dwukrotnie twardsze podczas odwadniania w temperaturze 70°C w porównaniu z 50°C. Te odwodnione próbki były 5-9 razy twardsze niż świeże jabłka.

Yongsawatdigul i Gunasekaran (1996) badali mikrofalowo-próżniowe suszenie żurawiny. Stwierdzono, że siła wymagana do cięcia żurawiny suszonej mikrofalowo i produktu suszonego gorącym powietrzem była porównywalna; podczas gdy żurawina suszona mikrofalami w trybie ciągłym lub pulsacyjnym wymagała mniejszej siły cięcia. Oznacza to, że żurawina suszona mikrofalowo-próżniowo jest bardziej miękka w porównaniu do produktu suszonego konwencjonalnie.

Cui i in. (2003) badali odwadnianie plasterów czosnku suszonych różnymi metodami. Siły cięcia plasterów czosnku wykazały, że liofilizowane plasterki czosnku były najbardziej miękkie, a następnie plasterki suszone mikrofalowo-próżniowo, które były bardziej miękkie niż plasterki czosnku suszone powietrzem. Zarówno liofilizacja, jak i łączone suszenie mikrofalowo-próżniowe i powietrzne stworzyły bardzo porowatą strukturę w próbkach; jednak liofilizacja utrzymała porowatą strukturę przez cały proces suszenia, podczas gdy porowata struktura zapadła się z powodu wysokiego tempa odparowywania wody w ostatnim etapie łączonego suszenia mikrofalowo-próżniowego i powietrznego. Ten skurcz i zapadanie się stwierdzono również podczas suszenia gorącym powietrzem, co skutkowało niską szybkością transportu wody, wydłużonym czasem suszenia, a tym samym twardą teksturą.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na właściwości odżywcze

Walde i in. (2002) badali suszenie mikrofalowe pszenicy i ustalili, że całkowita zawartość białka w próbkach pszenicy suszonych mikrofalowo nie zmieniła się i pozostała taka sama jak w przypadku próby kontrolnej (9,9%), ale właściwości strukturalne i funkcjonalne białka pszenicy - glutenu uległy zmianie. Funkcjonalność glutenu uległa zmianie, co zaobserwowano poprzez brak elastyczności i rozciągliwości ciasta.

Velu i in. (2006) badali charakterystykę mielenia na sucho kukurydzy suszonej mikrofalowo (*Zea mays L.*). Suszenie mikrofalowe nie zmieniło zawartości białka mierzonej metodą Kjeldahla. Zauważono jednak pewne zmiany strukturalne w skrobi i białku. Zawartość białka i skrobi w próbkach suszonych mikrofalami wynosiła odpowiednio 10,48% i 65,66%,

podczas gdy w próbce kontrolnej zawartość białka i skrobi wynosiła odpowiednio 10,06% i 60,57%.

Pinkrova i in. (2003) badali zmiany skrobi podczas obróbki mikrofalowej ryżu. Właściwości ryżu po obróbce mikrofalowej oceniano za pomocą oznaczania całkowitej i uszkodzonej skrobi. Obróbka mikrofalowa nie wpływa na całkowitą zawartość skrobi w ryżu, ale zawartość uszkodzonej skrobi wzrasta wraz z pochłanianą energią mikrofal. Obróbka mikrofalowa nie wpływa również na jakość gotowania i przetwarzania zmielonego ryżu.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na witaminy

Energia kwantowa mikrofal w porównaniu z innymi rodzajami promieniowania elektromagnetycznego (promienie X i γ) jest zbyt niska, o kilka rzędów wielkości, aby spowodować zmiany chemiczne poprzez bezpośrednią interakcję z cząsteczkami i wiązaniami chemicznymi (Khraisheh i in., 2004). Lin i in. (1998) badali wpływ próżniowego suszenia mikrofalowego na właściwości fizyczne, wartości odżywcze i cechy sensoryczne plasterków marchwi w porównaniu z konwencjonalnym suszeniem gorącym powietrzem. Podczas testowania próbek pod kątem retencji karotenów i witaminy C, suszenie powietrzem spowodowało spadek zawartości zarówno α -, jak i β -karotenu, podczas gdy mniejsze zubożenie α -karotenu wystąpiło podczas suszenia próżniowo-mikrofalowego. Całkowita utrata α - i β -karotenu podczas suszenia wyniosła 19,2% dla próbek suszonych powietrzem i 3,2% dla próbek suszonych próżniowo i mikrofalowo. Podczas suszenia powietrzem zatrzymano tylko 38% witaminy C, podczas gdy w suszeniu próżniowo-mikrofalowym zatrzymano 79% witaminy C.

Khraisheh i in. (2004) ocenili atrybuty jakości ziemniaków (*Solanum tuberosum*) na podstawie retencji kwasu askorbinowego (witaminy C) podczas suszenia mikrofalowego i konwekcyjnego. Próbki suszone w warunkach mikrofalowych zachowały znacznie większe stężenie kwasu askorbinowego w porównaniu z próbkami suszonymi na powietrzu. Próbki suszone mikrofalami (10,5 W) zachowały około 75% początkowej zawartości witaminy C, podczas gdy próbki suszone powietrzem (30°C) zachowały mniej niż 30% początkowej zawartości witaminy C. Nawet w warunkach wyższej mocy mikrofal (38 W) retencja witaminy C przekroczyła 45%. Próbki suszone mikrofalami zachowały co najmniej dwukrotnie większą zawartość witaminy C niż próbki suszone konwekcyjnie.

Karatas i Kamisli (2007) przeprowadzili badania w celu określenia zmian zawartości witamin (A, C i E) oraz dialdehydu malonowego w morelach (*Prunus armeniaca*) przy użyciu suszarek na podczerwień i mikrofalowych. Witaminy A, C i E w próbkach moreli suszonych w suszarce mikrofalowej są wyższe niż w suszarce na podczerwień. Również zawartości dialdehydu malonowego są wyższe w próbkach moreli suszonych mikrofalowo niż w próbkach moreli suszonych w podczerwieni. W związku z tym stwierdzono, że stosowanie suszarki mikrofalowej do moreli było znacznie bardziej skuteczne niż suszarki na podczerwień pod względem zatrzymywania witamin A, C i E oraz zawartości dialdehydu malonowego.

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na inne cechy jakościowe

Kaasova i in. (2002) badali zmiany chemiczne i biochemiczne podczas obróbki mikrofalowej pszenicy i określili wpływ ogrzewania mikrofalowego na zawartość mokrego glutenu, indeks glutenu, liczbę opadania i charakterystykę amylograficzną. Liczba opadania i indeks glutenu wzrosły wraz ze wzrostem energii pochłoniętej podczas ogrzewania mikrofalowego,

podczas gdy zawartość glutenu spadła. Największe zmiany wystąpiły, gdy temperatura końcowa wynosiła 80°C, a zawartość wilgoci wynosiła 15%.

Optymalne wartości indeksu glutenu dla dobrej jakości mąki pszennej wynoszą w przybliżeniu od 85% do 92%. Uzyskane wartości indeksu glutenu były powyżej 95% i jest to więcej niż optymalna jakość. Maksimum amylograficzne wzrosło, a wzrost ten był spowodowany inaktywacją α -amylazy wraz ze wzrostem zaabsorbowanej energii. W wyniku wzrostu maksimum amylograficznego zaobserwowano poprawę jakości wypieku. Negatywnym skutkiem wyższych dawek energii był spadek zawartości mokrego glutenu (Velu i in. 2006).

Wpływ ogrzewania mikrofalowego na mikrostrukturę bielma i zmiany chemiczne ziarna pszenicy badali Błaszczak i in. (2002). Ogrzewanie mikrofalowe ziarna w temperaturze do 48°C nie miało wpływu na mikrostrukturę bielma i właściwości technologiczne, ale wyraźne zmiany zaobserwowano, gdy temperatura ziarna przekroczyła 64°C. Zakłócenie integralności komórek ze zmianami w białkach, a także deformację granulek skrobi zaobserwowano w skaningowej mikroskopii elektronowej lub mikroskopii świetlnej. W temperaturach powyżej 79°C zaobserwowano spadek zawartości mokrego glutenu, indeksu sedymentacji, szklistości ziarna z powodu makroskopowych zmian bielma ziarna oraz znaczące zmiany energii ciasta i jakości chleba. Doszli do wniosku, że ogrzewanie mikrofalowe pszenicy do 48°C nie powoduje żadnych zmian, podczas gdy ogrzewanie do temperatur powyżej 79°C powoduje znaczny spadek żywotności ziarna, indeksu sedymentacji, zawartości mokrego glutenu, objętości i jakości chleba.

Kadlec i in. (2001) przeprowadzili badania w celu określenia zmian rozpuszczalnych węglowodanów podczas kiełkowania i ogrzewania mikrofalowego oraz suszenia nasion grochu (*Pisum sativum*). Próbkę grochu pozostawiono do wykiełkowania, a następnie poddano działaniu mikrofal o częstotliwości 2450 MHz i wysuszono w suszarce wspomaganą wentylatorem w temperaturze 80°C do końcowej wilgotności 12-14%. Wyniki wykazały, że nastąpił spadek zawartości galaktooligosacharydów alfa w ciągu pierwszych 3 dni kiełkowania, a czas suszenia został znacznie skrócony dzięki obróbce mikrofalowej.

