

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Visy Anna
Budapest
2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**AKTÍV ULTRAHANG ALKALMAZÁSA HÚSOK PÁCOLÁSI
TECHNOLÓGIÁJÁBAN**

Visy Anna
Budapest
2024

A doktori iskola

Megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

Tudományága: Élelmiszertudományok

Vezetője: Simonné Dr. Sarkadi Livia
Egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Témavezető: Dr. Friedrich László Ferenc
Egyetemi tanár, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet
Állattermék és Élelmiszertartósítási Technológia Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az állati eredetű élelmiszerek tápanyagokban gazdag élelmiszerek. Számos kulcsfontosságú tápanyaggal járulnak hozzá az emberi étrendhez. Amellett, hogy magas biológiai értékű fehérjeforrásként szolgálnak, számos alapvető, az egészséget elősegítő mikrotápanyag a leghatékonyabban, vagy kizárólag az állati eredetű élelmiszerek fogyasztásával kerül be az emberi szervezetbe (Stanton, 2022). A hús tápláló élelmiszerforrás, amelyet a fogyasztók világszerte nagyra értékelnek. Összetételének köszönhetően azonban rendkívül romlandó, ezért tartósítani szükséges. Az egyik legősibb tartósítási mód a sózás, pácolás. A pácolás során olyan mennyiségű só juttatunk a húsba, amely gátolja a romlást okozó mikrobák szaporodását, kialakítja a termék állományát és ízét. A só bejuttatásának legrégebb óta ismert módja a hús sókristályokkal való befedése. Ekkor a hús felületén lévő nedvességtartalomban feloldódó só telített sóoldatot képez. A felületi telített sóoldat és a hús belső rétegei közötti koncentrációkülönbség hatására a só a húsba vándorol (Toldrá, 2004). A só vándorlása egy sok tényezőtől függő, lassú folyamat. Ennek gyorsítására különböző technikákat dolgoztak ki. Ilyen például a hús sóoldatban való áztatása, amely azáltal tudja rövidíteni a pácolás időtartamát, hogy a só már oldott formában áll rendelkezésre a húsba való bevándorláshoz. A pácolás gyorsításának „újyszerűbb” módja a sóoldat vagy páclé húsba való injektálása, ami a só vándorlási úthosszának rövidítésével képes a pácolási időt csökkenteni. Ezt ki szokták egészíteni a tumblerezés (ütve forgatás) műveletével, amely során a beinjektált húsokat egy forgó dobban mechanikailag fellazítják, segítve így a páclé húsban való gyorsabb eloszlását. A húsipari pácolási technológia fejlesztési irányai az utóbbi évtizedekben az injektáló és tumblerező berendezések energiahatékonyságának növelését jelentették. Valódi fejlesztés nem, vagy csak laboratóriumok falai között maradván történt. Ezért indokolt különböző alternatív technikák vizsgálata. Ilyen például a nagy hidrosztatikus nyomáskezelés, a pulzáló elektromos erőter (PEF) (Cropotova et al., 2021), a vákuum alatt végzett pácolás (Tomic et al., 2020), a fagyasztás-felengedtetés (Ortiz et al.,