Surowe jabłka (*Malus domestica*) zawierają wysokie stężenie flawonoidów, które zmniejszają ryzyko zachorowania na raka i choroby sercowo-naczyniowe oraz przyczyniają się do poprawy zdrowia (Knekt i in., 1996; Pearson i in., 1999; Eberhardt i in., 2000, Gerard i Roberts, 2004), ale stężenie fenoli i flawonoidów w soku i cydrze jest drastycznie zmniejszone po przetworzeniu soku. Obróbka cieplna zacieru owocowego okazała się skuteczna w zwiększaniu stężenia związków fenolowych w sokach owocowych, a także wydajności. Jednak większość obróbek cieplnych daje sok o niedopuszczalnych właściwościach analitycznych i sensorycznych. Zaletą energii mikrofalowej jest szybsze ogrzewanie, a tym samym szybsza inaktywacja enzymów i minimalizacja brązowienia.

Gerard i Roberts (2004) ocenili wpływ mikrofalowej obróbki cieplnej odmian jabłek: Fuji i Macintosh na wydajność soku, jakość oraz całkowitą zawartość flawonoidów w soku. Mikrofalowa obróbka cieplna zwiększyła wydajność soku oraz stężenie fenoli ogółem i flawonoidów. Sok z podgrzanego zacieru był wysokiej jakości, a paneliści sensoryczni nie byli w stanie wykryć różnic między cydrem wyprodukowanym w temperaturze pokojowej a tym wyprodukowanym w 40 i 60°C. Wyniki wykazały również, że podgrzanie zacieru jabłkowego do 60°C jest optymalną temperaturą dla poprawy wydajności owoców.

Wady mikrofalowej obróbki cieplnej

Suszenie mikrofalowe skutkuje niską jakością produktu, jeśli nie jest prawidłowo stosowane (Yongsawatdigul i Gunasekaran, 1996; Adu i Otten, 1996). Kontrola równomierności ogrzewania jest ważna dla zapewnienia bezpieczeństwa microbiologicznego i wysokiej jakości żywności suszonej mikrofalowo (Błaszczak i in., 2002). Trudność w ogrzewaniu mikrofalowym polega na dużej liczbie czynników, które wpływają na zachowanie mikrofalowego transferu ciepła, takich jak grubość, geometria i właściwości dielektryczne żywności. Pojemność cieplna i właściwości dielektryczne zmieniają się wraz z zawartością wilgoci i temperaturą, co również komplikuje proces suszenia mikrofalowego (Funebo i Ohlsson, 1998).

Nieodłącznym problemem związanym z ogrzewaniem mikrofalowym jest nierównomierność ogrzewania spowodowana nierównomiernym rozkładem przestrzennym pola elektromagnetycznego wewnątrz komory suszenia. Rozkład temperatury podczas ogrzewania mikrofalowego był badany przez wielu naukowców (Fakhouri i Ramaswamy, 1993; Mullin i Bows, 1993; Goksoy i in., 1999; Manickavasagan i in., 2006) którzy ustalili, że różnica temperatur w próbkach żywności wynosiła do 60-80°C w zależności od czasu i poziomu mocy. Aby osiągnąć równomierne ogrzewanie, produkt powinien być utrzymywany w ciągłym ruchu w komorze mikrofalowej, dzięki czemu różne części produktu otrzymują średnią intensywność pola elektromagnetycznego w danym okresie (Feng i Tang, 1998).

Inną wadą ogrzewania mikrofalowego jest fakt, że nie ma wspólnej metody monitorowania lub kontrolowania rozkładu pola elektromagnetycznego i jego wpływu po włączeniu mikrofal (Kelen i in., 2006). Suszenie mikrofalowe może czasami powodować nadmierne nagrzewanie, co może skutkować fizycznymi uszkodzeniami produktu, takimi jak przypalenie, odbarwienie i nierównomierny rozkład temperatury w produkcie końcowym (Yongsawatdigul i Gunasekaran, 1996). Suszenie mikrofalowe czasami powodowało brązowienie i niekorzystnie wpływało na parametry barwy w porównaniu z próbkami liofilizowanymi i suszonymi osmotycznie (Krokida i in., 2001).

Ze względu na wysokie koszty suszenia mikrofalowego, było ono stosowane tylko w przypadkach, gdy suszenie produktów końcowych musi spełniać specyfikacje wysokiej jakości lub jako dodatkowa metoda suszenia w celu dalszej poprawy jakości produktu (Drouzas i Schubert, 1996). Koszt procesu ogrzewania powietrza gazem ziemnym wynosił tylko około 30% kosztu procesu energii mikrofalowej (Funebo i Ohlsson, 1998). W USA koszt procesu ogrzewania powietrza wynosił 20% kosztu procesu mikrofalowego (Funebo & Ohlsson, 1998). Energia mikrofalowa jest stosowana tylko w okresie spadku szybkości lub przy niskiej zawartości wilgoci w celu zakończenia suszenia produktu. Dlatego mikrofały mogą być korzystne na ostatnich etapach suszenia powietrzem (Prabhanjan i in., 1995; Funebo i Ohlsson, 1998).

Potencjał aplikacyjny obróbki promieniowaniem mikrofalowym w słodownictwie i browarnictwie

Obecnie, suszenie mikrofalowe nabiera popularności wśród badaczy zajmujących się zagadnieniami słodownictwa oraz piwowarstwa. Podstawą tego jest skuteczne stosowanie tej metody w innych branżach sektora spożywczego. Nierzadko w tym celu konstruowane są

oddzielne reaktory mikrofalowe oraz suszarki konwekcyjne z możliwością podłączenia źródła emisji promieni mikrofalowych. Takimi urządzeniami są urządzenia inwerterowe, które wyeliminowały problem nierównomierności pola elektromagnetycznego Carvalho i in. (2021).

Akkarachaneeyakorn i in. (2010) wykorzystali kombinowaną metodę suszenia (konwekcyjne i mikrofalowe) przy wytwarzaniu słoðu ciemnego oraz nieczynnego enzymatycznie słoðu czekoladowego. Autorzy podkreślają, że dzięki wprowadzeniu promieniowania mikrofalowego udało się znacząco zredukować zużycie energii w procesie suszenia. Co ciekawe, warto wspomnieć, iż w trakcie obróbki termicznej (suszenie, prażenie, smażenie itd.) w technologii żywności może dochodzić do reakcji Maillarda. Jest to typ ciemnienia nieczynnego, który w browarnictwie z kolei częściowo odpowiada za walory smakowe piwa.

Li i Maurice (2013), wykorzystali promieniowanie mikrofalowe na etapie zacierania słoðu mielonego. Stosowali kuchenkę mikrofalową o mocy nominalnej 1300 W. Próby zacieru za każdym razem były umieszczane na talerzu obrotowym kuchenki mikrofalowej i podgrzewane przez 6-8 minut z 20-40% maksymalnej mocy mikrofal. Po zakończeniu obróbki mikrofalowej cała zawartość zlewek natychmiast była przelewana do filtracji przez bibułę filtracyjną. Niski stopień rozkładu skrobi, białek, β -glukanów i arabinoksylianów jest główną przyczyną zmętnienia brzezki. Autorzy podają, iż w porównaniu z zacieraniem kongresowym, przy zacieraniu mikrofalowym dochodzi tylko do częściowego rozkładu białek. Natomiast, nie odbywa się rozkład polisacharydów nieskrobiowych. Potrzeba tylko 7 minut, aby podnieść temperaturę zacieru z 16 do 78°C, uniemożliwiając aktywność enzymów. Wówczas, są one dezaktywowane w krótkim czasie z powodu szybkiego wzrostu temperatury.

Obecnie można uznać, iż wspomniana wyżej metoda łączona w suszeniu słoðów jest niezwykle przydatna w przypadku oszczędzania energii przy produkcji słoðów barwiących (ciemnych lub czekoladowych). Jednocześnie skrócenie czasu suszenia wiąże się ze zmniejszeniem ryzyka przypalania ziarna, co dodatkowo ogranicza powstanie substancji toksycznych. Niemniej jednak, główną wadą stosowania mikrofal do obróbki słoðów jest szybki wzrost temperatury ziarna, który może negatywnie wpływać na aktywność enzymatyczną słoðu. Tym samym powstaje wniosek, iż potrzebny jest wysoki poziom sterowalności w procesie ogrzewania mikrofalowego, by też stopniować moc mikrofal.

6. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w pracy techniki impregnacji próżniowej oraz obróbki promieniowaniem mikrofalowym mają potencjał do tego, aby mogły być wykorzystywane w branży słodowniczej i browarniczej. Pierwsza z nich tj. impregnacja próżniowa, jeśli chodzi o przemysł spożywczy, znajduje się na etapie badań. Obróbka promieniowaniem mikrofalowym, choć dalej znajduje się w sferze zainteresowania nauki, to zdaje się, że weszła już w fazę przeniesienia na skalę przemysłową. Możliwość jej wykorzystania w słodownictwie wynika z faktu, że wilgotności słodu zielonego przekraczają 40%. Obydwie techniki mają wysoki potencjał innowacyjny. Wynika on z tego, że impregnacja próżniowa przyspiesza proces wymiany masy w układzie ciało stałe – ciecz, a obróbka promieniowaniem mikrofalowym powoduje ogrzewanie materiału w całej jego objętości.