2021), és az ultrahang is. Ezek között vannak ígéretesek és kevésbé ígéretesek. Szakirodalmi eredmények alapján az ultrahang az előbbi kategóriába sorolható (Sergeev et al., 2009; Xiong et al., 2020). Az ultrahang pácolást gyorsító hatása elsősorban az ultrahang egyik kísérő jelenségének, a kavitációnak tudható be. A kavitáció ultrahang hatására folyadékban kialakuló mikroméretű üregek létrejöttét jelenti. Ezek az üregek vagy összeomlanak, vagy hosszabb-rövidebb ideig oszcillálnak. Összeomlás esetén nagy sebességű (kb. 400 km/h) folyadékáramot hoznak létre (micro-jet), amelyek fizikai sérülést képesek okozni szilárd felületeken, képesek átszakítani a sejtek falát (Cárcel et al., 2012). A sejtfalak ilyen jellegű sérülései azok áteresztőképességét, membrán-permeabilitását növelik, ami különböző anyagok (pl.: pácolás során a só) sejtbe való gyorsabb bejutását teszik lehetővé (Cárcel et al., 2007). Több tanulmány is bizonyítja a pácolás során a só húsba való gyorsabb bejutását ultrahang alkalmazásával (Carlos et al., 2007; Ozuna et al., 2013; Siró et al., 2009). Ebből kiindulva az ultrahang ígéretes alternatív technikának tekinthető. Ismert tehát, hogy az ultrahang önmagában nagy valószínűséggel képes gyorsítani a pácolást. Jelenleg nem áll rendelkezésre azonban információ arról, hogy tovább gyorsítható-e a pácolás, ha nemcsak az ultrahang által létrehozott kavitációs üregek hatását használjuk ki, hanem direkt módon, hidrodinamikai elven hozunk létre plusz kavitációs üregeket, buborékokat a páclében. Ez a téma a hús-ipari pácolási technológia új kutatási területeként kínálkozik és olyan alapkutatásokat céloz meg, amelyek záros határidőn belül a gyakorlatban is elterjedhetnek.

Mivel jelenleg nem áll rendelkezésre információ arról, hogy a kavitációnak intenzívebbé tétele mikrobuborékok generálásával a páclében hogyan hat a sóbevitelre, ezért kutatásom célkitűzése az ultrahang és a mikrobuborékok hatásának vizsgálata a só- és víz diffúzióra, anyagtranszport folyamatokra, fehérjék állapotára, mikroszerkezetre és minőségi tulajdonságokra nézve sertéskaraj esetében. Ehhez az alábbi kísérletek végzem el:

- Sertéskaraj húshenger ($d=15$ mm, $h=80$ mm) száraz- és nedves pácolása, valamint ultrahanggal (20 kHz; 100 W) kombinált nedves pácolása 26,3 m/m% sókoncentrációjú páclében 180 percig. Ezzel célozom vizsgálni az ultrahang hatását.
- Sertéskaraj húshenger ($d=15$ mm, $h=80$ mm) nedves pácolása, ultrahanggal (20 kHz; 100 W) kombinált nedves pácolása, valamint mikrobuborékkoltatással kombinált ultrahangos (20 kHz; 400 W) nedves pácolása 20 m/m% sókoncentrációjú páclében 180 percig. Ezzel célozom vizsgálni az ultrahang és a mikrobuborékok együttes hatását.
- Kisüzemi pilot méretben a csont nélküli sertéskaraj 20 m/m% sókoncentrációjú páclében való nedves pácolása és a mikrobuborékkoltatással kombinált ultrahangos (35 kHz, 1 kW; 2 db lapsugárzó) nedves pácolása. Ezzel célozom egész húsdarabon, kisüzemi méretű berendezésben vizsgálni az ultrahang és mikrobuborékok együttes hatását.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A pácolási kísérletek ismertetése

Kutatási munkám során a laboratóriumi kísérleteimben bőr és csont nélküli sertéskarajt (*m. Longissimus dorsi*, pH $5,82 \pm 0,05$) használtam. Az alapanyagból $d=15$ mm átmérőjű és $h=30$ mm magasságú húshengereket vágtam ki a rostiránnyal párhuzamosan.

A kisüzemi, pilot méretű kísérletben csont nélküli, bőrös sertéskarajt (*m. Longissimus dorsi*, pH $5,58 \pm 0,06$) használtam.