Procesów wymiany masy, czy ciepła jest w słodownictwie i browarnictwie co najmniej kilka. Jeśli chodzi o impregnację próżniową, to potencjał aplikacyjny może znaleźć ona w procesie moczenia ziarna przed słodowaniem, czy w procesie zacierania, w której tak naprawdę zachodzi też ekstrakcją składników słodu. Z kolei obróbka promieniowaniem mikrofalowym może być zastosowana w słodownictwie na etapie suszenia słodu zielonego, a przynajmniej w pierwszych jego fazach. W browarnictwie obróbka cieplna występuje w czasie zacierania oraz warzenia piwa. Procesy te, prowadzone w warzelni, w urządzeniach o praktycznie takiej samej konstrukcji, mają największy potencjał do tego, żeby wykorzystać do ich realizacji promieniowanie mikrofalowe.

BIBLIOGRAFIA

- Adu B., Otten L.** (1996). Microwave heating and mass transfer characteristics of white beans. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(1), 71-78.
- Agu R.C., Palmer G.H.** (1997). The effect of temperature on the modification of sorghum and barley during malting. *Process Biochemistry*, 32, 501.
- Agu R.C., Palmer G.H.** (1999). Comparative development of soluble nitrogen in the malts of barley and sorghum. *Process Biochemistry*, 35, 497.
- Aisen A.O., Muts G.C.J.** (1987). Micro-scale malting and brewing studies of some sorghum varieties. *Journal of the Institute of Brewing*, 93, 328.
- Akkarachaneeyakorn S., Laguerre J.C., Tattiyakul J., Neugnot B., Boivin P., Morales F.J., Birlouez-Aragon I.** (2010). Optimization of Combined Microwave-Hot Air Roasting of Malt Based on Energy Consumption and Neo-Formed Contaminants Content. *Journal of Food Science*, 75(4), E201-E207.
- Albanese L., Ciriminna R., Meneguzzo F., Pagliaro M.** (2018). Innovative beer-brewing of typical, old and healthy wheat varieties to boost their spreading. *Journal of Cleaner Production*, 171, 297-311.
- Andrés A., Bilbao C., Fito P.** (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63(1), 71-78.
- Aniche G.N., Palmer G.H.**, Influence of gibberellic acid (GA 3) on the development of amylolytic activities in rice during germination (1992). *Process Biochemistry*, 27, 291.
- Annemüller G., Manger H.J.** (2013). Processing of various adjuncts in beer production: raw grain adjuncts-sugars and sugar syrups-malt substitutes. VLB Berlin.
- Askari G.R., Emam-Djomeh Z., Mousavi S.M.** (2006). Effects of combined coating and microwave assisted hot air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple slices. *Food Science and Technology International*, 12(1), 39-46.
- Assis F. R., Rodrigues L.G.G., Tribuzi G., De Souza P.G., Carciofi B.A.M., Laurindo J.B.** (2019). Fortified apple (*Malus* spp., var. Fuji) snacks by vacuum impregnation of calcium lactate and convective drying. *LWT*, 113, 108298.
- Back W., Gastl M., Krottenthaler M., Narziß L., Zarnkow M.** (2020). *Brewing Techniques in Practice: An In-Depth Review of Beer Production with Problem Solving Strategies*; Fachverlag Hans Carl: Nürnberg, Germany.
- Baik B.-K., Ullrich S.E.** (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, 48, 233-242.
- Bamforth C.W., Barclay A.H.P.** (1993). Malting technology and the uses of malt. (MacGregor A.W., Bhatti R.S. – red.) *Barley chemistry and technology (297-354)*. AACC Press.
- Bathgate G.N.** (2016). A review of malting and malt processing for whisky distillation. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(2), 197-211.
- Behall K.M., Scholfield D.J., Hallfrisch J.** (2004). Diets containing barley significantly reduce lipids in mildly hypercholesterolemic men and women. *The American Journal of Clinical Nutrition* 80, 1185-93.
- Betoret E., Betoret N., Rocculi P., Dalla Rosa M.** (2015). Strategies to improve food functionality: Structure–property relationships on high pressures homogenization, vacuum impregnation and drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 1-12.
- Bhatti R.S.** (1993). Physicochemical properties of roller-milled barley bran and flour. *Cereal Chemistry* 70, 397-402.
- Błaszczak W., Gralik J., Klockiewicz-Kamińska E., Fornal J., Warchalewski J.R.** (2002). Effect of γ -radiation and microwave heating on endosperm microstructure in relation to some technological properties of wheat grain. *Food/Nahrung*, 46(2), 122-129.

- Błażej S.** (2014) Wybrane zagadnienia z technologii przemysłu fermentacyjnego. Wydawnictwo SGGW, Warszawa., 35-40.
- Blišáková L., Gregor T., Mešťánek M., Hřivna L., Kumbár V.** (2021). The use of unconventional malts in beer production and their effect on the wort viscosity. *Foods*, 11(1), 31.
- Brasil V.C.B., Guimarães B.P., Evaristo R.B.W., Carmo T.S., Ghesti G.F.** (2020). Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) characterization as adjunct in beer brewing. *Food Science and Technology*, 41, 265-272.
- Braşoveanu M., Nemţanu M.R.** (2014). Behaviour of starch exposed to microwave radiation treatment. *Starch-Stärke*, 66(1-2), 3-14.
- Briggs D.E., Hough J.S., Stevens R., Young T.W.** (1981). Adjuncts, sugars, wort syrups and industrial enzymes. (Briggs D.E., Hough J.S., Stevens R., Young T.W. -red.), *Malting and Brewing Science*, Chapman & Hall, London.
- Bulhões Bezerra Cavalcante T.A., Funcia E.S., Gut J.A.W.** (2021). Inactivation of polyphenol oxidase by microwave and conventional heating: investigation of thermal and non-thermal effects of focused microwaves. *Food Chemistry*, 340, 127911.
- Cadenas R., Caballero I., Nimubona D., Blanco C.A.** (2021). Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer. *Foods*, 10(8), 1726.
- Calabrò E., Magazù S.** (2014). Non-thermal effects of microwave oven heating on ground beef meat studied in the mid-infrared region by fourier transform infrared spectroscopy. *Spectroscopy Letters*, 47, 649-656.
- Cao H., Fan D., Jiao X., Huang J., Zhao J., Yan B., Zhou W., Zhang W., Ye W., Zhang H., Ye W., Zhang W., Chen W.** (2018). Intervention of transglutaminase in surimi gel under microwave irradiation. *Food Chemistry*, 268, 378-385.
- Cao H., Zhu H., Wang Q., Fan D., Huang J., Zhao J., Jiao X., Yan B., Zhou W., Zhang H.** (2020). Intervention on activity and structure of cathepsin L during surimi gel degradation under microwave irradiation. *Food Hydrocolloids*, 103, 105705.
- Carvalho G.R., Monteiro R.L., Laurindo J.B., Augusto P.E.D.** (2021). Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73.
- Castello M.L., Fito P., Chiralt A.** (2006). Effect of osmotic dehydration and vacuum impregnation on respiration rate of cut strawberries. *LWT-Food Science and Technology*, 39, s. 1171-1179.
- Chatterjee S.R., Abrol Y.P.** (1977). Protein quality evaluation of popped barley grains (*Sattu*). *Journal of Food Science and Technology*, 14, 247-50.
- Chen C.C., Hsieh J.F.** (2016). Microwave-assisted cross-linking of milk proteins induced by microbial transglutaminase. *Scientific Reports*, 6, 39040.
- Chiralt A., Fito P., Andres A., Barat J.M., Martinez-Monzo J, Martinez-Navarrete N.** (1999). Vacuum impregnation: a tool in minimally processing of foods. *Processing of Foods: Quality Optimization and Process Assessment*. (Oliveira F.A.R., Oliveira J.C. – red.), Boca Raton: CRC press.
- Chiralt A., Fito P., Barat J. M., Andres A., González-Martinez C., Escriche I., Camacho M. M.** (2001). Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of food engineering*, 49(2-3), 141-151.
- Ciocan M.E., Salamon R.V., Ambrus Á., Codină G.G., Chetrariu A., Dabija A.** (2023). Use of unmalted and malted buckwheat in brewing. *Applied Sciences*, 13(4), 2199.
- Clark D.E.** (1996). Microwave processing of materials. *Annual Review of Materials Science*, 26, 299-331.
- Cohen J.S., Yang T.C.S.** (1995). Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology*, 6(1), 20-25.
- Cooper C.M., Evans D.E., Yousif A., Metz N., Koutoulis A.** (2016). Comparison of the impact on the performance of small-scale mashing with different proportions of unmalted barley, Onda Pro®, malt and rice. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(2), 218-227.

- Coors J.** (1976). Practical experience with different adjunct. Technical Quarterly of the Master Brewery Association of Americas, 13, 117.
- Cruz R.M.S., Vieira M.C., Silva C.L.M.** (2009). The response of watercress (*Nasturtium officinale*) to vacuum impregnation: effect of and antifreeze protein type I. Journal of Food Engineering, 95, 339-345.
- Cui Z., Xu S., Sun D.** (2003). Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. Drying Technology, 21(7), 1173-1184.
- Culkin K.A., Fung D.Y.** (1975). Destruction of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in microwave-cooked soups. Journal of Food Protection, 38(1), 8-15.
- D'Alfonzo S.** (2013a). Vacuum impregnation. Metal Finishing, 99, 507-509.
- D'Alfonzo S.** (2013b). Vacuum impregnation. Metal Finishing, 100, 502-504.
- Dabija A., Ciocan M.E., Chetrari A., Mîrzan D.** (2021). Comparative evaluation of the physico-chemical characteristics of buckwheat malt and barley malt. The International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 21, 51-58.
- Dabija A., Ciocan M.E., Chetrari A., Codină G.G.** (2022). Buckwheat and amaranth as raw materials for brewing, a review. Plants, 11(6), 756.
- Damm M., Nussold C., Cantillo D., Rechberger G.N., Gruber K., Sattler W., Oliver Kappe C.** (2012). Can electromagnetic fields influence the structure and enzymatic digest of proteins? A critical evaluation of microwave-assisted proteomics protocols. Journal of proteomics, 75, 5533-5543.
- de Pomerai D., Daniells C., David H., Allan J., Duce I., Mutwakil M., Thomas D., Sewell P., Tattersall J., Jones D., Candido P.** (2000). Non-thermal heat-shock response to microwaves. Nature, 405, 417-418.
- Derossi A., De Pilli T., Severini C.** (2012). The application of vacuum impregnation techniques in food industry. (Valdez B. – red.) Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry.
- Domin M., Vasiukov K., Rydzak L., Kiczorowski P.** (2023). Hydroliza enzymatyczna skrobi różnego pochodzenia za pomocą enzymów słoju jęczmiennego. Przemysł Chemiczny, 102, 1155-1161.
- Dreyfuss M., Chipley J.** (1980). Comparison of effects of sublethal microwave radiation and conventional heating on the metabolic activity of *Staphylococcus aureus*. Applied and environmental microbiology, 39 (1), 13-16.
- Drouzas A.E., Tsami E., Saravacos G.D.** (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gels. Journal of Food Engineering, 39(2), 117-122.
- Drouzas A.E.; Schubert H.** (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. Journal of Food Engineering, 28(2), 203-209.
- Dura A., Rosell C. M.** (2016). Physico-chemical properties of corn starch modified with cyclodextrin glycosyltransferase. International Journal of Biological Macromolecules, 87, 466-472.
- Eagerman B.A.** (1978). Orange juice colour measurement using general purpose tristimulus colorimeters. Journal of Food Science, 43(2), 428-431.
- Eberhardt M.V., Lee C.Y., Liu R.H.** (2000). Antioxidant and anticancer activities of fresh apples. Nature, 405, 903-904.
- Elhoussein E., Sahin S.** (2018). Drying behaviour, effective diffusivity and energy of activation of olive leaves dried by microwave, vacuum and oven drying methods. Heat and Mass Transfer, 54(7), 1901-1911.
- Ertek G., Taştan Ö., Baysal T.** (2023). Combined use of vacuum impregnation and encapsulation technologies for phenolic enrichment of strawberries. Food Chemistry, 398, 133853.
- Fakhouri M.O., Ramaswamy H.S.** (1993). Temperature uniformity of microwave heated foods as influenced by product type and composition. Food Research International, 26(2), 89-95.
- Fan D., Ma W., Wang L., Huang J., Zhang F., Zhao J., Zhang H., Chen W.** (2013). Determining the effects of microwave heating on the ordered structures of rice starch by NMR. Carbohydrate Polymers, 92(2), 1395-1401.

- Fan D., Ma W., Wang L., Huang J., Zhao J., Zhan H., Chen W.** (2012). Determination of structural changes in microwaved rice starch using Fourier transform infrared and Raman spectroscopy. *Starch - Starke*, 64(8), 598-606.
- Fan D., Wang L., Chen W., Ma S., Ma W., Liu X., Zhao J., Zhang H.** (2014). Effect of microwave on lamellar parameters of rice starch through small-angle X-ray scattering. *Food Hydrocolloids*, 35, 620-626.
- Fan D.M., Lin L.F., Wang L.Y., Huang L.L., Hu B., Gu X.H., Zhao J.X., Zhang, H.** (2017). The influence of metal ions on the dielectric enhancement and radical generation of rice starch during microwave processing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 94, 266-270.
- Farzaneh V., Ghodsvali A., Bakhshabadi H., Zare Z., Carvalho I.S.** (2017). The impact of germination time on the some selected parameters through malting process. *International Journal of Biological Macromolecules*, 94, 663-668.
- Fathima A., Begum K., Rajalaksmi D.** (2001). Microwave drying of selected greens and their sensory characteristics. *Plant Foods for Human Nutrition*, 56(4), 303-311.
- Feng H., Tang J.** (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63(4), 679-683.
- Fito P., Andres A., Chiralt A., Pardo P.** (1996). Coupling of hydrodynamic mechanisms and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*, 27, 229-241.
- Flores-Calderón A.M.D., Hernández-Carapia M.Á., Luna H., Escalona-Buendía H.B.** (2022). Chemical analysis of blue corn base malt and the effect of malting and roasting of blue corn malts on color and antioxidant compounds associated with antioxidant capacity. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 34(11), 938-948.
- Fogarasi A.L., Kun S., Tankó G., Stefanovits-Bányai É., Hegyesné-Vecseri B.** (2015). A comparative assessment of antioxidant properties, total phenolic content of einkorn, wheat, barley and their malts. *Food Chemistry*, 167, 1-6.
- Fox G.P.** (2009). Chemical composition in barley grains and malt quality. Genetics and improvement of barley malt quality (63-98). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fujikawa H.** (1994). Patterns of Bacterial Destruction in Solutions by Microwave Irradiation. *Journal of Applied Bacteriology*, 76, 389-394.
- Fujikawa H., Ushioda H., Kudo Y.** (1992). Kinetics of *Escherichia coli* destruction by microwave irradiation. *Applied and environmental microbiology*, 58 (3), 920-924.
- Funebo T., Ahrne L., Prothon F., Kidman S., Langton M., Skjoldebrand C.** (2002). Microwave and convective dehydration of ethanol treated and frozen apple-physical properties and drying kinetics. *International Journal of Food Science and Technology*, 37(6), 603-614.
- Funebo T., Ohlsson T.** (1998). Microwave assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38(3), 353-367.
- Galindo F.G., Yusof N.L.** (2015). New insights into the dynamics of vacuum impregnation of plant tissues and its metabolic consequences. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1127-1130.
- Garner H.R., Ohkawa T., Tuason O., Lee R.L.** (1990). Microwave absorption in substances that form hydration layers with water. *Physical Review A*, 42, 7264-7270.
- Gedye R.N., Smith F.E., Westaway K.C.** (1988). The rapid synthesis of organic compounds in microwave ovens. *Canadian Journal of Chemistry*, 66, 17-26.
- Gedye R.N., Smith F.E., Westaway K.C.** (1991). Microwaves in organic and organometallic synthesis. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 22, 199-207.
- Gerard K.A., Roberts J.S.** (2004). Microwave heating of apple mash to improve juice yield and quality. *LWT Food Science and Technology*, 37(5), 551-557.
- Glatthar J., Heinisch J.J., Senn T.** (2005). Unmalted triticale cultivars as brewing adjuncts: effects of enzyme activities and composition on beer wort quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(4), 647-654.