A munka első kísérleteként a száraz sózás, nedves pácolás és az ultrahanggal kombinált nedves pácolásokat végeztem el, majd ezt követően egy új kísérlet keretében került sor a nedves pácolás, az ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolások elvégzésére. A száraz pácolás során a húshengereket nitrites pácsóval fedtem be úgy, hogy a húshengereket sóágyra fektettem, majd a felületüket is nitrites pácsóval borítottam be 1:10 hús-só tömeg-aránnyal. Mivel a húsfelületre juttatott nitrites pácsó a hús felületi nedvességtartalmában feloldódva telített sóoldatot (26,3 m/m%) képez, így a nedves pácoláshoz és az ultrahanggal kombinált nedves pácoláshoz telített sóoldatot készítettem nitrites pácsó felhasználásával. A nedves pácolást és az ultrahanggal kombinált nedves pácolást rozsdamentes fém edényben végeztem, 1:25 hús-páclé aránnyal. Az ultrahanggal kombinált nedves pácolást 20 kHz frekvenciájú, 100 W teljesítményű Active Ultrasound Laboratory ultrahangos kezelőberendezéssel (Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország), 5,09 W/cm² intenzitással hajtottam végre.

A laboratóriumi kísérletek II. körét – igazodva az iparban használt páclé sókoncentrációhoz – 20 m/m% sókoncentrációjú páclében végeztem. A nedves pácolás és az ultrahanggal kombinált nedves pácolás az előzőekben ismertetett módon történt. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás során a mikrobuborékok létrehozása a páclében egy gáz-folyadék keverő szivattyúval (Típus:

YL8022, Model: 25GO-2SS, 1.1 kW, Guangzhou Ozone Environmental Technology Co. GZ, Kína) történt, ami gyártói információ szerint 20-30 μm mérettartományú buborékokat állít elő. A mikrobuborékok képzése légköri levegő páclébe keverésével, 100 L/perc térfogatárammal, folyamatos üzemvitelben történt. A pácolás során a húshengereket kémcsőtartó állványba helyezve merítettem a páclébe olyan módon, hogy az állványt a pácoló edény alján elhelyezett ultrahang sugárzóra (20 kHz, 400 W, 14,14 W/cm², Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország) helyeztem. A pácolást 1:500 hús-páclé aránnyal, 8 °C-on végeztem, amelyet a rendszerbe épített hűtőrendszer biztosított.

A kisüzemi, pilot méretű mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérlet elvégzéséhez 2 db egyenként 35 kHz frekvenciájú, 1 kW teljesítményű ultrahang lapsugárzót használtam. Az ultrahang sugárzók fölé 3 húsréteg magasságban helyeztem el az alapanyagokat (8 db/réteg). Abból a célból, hogy az alapanyag minél nagyobb felületen tudjon érintkezni az ultrahang hullámokkal és a páclével az alapanyag sorok közé 100 mm magasságú műanyag távtartó rácsokat helyeztem. A pácoláshoz 20 m/m% sókoncentrációjú páclevet használtam. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolást az alábbi program lépésekkel végeztem:

1. lépés 10 perc mikrobuborék képzés a páclében (ultrahang besugárzás nélkül)
2. lépés 30 perc ultrahang besugárzás (mikrobuborék képzés nélkül)
3. lépés 20 perc pihentetés (ultrahang besugárzás és mikrobuborék képzés nélkül)

A lépéseket 16 ciklusban ismételt meg egy nap alatt, amivel a célom az volt, hogy 8 óra/nap nettó ultrahang besugárzást érjek el. A ciklusokat 8 napon keresztül ismételt meg, igazodva a bőrös sertéskaraj üzemi pácolási időtartamához. A pácolást 8 °C hőmérsékletű pácoló-helyiségben végeztem, 1:12 hús-páclé tömegaránnyal. A pácolást követően az alapanyagok 48 óra időtartamú hidegfüstölésre (<20 °C), majd ezt követően 30 napig tartó érlelésre (75% RPT, 8 °C) kerültek. A kisüzemi, pilot méretű kísérletben kontroll mintaként a mikrobuborékolatás és ultrahang besugárzás nélkül, nedves pácolással készített termék szolgált.

2.2. Elvégzett számítások s vizsgálatok

A só diffúziójának számításához a húsminták sótartalmát (C) Mohr-féle argentometriás módszerrel (AOAC, 1990) határoztam meg. A víz diffúzió számításához szükséges nedvességtartalom meghatározásához a mintákat 105°C-on, tömegállandóságig szárítottam. A só- és vízdifúzió számításához a húsminták kiegyenlítődési só- (C_{eq}) és nedvességtartalmának (X_{eq}) meghatározását az I. és II. laboratóriumi kísérletekben mérésrel határoztam meg. A III. kísérletben a csont nélküli, bőrös sertéskaraj kiegyenlítődési só- és nedvességtartalmát Körmendy (1991) alapján számítással határoztam meg. A só- és nedvesség diffúziójának és anyagtranszportjának jellemzésére az [1] – [5] modell egyenleteket használtam. A számítások során alapfeltevésem volt, hogy a kísérletben használt húsmintákban azok geometriai méretei miatt egyirányú (sugarirányú) diffúzió történik, valamint, hogy a pácolások során a páclé sókoncentrációja állandó.

Marabi et al.,
2003

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - e^{-\left(\frac{tD_s}{l^2}\right)^\beta} \quad [1]$$

Abbasi et al.,
2012

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_s t}{R^2}\right) \quad [2]$$

Telis et al.,
2003

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{R^2}\right) \quad [3]$$

Peleg, 1988

$$SC = SC_0 + \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad [4]$$

Zugarramurdi
and Lupín,
1980

$$SC = SC_0 \exp(-k_s t) + SC^\infty (1 - \exp(-k_s t)) \quad [5]$$

Az [1] – [5] egyenletekben a sótartalom helyére nedvességtartalmat helyettesítve a víz diffúziós tényezője (D_v) és anyagtranszport állandói számolhatók. A diffúziós tényezők és anyagtranszport állandók értékét a Microsoft Excel 365 szoftver SOLVER bővítményével, nem lineáris ÁRG módszerrel számítottam ki úgy, hogy a mért és a számított só és víztartalom értékek közötti négyzetes eltérések

összegének gyökét (Root Mean Squares of Error, RMSE) minimalizáltam. A modellek és a mért adatok kapcsolatának erősségét a determinációs együttható (R^2) értékével jellemeztem.

A minták vízkötő képességének meghatározásához megmértem a húsminták pácolás előtti tömegét ($mt,0$), majd a pácolás utáni tömegét (mt). Ezek különbségét a pácolás előtti tömeg %-ában kifejezve jellemeztem a vízkötő képességet. A vízkötő képesség azt mutatja meg, hogy a hús a kiindulási tömegére vetítve mennyi vizet képes felvenni vagy leadni a különböző pácolási műveletek során.

A fehérjedenaturáció vizsgálatát differenciális pásztázó kalorimetriás (Differential Scanning Calorimetry, DSC) méréssel végeztem SETARAM MicroDSC III (SETARAM Instrumentation Caluire, Franciaország) berendezésben. A méréseket a húshengerek hosszirányát tekintve a középső részükből vett $217,7 \pm 10$ mg mennyiségű mintákon végeztem $25-90$ °C hőmérséklettartományban, 1 °C/perc felfűtési sebességgel. A húsminták mikrostruktúráját dehidratált metszeteken végeztem Thermo Scientific™ Prisma™ E SEM (Waltham, Massachusetts, USA) pásztázó elektronmikroszkóppal.

Az állománymérést egy 500 N erőmérő cellával felszerelt SMS TA.XT Plus (Stable Micro Systems Ltd., Egyesült Királyság) berendezéssel végeztem. A húshengerek állományának jellemzésére állományprofil analízis (Texture Profile Analysis, TPA) mérési módszert használtam. A bőrös karaj minták állománymérését Warner-Bratzler (WB) erőmérő cellával végeztem. A vízaktivitás mérését LabMaster aw (Novasina AG, Svájc) berendezéssel hajtottam végre. A színmérést Minolta CR 400 (Konica Minolta Inc., Japán) tristimulusos színmérő készülékkel végeztem. Az adatokat CIELab színingertérben értékeltem, ahol az L^* a világosságot, az a^* a vörösséget, és b^* a sárgaságot jelenti. A nedves pácolású és a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású bőrös karaj minták közötti színinger különbséget (ΔE^*) az adott mérési napokon mért átlag L^* , a^* és b^* értékekből számoltam. A pH mérést Testo 206-pH2 (Testo GmBh, Ausztria) szűrőszondás, hőmérséklet-kompenzációval rendelkező, pH-mérővel végeztem.