- Glenk K., Hall C., Liebe U., Meyerhoff J.** (2012). Preferences of Scotch malt whisky consumers for changes in pesticide use and origin of barley. *Food Policy*, 37(6), 719-731.
- Goksoy E.O., James C., James S.J.** (1999). Non-uniformity of surface temperatures after microwave heating of poultry meat. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 34(3), 149-160.
- Goldblith S.A., Tannenbaum S.R., Wang D.I.C.** (1968). Thermal and 2450 MHz microwave energy effect on the destruction of thiamine. *Food Technology*, 22, 1267-1268.
- Goldblith S.A., Wang D.I.C.** (1967). Effect of microwaves on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Applied Microbiology*, 15, 1371-1375.
- Gomaa A.I., Nsonzi F., Sedman J., Ismail A.A.** (2016). Enhanced unfolding of bovine β -lactoglobulin structure using microwave treatment: a multi-spectroscopic study. *Food Biophysics*, 11, 370-379.
- Gonu H., Withayagiat U.** (2021). Composite malt with dark-purple rice malt improves the phenolic profile and antioxidant activity of malt extract. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(11), 5833-5842.
- Gonu H., Withayagiat U.** (2022). The implications of composite dark purple Rice malt on phenolic acid profiles, 4-vinyl Guaiacol reduction and enhancing the Antioxidation of beer. *Fermentation*, 8(8), 392.
- Gonu H., Zarnkow M., Withayagiat U.** (2023). Wet vacuum impregnation assisted in malting; its implication on steeping degree, germination energy and malt properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 58, 4186-4195.
- Gonzalez Z., Perez E.** (2002). Evaluation of lentil starches modified by microwave irradiation and extrusion cooking. *Food Research International*, 35(5), 415-420.
- González-Pérez J. E., Jiménez-González O., Ramírez-Corona N., Guerrero-Beltrán J. A., López-Malo A.** (2022). Vacuum impregnation on apples with grape juice concentrate: Effects of pressure, processing time, and juice concentration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102981.
- Goode D.L., Arendt E.K.** (2006). *Brewing, New technologies*, WoodheadPublishing Ltd., Cambridge (USA).
- Gowen A., Abu-Ghannam N., Frias J., Oliveira J.** (2006). Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chick-peas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Trends in Food Science and Technology*, 17(4), 177-183.
- Greschner A.A., Ropagnol X., Kort M., Zuberi N., Perreault J., Razzari L., Ozaki T., Gauthier M.A.** (2019). Room-temperature and selective triggering of supramolecular DNA assembly/disassembly by nonionizing radiation. *Journal of the American Chemical Society*, 141, 3456-3469.
- Grochowicz J.** (1996). *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. Wydanie II poprawione i uzupełnione. (Prędko L. -red.). Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Grzesiuk S., Kulka K.** (1988). *Biologia ziarniaków zbóż*. WNT, Warszawa.
- Guo Q., Sun D.W., Cheng J.H., Han Z.** (2017). Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 236-247.
- Guo Y., Xu T., Li N., Cheng Q., Qiao D., Zhang B., Zhao S., Huang Q., Lin Q.** (2019). Supramolecular structure and pasting/digestion behaviors of rice starches following concurrent microwave and heat moisture treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 437-444.
- Gupta M., Abu-Ghannam N., Gallagher E.** (2010). Barley for brewing: Characteristic changes during malting, brewing and applications of its by-products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 318-328.
- Han Z., Li Y., Luo D.H., Zhao Q., Cheng J.H., Wang J.H.** (2021). Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment. *Food Chemistry*, 359, 129887.
- Harasym J.** (2009). Gryka jako źródło substancji organicznych i związków mineralnych. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Nauki Inżynierskie i Technologiczne*, 1(57), 159-169.

- Harasym J., Podeszwa T.** (2015). Towards sustainable de-growth-medical survey data as predictors for estimation of niche market value-gluten-free beer market case. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1232-1238.
- Higo A., Noguchi S.** (1998). Changes of hydration state by microwave irradiation in mixtures of protein powder and water. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 45, 426-434.
- Holopainen-Mantila U.** (2015). Composition and structure of barley (*Hordeum vulgare* L.) grain in relation to end uses. VTT Technical Research Centre of Finland. Dysertacja akademicka.
- Horikoshi S., Nakamura K., Yashiro M., Kadomatsu K., Serpone N.** (2019). Probing the effect(s) of the microwaves' electromagnetic fields in enzymatic reactions. *Scientific Reports* 2019, 9, 8945.
- Igyor M.A., Ogbonna A.C., Palmer G.H.** (2001). Effect of malting temperature and mashing methods on sorghum wort composition and beer flavour, *Process Biochemistry*, 36, 1039.
- Izidorczyk M.S., Dexter J.E.** (2008). Barley β -glucans and arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products-a review. *Food Research International*, 41, 850-68.
- Jiang K., Wang W., Ma Q., Wang J., Sun J.** (2023). Microwave-assisted enzymatic hydrolysis as a novel efficient way to prepare porous starch. *Carbohydrate Polymers*, 301, 120306.
- Jiang Z., Shi R., Ma L., Munkh-Amgalan G., Bilawal A., Hou J., Tian B.** (2021). Microwave irradiation treatment improved the structure, emulsifying properties and cell proliferation of laccase-crosslinked α -lactalbumin. *Food Hydrocolloids*, 121, 107036.
- Jiao X., Fan D.** (2022). Non-thermal microwave effects: conceptual and methodological problems. *Food Chemistry*, 372, 131217.33.
- Kaasova J., Hubackova B., Kadlec P., Prihoda J., Bubnik Z.** (2002). Chemical and biochemical changes during microwave treatment of wheat. *Czech Journal of Food Science*, 20(2), 74-78.
- Kadlec P., Rubecova A., Hinkova A., Kaasova J., Bubnik Z., Pour V.** (2001). Processing of yellow pea by germination, microwave treatment and drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2(2), 133-137.
- Kamjijam B., Suwannaporn P., Bednarz H., Jom K.N., Niehaus K.** (2021). Elevation of gamma-aminobutyric acid (GABA) and essential amino acids in vacuum impregnation mediated germinated rice traced by MALDI imaging. *Food Chemistry*, 365, 130399.
- Kantrong H., Tansakul A., Mittal G.** (2012). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of Food Science & Technology*, 51(12), 3594-3608.
- Kappe C.O., Pieber B., Dallinger D.** (2013). Microwave effects in organic synthesis: myth or reality? *Angewandte Chemie International Edition*, 52, 1088-1094.
- Karatas F., Kamisli F.** (2007). Variations of vitamins (A, C and E) and MDA in apricots dried in IR and microwave. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 662-668.
- Kathirvel K., Naik K.R., Garipey Y., Orsat V., Raghavan G.S.V.** (2006). Microwave drying-A promising alternative for the herb processing industry. *Canadian Society for Bioengineering*, Paper No. 06-212, Edmonton, Alberta, 16-19 July06-212.
- Kelen A., Ress S., Nagy T., Pallai E., Pintye-Hodi K.** (2006). Mapping of temperature distribution in pharmaceutical microwave vacuum drying. *Powder Technology*, 162(2), 133-137.
- Khraisheh M.A.M., McMinn W.A.M., Magee T.R.** (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37(5), 497-503.
- Knekt P., Jarvinen R., Reunanen A., Maatela J.** (1996). Flavonoid intake and coronary mortality in Finland: a cohort study. *British Medical Journal*, 312(7029), 478-481.
- Knorr D.** (1993). Effects of high hydrostatic pressure processes on food safety and quality. *Food Technology*, 47(6): 156-161.
- Knorr D.** (1994). Non-thermal processes for food preservation. *Minimal processing of foods and process optimization* (Singh R.P., Oliveira F.A. red.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kobus Z., Rydzak L., Guz T., Domin M., Nadulski R., Osmólska E.** (2021). Impact of various vacuum impregnation methods on viability of cereal grains. *Processes*, 9(8), 1368.

- Kordialik-Bogacka E., Bogdan P., Diowski A.** (2014). Malted and unmalted oats in brewing. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 390-398.
- Kouchma T.** (1997). Modification of bactericidal effects of microwave heating and hyperthermia by hydrogen peroxide. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 32 (4), 205-214.
- Krokida M.K., Maroulis Z.B.** (2001a). Quality changes during drying of food materials. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences* (Mujumdar A.S. red.). Oxford IBH, Delhi, India.
- Krokida M.K., Maroulis Z.B.** (2001b). Structural properties of dehydrated products during dehydration. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(5), 529-538.
- Kumari B., Sit N.** (2023). Comprehensive review on single and dual modification of starch: Methods, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126952.
- Kunze W.** (1996) *Technology Brewing and Malting*, VLB, Berlin.
- Lacny K., Janczar-Smuga M.** (2013). Postęp techniczny i technologiczny w produkcji słodu. *Nauki Inżynierskie i Technologie*, 4(11), 77-93
- Lanares J. P.** (1992). *Das Bier der Tarahumara-Indianer in Mexiko*. Brauwelt, 132.
- Larsson M., Sandberg A.-S.** (1995). Malting of oats in a pilot-plant process. Effects of heat treatment, storage and soaking conditions on phytate reduction. *Cereal Chemistry*, 21, 87-95.
- Laurence J.A., French P.W., Lindner R.A., McKenzie D.R.** (2000). Biological effects of electromagnetic fields-Mechanisms for the effects of pulsed microwave radiation on protein conformation. *Journal of Theoretical Biology*, 206, 291-298.
- Lechowicz R.V., Beuchat L.R., Fox K.I., Webster F.H.** (1969). Procedure for evaluating the effects of 2,450-MHz microwaves upon *Streptococcus faecalis* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology*, 17, 106-110.
- Lee G., Lee W., Lee H., Lee C.Y., Eom K., Kwon T.** (2015). Self-assembled amyloid fibrils with controllable conformational heterogeneity. *Scientific Reports*, 5, 16220.
- Lewandowicz G., Jankowski T., Fornal J.** (2000). Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches. *Carbohydrate Polymers*, 42(2), 193-199.
- Li M., Sun Q.-J., Zhu K.-X.** (2017). Delineating the quality and component changes of whole-wheat flour and storage stability of fresh noodles induced by microwave treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 84, 378-384.
- Li R., Dai L., Peng H., Jiang P., Liu N., Zhang D., Wang C., Li Z.** (2021). Effects of microwave treatment on sorghum grains: Effects on the physicochemical properties and in vitro digestibility of starch. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), 1-9.
- Li Y., Maurice M.-J.S.** (2013). Development of a Fast and Reliable Microwave-Based Assay for Measurement of Malt Color. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 71(3), 144-148.
- Lin T.M., Durance T.D., Scaman C.H.** (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2), 111-117.
- Little B.T.** (1994). Alternative cereals for beer production, *Fermentation*, 7, 163-168.
- Liu L., Deng H., Tang X., Lu Y., Zhou J., Wang X., Zhao Y., Huang B., Shi Y.** (2021). Specific electromagnetic radiation in the wireless signal range increases wakefulness in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 118(31), e2105838118.42.
- Luo Z., He X., Fu X., Luo F., Gao Q.** (2006). Effect of microwave radiation on the physicochemical properties of normal maize, waxy maize and amylo maize V starches. *Starch-Stärke*, 58(9), 468-474.
- Lyons D.W., Hatcher J.D., Sunderland J.E.** (1972). Drying of a porous medium with internal heat generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(5), 897-905.
- Ma M., Zhang Y., Chen X., Li H., Sui Z., Corke H.** (2020). Microwave irradiation differentially affect the physicochemical properties of waxy and non-waxy hull-less barley starch. *Journal of Cereal Science*, 95, 1-10.
- Madhujith T., Shahidi F.** (2007). Antioxidative and antiproliferative properties of selected barley cultivars and their potential for inhibition of low-density lipoprotein (LDL) cholesterol oxidation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 5018-24.