A mérési adatok statisztikai értékelését varianciaanalízissel (Analysis of Variance, ANOVA) végeztem IBM SPSS Statistics 23.0 (IBM Corp., USA) programban 95%-os konfidencia intervallummal ($p < 0,05$). A vízkötő képesség, az állomány, a vízaktivitás és a színmérés eredményeire exponenciális egyenletet [6] illesztettem:

$$y = A \times (1 - \exp(-k \times t^n)) \quad [6]$$

EREDMÉNYEK

Elvégzett kísérleteim során megállapítottam, hogy az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával telített sóoldat esetén szignifikánsan magasabb sókoncentráció érhető el, mint a száraz pácolással. A nedves és az ultrahangos nedves pácolással kezelt minták sótartalom értékei között is jelentős a különbség. A minták nedvességtartalma az ultrahangos nedves pácolása során bizonyult a legalacsonyabbnak. A minták között nem volt szignifikáns különbség. A diffúzió sebességének összehasonlításához a só- (D_s) és víz diffúziós (D_v) tényezőket különböző matematikai modellek (Abbasi modell, Marabi modell, Telis modell) alkalmazásával határoztam meg. A modellek pontosságának vizsgálata során megállapítottam, hogy az Abbasi modell mutatta a legszorosabb illeszkedést a mért és számolt értékek között mind a só-, mind a víztartalom mérési eredmények esetén. Az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással 2-szer gyorsabb sódiffúzió érhető el a száraz pácolással, és 1,5-szer gyorsabb a nedves pácolással összehasonlítva. A víz diffúziós tényezőjének vizsgálata esetén 1,6-szer nagyobb értéket kaptam az ultrahangos pácolás alkalmazásával a száraz pácoláshoz, és 1,3-szer nagyobbat a nedves pácoláshoz képest. A tömegátadás kinetikájának jellemzésére empirikus modelleket (Peleg modell, Zugarramurdi és Lupín modell) használtam. A modellek használatával számított mutatók szintén alátámasztották az ultrahangos kezeléssel elérhető gyorsabb sófelvételt és gyorsabb nedvességtartalom csökkenést. A Peleg modell alkalmazásával számolt egyensúlyi sótartalom (St_{eq}) értékek alapján az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással akár 43%-kal csökkenthető a pácolási idő, míg a nedves pácolással szemben 29%-os csökkenés érhető el. A vízkötő képesség mindegyik pácolási mód esetén csökkent, ami a minták dehidratálódására utal. A fehérjedenaturációs vizsgálatok alapján már az első mintavétel alkalmával (15. perc) kimutatható volt a hús fehérjéinek denaturációja, ami már a száraz pácolás során elért legalacsonyabb, 3,58 m/m%-os sókoncentráció mellett is megfigyelhető volt. A denaturálható fehérjék mennyisége folyamatosan csökkent, az ultrahanggal kezelt minták esetén csak a kísérlet 30. percéig (6,96 m/m%

sótartalom mellett) volt jelen denaturálható fehérje a húsból. A nedves pácolásnál a 60. (7,32 m/m% só-tartalom), a száraz pácolásnál pedig még a 90. percben (7,98 m/m %) is kimutatható volt denaturálható fehérje. A vízkötő képesség csökkenésének hatása az elektronmikroszkópos képeken és az állománymérés során kapott eredményekből is látható. A pácolás hatására a rostszálak átmérője csökkent, a minták keménysége nőtt. Az ultrahang hatással van a húsok állományára, alkalmazásával puhább állomány érhető el, mint a másik két pácolási móddal.

A mikrobuborékok páclében történő bevezetése tovább fokozza a sódiffúziót. A mikrobuborékkal kiegészített ultrahangos nedves pácolással 120 perces kezelést követően szignifikánsan magasabb só-tartalom érhető el, mint az ultrahangos pácolással. A II. kísérletben a sódiffúzió vizsgálatánál szintén az Abbasi, míg a víz diffúziója esetén a Telis modell mutatta a legerősebb kapcsolatot. 20 m/m% só-koncentrációjú páclében történő kezelés esetén az ultrahang alkalmazásával 1,3-szer, míg a mikrobuborékkal kiegészített ultrahangos kezeléssel 1,6-szer gyorsabb sódiffúzió érhető el, mint a hagyományos nedves pácolással. A hagyományos nedves pácolással összehasonlítva 1,7-szer, míg a sima ultrahangos pácolással összehasonlítva 1,2-szer gyorsabb vízdifúzió valósítható meg a mikrobuborék alkalmazásával. A Peleg modell alapján a mikrobuborékos ultrahang alkalmazásával a pácolási idő 30%-kal csökkenthető a hagyományos nedves pácolással szemben, és 11%-kal az ultrahangos pácolással szemben. A vízkötő képesség az I. kísérletben tapasztaltakhoz hasonlóan szintén csökkenő tendenciát mutatott az egész kísérlet alatt. A minták dehidratálódása a „kiszózás” jelenségével magyarázható, ami már az első mintavételi pontnál (15. perc) tapasztalható. Ennél a pontnál ($\geq 3,25\%$ só-tartalom) már a fehérjék denaturációja is megfigyelhető, a miozin és a szarkoplazma fehérjéket képviselő denaturációs csúcsok nem voltak fellelhetők. 20%-os páclé alkalmazása esetén a vízvesztés ellenére 180 perces pácolást követően a rostszálak duzzadása figyelhető meg. A mikrobuborékkal kombinált ultrahanggal kezelt mintát ábrázoló felvételeken a húrostok felületén apró, kö-

rülbelül 2-3 μm átmérőjű pórusok figyelhetők meg, melyek feltehetően a mikrobuborékok összeomlása által okozott sérülések következményei lehetnek. Ez a szerkezetroncsoló hatás még puhább állományt eredményez, mint az önmagában történő ultrahang alkalmazása.

A mikrobuborékok laboratóriumi méretű pácolás során való alkalmazása ígéretes eredményeket mutatott, így indokoltnak tartottam pilot méretben történő vizsgálatát is. Az ipari kísérletet bőrös karajon végeztem el. A sótartalom eredmények alapján azt a megállapítást tettem, hogy a mikrobuborékkal kiegészített ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával jelentősen lerövidíthető a pácolt hús pácolási és érlelési ideje a páclé egész húspanban való egyenletes és gyorsabb eloszlásának köszönhetően. A III. kísérletben a só- és vízdifúzió vizsgálata esetén a Marabi modell bizonyult a leginkább megfelelőnek. A modell használatával számolt só-difúziós tényezők alapján a 1,25-szer gyorsabb sódifúzió érhető el a mikrobuborék alkalmazásával a hagyományos nedves pácoláshoz képest. A víz difúziójánál 1,3-szer nagyobb értékeket kaptam az mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos kezelés során. Az MÉ 1-3/13-1 előírása alapján a pácolt termékek vízáktívitás (a_w) értéke legfeljebb 0,91 lehet. A vízáktívitás értékek alapján a mikrobuborékok páclébe történő bevezetésével 14 nappal rövidíthető a pácolási és érlelési idő. A bőrös karaj esetében a mikrobuborékkal kiegészített ultrahangos minták világossági tényező értéke szignifikánsan kisebb volt. A vörös és sárga színtényezők nem voltak statisztikailag is alátámasztható hatása a pácolási módoknak. A kísérlet végére a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahanggal kezelt minták azonban szignifikánsan puhábbnak bizonyultak. A kísérlet során a pH értékekben növekedés volt megfigyelhető. A pH értékekre a pácolás és érlelés során lejátszó folyamatoknak volt jelentős hatása, a pácolási módoknak kevésbé.