- Manickavasagan A., Jayas D.S., White N.D.G.** (2006). Non-uniformity of surface temperatures of grain after microwave treatment in an industrial microwave dryer. *Drying Technology*, 24(12), 1559-1567.
- Martinez-Monzo J., Barat J.M., Gonzalez-Martinez C., Chiralt A., Fito P.** (2000). Changes in thermal properties of apple due to vacuum impregnation. *Journal of Food Engineering*, 43, 213-218.
- Martin-Lobera C., Aranda F., Lozano-Martinez P., Caballero I., Blanco C.A.** (2022). Bread as a valuable raw material in craft ale beer brewing. *Foods*, 11(19), 3013.
- Mascia I., Fadda C., Dostálek P., Olšovská J., Del Caro A.** (2014). Preliminary characterization of an Italian craft durum wheat beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 495-499.
- Maskan M.** (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71-78.
- Maskan M.** (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 177-182.
- Mc Donald M.B., Vertucci C.W., Roos E.E.** (1988). Soybean Seed Imbibition: Water Absorption by Seed Parts. *Crop Science*, 28, 993-997.
- Mebatsion H.K., Verboven P., Ho Q.T., Verlinden B.E., Nicolai B.M.** (2008). Modelling fruit (micro)structures, why and how? *Trends in Food Science and Technology*, 19, 59-66.
- Mercy J.L., Beck-Domzalska M.** (2016). *Culture statistics 2016 edition*. Publications Office of the European Union.
- Meussdoerffer F., Zarnkow M.** (2009). *Starchy raw material*, Wiley-VCH, Freiberg.
- Michel R.H., McGovern P.E., Badler V.R.** (1992). Chemical evidence for ancient beer. *Nature* 360(6399), 24-24.
- Morris C.E.** (1998). 1998 survey of food manufacturing trends: A clear direction. *Food Engineering*, 70(3), 77-86.
- Motwani T., Seetharaman K., Anantheswaran R.** (2007). Dielectric properties of starch slurries as influenced by starch concentration and gelatinization. *Carbohydrate Polymers*, 67(1), 73-79.
- Mu D., Li H., Li X., Zhu J., Qiao M., Wu X., Luo S., Yang P., Zhao Y., Liu F., Jiang S., Zheng Z.** (2020). Enhancing laccase-induced soybean protein isolates gel properties by microwave pretreatment. *Journal of food processing and preservation*, 44, e14386, 1-8.
- Mudgett R.E.** (1986). Microwave properties and heating characteristics of foods. *Food Technology (USA)*, 84-93.
- Mullin J.** (1995). *Microwave processing. New methods of food preservation* (red. Gould G.W.). Blackie Academic and Professional, Bishopbriggs, Glasgow, 112-134.
- Mullin J., Bows J.** (1993). Temperature measurements during microwave cooking. *Food Additives Contamination*, 10(6), 663-672.
- Newman C.W., Newman R.K.** (2006). A brief history of barley foods. *Cereal Foods World*, 51(1), 4-7.
- Nic Phiarais B.P., Wijngaard H.H., Arendt E.K.** (2005). The impact of kilning on enzymatic activity of buckwheat malt. *Journal of the Institute of Brewing*, 111, 290-298.
- Nic Phiarais B.P., Wijngaard H.H., Arendt E.K.** (2006). Kilning conditions for the optimisation of enzyme levels in buckwheat. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 64, 187-194.
- Nijhuis H.H., Torringa H.M., Muresan S., Yuksel D., Leguijt C., Kloek W.** (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 9, 13-20.
- Nüchter M., Ondruschka B., Bonrath W., Gum A.** (2004). Microwave assisted synthesis-a critical technology overview. *Green Chemistry*, 6(3), 128-141.
- Obeta J.A.N., Okungbowa J., Ezeogu L.I.** (2000). Malting of sorghum: further studies on factors influencing alpha-amylase activity. *Journal of the Institute of Brewing*, 106, 295-304.
- Occhino E., Hernando I., Llorca E., Neri L., Pittia P.** (2011). Effect of vacuum impregnation treatments to improve quality and texture of zucchini. *Procedia Food Science*, 1, 829-835.

- Oduro I., Clarke B.** (1999). The quality assessment of gari produced by using microwave energy. *International Journal of Food Science and Technology*, 34(4), 365-370.
- Okafor N., Iwouno J.** (1990). Malting and brewing qualities of some Nigerian rice (*Oryza sativa* L.) varieties and some thoughts on the assessment of malts from tropical cereals. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 6, 187-194.
- Okolo B.N., Ezeogu L.I.** (1996). Enhancement of amylolytic potential of sorghum malts by alkaline treatment. *Journal of the Institute of Brewing*, 102, 79-858.
- Oktay S., Pizzi A., Koken N., Bengü B.** (2024). Chemical modification techniques of corn starch for synthesis wood adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 128, 103545.
- Okungbowa J., Obeta J.A.N., Ezeogu L.I.** (2002). Sorghum beta-amylase production: relationship with grain cultivar, steep regime, steep liquor composition and kilning temperature. *Journal of the Institute of Brewing*, 108, 362-370.
- Oyeyinka S.A., Afunso T.M., Adebo A.A., Diarra S.S.** (2020). Morphology, pasting and thermal properties of microwave-assisted cassava starch-stearic acid complex. *Ceylon Journal of Science*, 49(3), 275-281.
- Oyeyinka S.A., Akintayo O.A., Adebayo O.A., Kayitesi E., Njobeh P.B.** (2021). A review on the physicochemical properties of starches modified by microwave alone and in combination with other methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 87-95.
- Oyeyinka S.A., Umaru E., Olatunde S.J., Joseph J.K.** (2019). Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of Bambara groundnut starch. *Food Bioscience*, 28, 36-41.
- Ozcan-Sinir G., Ozkan-Karabacak A., Tamer C., Copur O.** (2019). The effect of hot air, vacuum and microwave drying on drying characteristics, rehydration capacity, color, total phenolic content and antioxidant capacity of Kumquat (*Citrus japonica*). *Food Science and Technology*, 39(2), 475-485.
- Ozkan I.A., Akbudak B., Akbudak N.** (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 577-583.
- Palav T., Seetharaman K.** (2006). Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating. *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 364-370.
- Panayampadan A.S., Alam M., Aslam R., Kaur J.** (2022). Vacuum impregnation process and its potential in modifying sensory, physicochemical and nutritive characteristics of food products. *Food Engineering Reviews*, 14(2), 229-256.
- Pavia M., Trujillo A.J., Guamis B., Capellas M., Ferragut V.** (1999). Changes in microstructural, textural and color characteristics during of Manchego type cheese salted by brine vacuum impregnation. *International Dairy Journal*, 9, 91-98.
- Pazera, T., Rzemieniuk T.** (1998) *Browarnictwo*. WS i P, Warszawa.
- Pearson D.A., Tan C.H., German J.B., Davis P.A., Gershwin M.E.** (1999). Apple juice inhibits human low density lipoprotein oxidation. *Life Sciences*, 64, 1913-1920.
- Penumarti A., Szczepanski N., Kesselring J., Gabe, E., Kim E., Burks A.W., Kulis M.D.** (2017). Impact of microwaving on the protein content and microbial levels of whole wheat flour for use in oral immunotherapy. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, Volume 139, Issue 2, AB276139(2).
- Perez-Cabrera L., Chafer M., Chiralt A., Gonzalez-Martinez C.** (2011). Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear. *Food Science and Technology*, 44, 2273-2280.
- Peterson D.M.** (1998). Malting oats: effects on chemical composition of hull-less and hulled genotypes. *Cereal Chemistry*, 75, 230-234.
- Peterson D.M.** (2001). Oat antioxidants. *Cereal Chemistry*, 33, 115-129.
- Piddocke M.P., Kreis S., Heldt-Hansen H.P., Nielsen K.F., Olsson L.** (2009). Physiological characterization of brewer's yeast in high-gravity beer fermentations with glucose or maltose syrups as adjuncts. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84, 453-464.

- Pinkrova J., Hubackova B., Kadlec P., Prihoda J., Bubnik Z.** (2003). Changes of itarch during microwave treatment of rice. *Czech Journal of Food Science*, 21(5), 176-184.
- Pires E., Brányik T., Pires E., Brányik T.** (2015). By-products of beer fermentation. *Biochemistry of beer fermentation*, 51-80.
- Piyasena P., Ramaseamy H.S., Awuah G.B., Defelice C.** (2003). Dielectric properties of starch solutions as influenced by temperature, concentration, frequency and salt. *Journal of Food Process Engineering*, 26(1), 93-119.
- Pliansrithong P., Usansa U., Wanapu C.** (2013). Increasing of nitrogenous substances in wort by using commercial enzymes and modifying mashing method. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 3(4), 404-407.
- Prabhanjan D.G., Ramaswamy H.S., Raghavan G.S.V.** (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25(2), 283-293.
- Radoiu M.** (2020). Microwave drying process scale-up. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 155, 108088.
- Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Kidoń M.** (2014). Applicability of vacuum impregnation to modify physico-chemical, sensory and nutritive characteristics of plant origin products—a review. *International journal of molecular sciences*, 15(9), 16577-16610.
- Ren G., Chen F.** (1998). Drying of American ginseng (*Panax quinquefolium*) roots by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 35(4), 433-445.
- Romero-Medina A., Estarrón-Espinosa M., Verde-Calvo J.R., Lelièvre-Desmas M., Escalona-Buendía H.B.** (2020). Renewing traditions: A sensory and chemical characterisation of mexican pigmented corn beers. *Foods*, 9(7), 886, 1-24.
- Ruhul Amin M., Anannya F.R., Mahmud M.A., Raian, S.** (2019). Esterification of starch in search of a biodegradable thermoplastic material. *Journal of Polymer Research*, 27(1), 3, 1-12.
- Rydzak L.** (2005). Zmiany wybranych właściwości fizycznych nasion grochu i fasoli po procesie nawilżania w warunkach podciśnienia. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 431-440.
- Rydzak L., Różyło R., Guz T., Natoniewski M., Vasiukov K.** (2023a). The Use of Vacuum Impregnation of Barley Grain in the Production of Malt for Wort. *Applied Sciences*, 13(3), 1628.
- Rydzak L., Vasiukov K., Kobus Z., Natoniewski M.** (2023b). Modification of the Malting Process of Barley Grains of Different Varieties by Vacuum Impregnation and Its Effect on Selected Wort Parameters. *Processes*, 11(10), 2830.
- Salamon A., Kowalska H., Ignaczak A., Marzec A., Kowalska J., Szafrąńska A.** (2023). Characteristics of Oat and Buckwheat Malt Grains for Use in the Production of Fermented Foods. *Foods*, 12(20), 3747.
- Saleena P., Jayashree E., Anees K.** (2023). A comprehensive review on vacuum impregnation: Mechanism, applications and prospects. *Food and Bioprocess Technology*, 17(6), 1-14.
- Salvatori D., Andrés A., Chiral A., Fito P.** (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21(1), 59-73.
- Saravacos G.D., Maroulis Z.B.** (2011). *Food Process Engineering Operations* (1. Ed.). CRC Press.
- Sasimowski E., Budzynski M., Jelen B.** (1982). Analiza żywienia ogierów uznanych w Polsce. Cz. I. Analiza żywienia ogierów uznanych w rejonie konia małopolskiego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 264, 657-661.
- Schnitzenbaumer B., Arendt E.K.** (2013). A comparative study of oat (*Avena sativa*) cultivars as brewing adjuncts. *European Food Research and Technology*, 236, 1015-1025.
- Schnitzenbaumer B., Arendt E.K.** (2014). Effect of unmalted oats (*Avena sativa* L.) on the quality of high-gravity mashes and worts without or with exogenous enzyme addition. *European food research and technology*, 238, 225-235.
- Schnitzenbaumer B., Kerpes R., Titze J., Jacob F., Arendt E.K.** (2012). Impact of various levels of unmalted oats (*Avena sativa* L.) on the quality and processability of mashes, worts, and beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 70(3), 142-149.

- Schulze B., Peth S., Hubbermann E.M., Schwarz K.** (2012). The influence of vacuum impregnation on the fortification of apple parenchyma with quercetin derivatives in combination with pore structures X-ray analysis. *Journal of Food Engineering*, 109, 380-387.
- Sharma G.P., Prasad S.** (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99-105.
- Shephard G.S., van der Westhuizen L., Gatyeni P.M., Somdyala N.J., Burger H.M., Marasas W.F.** (2005). Fumonisin mycotoxins in traditional Xhosa maize beer in South Africa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 9634.
- Siegrist M., Hartmann C.** (2020). Consumer acceptance of novel food technologies. *Nature Food*, 1, 343-350.
- Sivamma P., Mounika E., Naga Hari Sairam N., Jagannadha Rao P.V.K.** (2021). Applications of vacuum technology in food processing. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 10, 914-918.
- Song C., Chen Y., Pu H., Li Z., Chen H., Meng L., Wang Y.** (2018). Modeling microwave heating of frozen chinese fast foods based on dielectric properties. *International Journal of Food Engineering*, 14, 9-10.
- Stutzman M.L.** (2003). A Comparison of Outgassing Measurements for Three Vacuum Chamber Materials. *AIP Conference Proceedings*, 671(1), 300-306.
- Sun X., Saleh A.S.M., Sun Z., Ge X., Shen H., Zhang Q., Yu X., Yuan L., Li W.** (2022). Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 153, 112483.
- Szostak-Kot J.** (2000) Wybrane zagadnienia z mikrobiologii ogólnej i przemysłowej, Wydawnictwo AE, Kraków.
- Szostak-Kot J.** (2010) Mikrobiologia produktów. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, Kraków., 102-104.
- Szwed L., Blazewicz J., Zembold-Gula A., Pelak M., Dawidowicz A.** (2009). Wpływ frakcjonowania i czasu słodowania ziarna jęczmienia na liczbę Kolbacha słodów oraz zawartość wolnego azotu alfa-aminokwasowego w brzezczkach. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 16(6) 6(67), 119-128.
- Tao Y., Yan B., Fan D., Zhang N., Ma S., Wang L., Wu Y., Wang M., Zhao J., Zhang H.** (2020). Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 593-607.
- Therdthai N., Zhou W.** (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia Opiz ex Fresen*). *Journal of Food Engineering*, 91(3), 482-489.
- Thuery J.** (1992). *Microwaves: industrial, scientific and medical applications*. Artech House, Norwood.
- Tian Y., Wu S., Zhao Y., Zhang Q., Huang J., Zheng B.** (2015). Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2620-2629.
- Van Remmen H.H.J., Ponne C.T., Nijhuis H.H., Bartels P.V., Kerkhof P.J.A.M.** (1996). Microwave heating distributions in slabs, spheres and cylinders with relation to food processing. *Journal of Food Science*, 61(6), 1105-1114.
- Vargas M., Chiralt A., Albors A., Gonzalez-Martinez C.** (2009). Effect of chitosan-based edible coatings applied by vacuum impregnation on quality preservation of fresh-cut carrot. *Postharvest Biology and Technology*, 51, 263-271.
- Velu V., Nagender A., Prabhakara Rao P.G., Rao D.G.** (2006). Dry milling characteristics of microwave dried maize grains. *Journal of Food Engineering*, 74(1), 30-36.
- Vogel W., Mazur, K., Sadownik, A., Gemke, M.** (2008). *Piwo warzone w domu*. Multico Oficyna Wydawnicza.
- Walde S.G., Balaswamy K., Velu V., Rao D.G.** (2002). Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Food Engineering*, 55(3), 271-276.

- Wang Q., Jiao X., Yan B., Meng L., Cao H., Huang J., Zhao J., Zhou W., Zhang H., Chen W., Fan D.** (2021). Inhibitory effect of microwave heating on cathepsin L-induced degradation of myofibrillar protein gel. *Food Chemistry*, 357, 129745.
- Wang W., Hu A., Li J., Liu G., Wang M., Zheng J.** (2022). Comparison of physicochemical properties and digestibility of sweet potato starch after two modifications of microwave alone and microwave-assisted L-malic acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210, 614-621.
- Wang X., Huang L., Zhang C., Deng Y., Xie P., Liu L., Cheng J.** (2020). Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116292.
- Wang Z.H., Shi M.H.** (1999). Microwave freeze drying characteristics of beef. *Drying Technology*, 17(3), 433-447.
- Warchalewski J.R., Gralik J., Wojtasiak R.Z., Zabiński J., Kusnierz R.** (1998). The evaluation of wheat grain odour and colour after gamma and microwave irradiation. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 1(1), 1-11.
- Welti-Chanes J., Barbosa-Cánovas G.V., Aguilera J.M.** (Red.). (2002). *Engineering and Food for the 21st Century*. CRC Press, Washington, D.C.
- Wijngaard H.H., Arendt E.K.** (2006). Optimisation of a mashing program for 100% malted buckwheat. *Journal of the Institute of Brewing*, 112, 57-65.
- Wijngaard H.H., Ulmer H.M., Arendt E.K.** (2005). The effect of germination temperature on malt quality of buckwheat. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 63, 31-36.
- Wilhelmson A., Oksman-Caldentey K.-M., Laitila A., Suortti T., Kaukovirta-Norja A., Poutanen K.** (2001). Development of a germination process for producing high beta-glucan, whole grain food ingredient from oat. *Cereal Chemistry*, 78, 715-720.
- Xie Y., Yan M., Yuan S., Sun S., Huo Q.** (2013). Effect of microwave treatment on the physicochemical properties of potato starch granules. *Chemistry Central Journal*, 7(1), 113, 1-7.
- Xue C., Sakai N., Fukuoka M.** (2008). Use of microwave heating to control the degree of starch gelatinization in noodles. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 357-362.
- Yang Q., Qi L., Luo Z., Kong X., Xiao Z., Wang P., Peng X.** (2017). Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch. *Food Hydrocolloids*, 69, 473-482.
- Ye S.-J., Baik M.-Y.** (2023). Characteristics of physically modified starches. *Food Science and Biotechnology*, 32(7), 875-883.
- Yi M., Tang X., Liang S., He R., Huang T., Lin Q., Zhang R.** (2024). Effect of microwave alone and microwave-assisted modification on the physicochemical properties of starch and its application in food. *Food Chemistry*, 446, 138841.
- Yongsawatdigul J., Gunasekaran S.** (1996a). Microwave vacuum drying of cranberries, part I: energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(1), 121-143.
- Yongsawatdigul J., Gunasekaran S.** (1996b). Microwave vacuum drying of cranberries, part II: quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(1), 145-156.
- Yoshizawa K., Kishi S.** (1985). Rice in brewing. (Juliano B.O.-red.) *Rice-Chemistry and Technology*, American Society of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- Yousif A.M., Evans D.E.** (2020). Changes in malt quality during production in two commercial malt houses. *Journal of the Institute of Brewing*, 126(3), 233-252.
- Zarnkow M., Kebler M., Burgerg F., Kreis S., Back W.** (2005). Gluten free beer from malted cereals and pseudocereals, Proceedings of the 30th European Brewery Convention, Prague, Contribution.
- Zhang J., Wang Z.-W., Shi X.-M.** (2009). Effect of microwave heat/moisture treatment on physicochemical properties of *Canna edulis* Ker starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(4), 653-664.
- Zhang M., Tang J., Mujumdar A.S., Wang S.** (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 524-534.

- Zhao Z., Shen X., Li H., Liu K., Wu H., Li X., Gao X.** (2022). Watching microwave-induced microscopic hot spots via the thermosensitive fluorescence of europium/terbium mixed metal organic complexes. *Angewandte Chemie International Edition*, 61., e202114340, 1-8.
- Zhong Y., Liang W., Pu H., Blennow A., Liu X., Guo D.** (2019). Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137, 870-877.
- Zhu L., Ma T., Li Y., Li Q.** (2015). Permeability analysis of high-adjunct-ratio spent grain layer in the high-gravity wort separation process. *Process Biochemistry*, 50(5), 846-852.
- Zhu Z., Guo, W.** (2017). Frequency, moisture content, and temperature dependent dielectric properties of potato starch related to drying with radio-frequency/ microwave energy. *Scientific Reports*, 7(1), 9311.

Strony internetowe

- Beer Filtration, <https://www.globalfilter.com/beer-filtration/> (dostęp 25 listopada 2024 r.)
- Cotterlaz P.** (2024). Barley. Exporters and Importers. <https://oec.world/en/profile/hs/https://oec.world/en/profile/hs/barley#trade>, (dostęp 30 kwietnia 2024 r.)
- Foreign Agricultural Service, USDA (2024). Barley. <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0430000>, (dostęp 30 kwietnia 2024 r.)
- Macko M.** (2022). Konstrukcja rozdrabniaczy do biomasy. http://naszaenergia.kujawsko-pomorskie.pl/fileadmin/doc/artykuly/nowe/KONSTRUKCJA_ROZDRABNIACZY_DO_BIOMASY.pdf, (dostęp 25 kwietnia 2024 r.)
- OEC World. Malt Extract. Available online: <https://oec.world/en/profile/hs/malt-extract> (dostęp 5 marca 2024).
- Pucek M.** (2017). Żywność nowej generacji - funkcjonalna, wygodna, transgeniczna. https://cdr.gov.pl/images/Brwinow/aktualnosci/2017/Zywnosc_nowej_generacji.pdf (dostęp 4 marca 2024).
- Shahbandeh M.** (2024). World barley production from 2008/2009 to 2023/2024. <https://www.statista.com/statistics/271973/world-barley-production-since-2008/>, (dostęp 30 kwietnia 2024 r.)
- Shantz, T.; Versmold, R.** Types of vacuum impregnation processes. *Die Casting Engineer*. (2013). Available online: www.diecasting.org/dce (dostęp 15 stycznia 2022).
- Slideshare: a Scribd company. <https://www.slideshare.net/>, dostęp 1 czerwca 2024 r.
- Zaleska A.** (2019). Polska żywność. Azjatyckie kraje kupują jej coraz więcej. <https://www.money.pl/gospodarka/polska-zywnosc-azjatyckie-kraje-kupuja-jej-coraz-wiecej-6420080434288257a.html>, (dostęp 29 kwietnia 2024 r.)

POTENCJAŁ APLIKACYJNY IMPREGNACJI PRÓŻNIOWEJ I OBRÓBKII PROMIENIOWANIEM MIKROFALOWYM W SŁODOWNICTWIE I BROWARNICTWIE

Streszczenie. Niniejsze opracowanie przedstawia kompleksowe i interdyscyplinarne podejście do analizy technologii produkcji siodu i piwa, łącząc aspekty technologiczne, ekonomiczne i środowiskowe. Stanowi ono wkład w rozwój wiedzy z zakresu inżynierii rolno-spożywczej oraz technologii żywności. Monografia promuje rozwiązania wpisujące się w koncepcję zrównoważonego rozwoju, m.in. są to optymalizacja procesów technologicznych, ograniczenie zużycia wody oraz wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych (np. młota browarniczego). Podejście to jest szczególnie ważne w kontekście zmieniającego się prawa unijnego dotyczącego ochrony środowiska oraz zmniejszenia śladu węglowego produkcji rolno-spożywczej. Wprowadzenie impregnacji próżniowej oraz obróbki mikrofalowej jako rozwiązań technologicznych w przetwarzaniu surowców w perspektywie może przyczynić się do wzrostu popularności tych metod w branży spożywczej, szczególnie siodownictwie i browarnictwie. Zastosowanie tych metod w przemyśle spożywczym ma potencjał w aspekcie poprawy efektywności energetycznej, zmniejszenia strat surowców oraz poprawy bezpieczeństwa mikrobiologicznego produktów końcowych. Ponadto, w pracy przeprowadzono szczegółową analizę stosowania niesiodowanych zbóż i pseudozbóż (np. sorgo, gryki) w browarnictwie. Badania te wpisują się w globalne trendy zwiększenia różnorodności surowców w przemyśle spożywczym. Surowce mogą wpływać na cechy organoleptyczne produktu końcowego oraz wydajność procesu, co wskazuje nowe kierunki badań w zakresie innowacyjnych receptur piwa oraz produktów bezglutenowych. Monografia może być wykorzystana jako materiał dydaktyczny dla studentów technologii żywności, inżynierii środowiska oraz ekonomii. Niniejsze opracowanie stanowi nie tylko podsumowanie aktualnego stanu wiedzy, ale także wyznacza nowe kierunki badań i aplikacji w przemyśle.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, innowacyjne techniki w przemyśle spożywczym, produkcja rolno-spożywcza.

APPLICATION POTENTIAL OF VACUUM IMPREGNATION AND MICROWAVE RADIATION TREATMENT IN THE MALTING AND BREWING INDUSTRIES

Summary. This study presents a comprehensive and interdisciplinary approach to the analysis of malt and beer technology, combining technological, economic and environmental aspects. It contributes to the knowledge of agri-food engineering and food technology. The monograph promotes solutions that fit into the concept of sustainable development, such as optimisation of technological processes, reduction of water consumption and use of waste and by-products (e.g. brewery thresh). This approach is particularly important in the context of changing EU environmental legislation and reducing the carbon footprint of agri-food production. The implementation of vacuum impregnation and microwave treatment as technological solutions in the processing of raw materials is expected to increase the popularity of these methods in the food industry, especially malting and brewing. The application of these methods in the food industry has the potential to improve energy efficiency, reduce raw material losses and improve the microbiological safety of final products. Moreover, the study includes a detailed analysis of the use of unmalted cereals and pseudo-cereals (e.g. sorghum, buckwheat) in brewing. This research is part of the global trends of increasing raw material diversity in the food industry. Raw materials can affect the organoleptic characteristics of the final product and the efficiency of the process, which indicates new research directions for innovative beer recipes and gluten-free products. The monograph can be used as teaching material for students of food technology, environmental engineering and economics. This study not only summarises the current state of knowledge, but also points out new directions for research and applications in industry.

Keywords: sustainability, innovative techniques in the food industry, agri-food production.

WIR
WYDAWNICTWO