Az eredmények alapján a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos kezelés alkalmazása a hús pácolása során rendkívül eredményes a só- és vízdifúzió gyors-

sítása, a vízaktivitás csökkentése, valamint a puhább állomány elérése szempontjából. Alkalmazásával a pácolási és érlelési idő csökkenthető, a termék minősége javítható.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Doktori disszertációmban három kísérletben vizsgáltam a különböző pácolási módok, valamint az ultrahang és a mikrobuborékkal kiegészített ultrahang hatását a hús pácolása során.

Eredményeim alapján a 180 perces pácolás végére az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával magasabb sótartalom érhető el a száraz-, valamint a nedves pácolásokhoz képest. Ennek feltevésem szerint a lehetséges oka, hogy az ultrahang kísérőjelensége, a kavitáció úgynevezett „szivacs-hatást” generál a húsban, aminek köszönhetően a sejtfalakban mikrocsonkok alakulnak ki. Ezek a mikrocsonkok gyorsabb diffúziós folyamatokat tesznek lehetővé a pácolási folyamatok során. A számolt diffúziós tényező értékek alapján megállapítottam, hogy az ultrahangos nedves pácolással gyorsabb sódiffúzió érhető el a nedves- és a száraz pácolással összehasonlítva. A húsminták nedvességtartalmában csökkenő tendenciát tapasztaltam. A telített sóoldat alkalmazásával a hús és a sóoldat között olyan nagy a koncentráció különbség, hogy a páclé ozmotikus „húzóereje” nagyobb, mint a vízmolekulákkal körülvett só ionok (Na^+ , Cl^-) hús irányába mutató diffúziója. A húsminták nedvességtartalma a kísérlet során az ultrahanggal kombinált nedves pácolás alkalmazása mellett csökkent a legnagyobb mértékben. Ennek a kezelésnek az alkalmazásával jóval gyorsabb vízdiffúzió mutatkozott a nedves- és a száraz pácoláshoz képest. A Peleg modell használatával megállapítottam, hogy a só felvételének és a víz leadásának kezdeti sebessége az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással érhető el. A húsban elért magas sókoncentráció a fehérjék denaturálódását okozza, ami a minták dehidratálódását eredményezi. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek alapján a pácolás, valamint az ultrahang alkalmazása a miofibrillumok bizonyos fokú deformációjához vezetett, a rostok vastagsága csökkent, és azok eltérő méretet mutattak. Az ultrahang által kiváltott kavitáció jelenségének köszönhetően a hús felülete egyenetlen lett, szerkezete roncsolódott, melynek következtében puhább állományt is eredményezett a száraz- és nedves pácolással készített mintákhoz képest.

Vizsgálataim során megfigyeltem, hogy a páclébe pluszban bevezetett mikrobuborék tovább gyorsítja a diffúziós folyamatokat, ezáltal magasabb sókoncentrációt eredményezve a húspan. A minták dehidratációját a 20 m/m%-os páclé koncentráció alkalmazása esetén is tapasztaltam, a sertéskaraj húsminták 11-15% közötti nedvességtartalom csökkenést mutattak a kísérlet alatt. A sebességállandók alapján a mikrobuborékok használata nagyobb mértékben befolyásolja a nedvesség távozásának kezdeti sebességét, mint a sófelvételét. A minták vízkötő képessége ebben a kísérletben is negatív értékeket mutatott, az a pácolási idő előrehaladtával folyamatosan csökkent. Ez a húsfehérjék só hatására bekövetkező depolimerizációjának, a kisózásnak az eredménye. A kisózás következtében a húsfehérjék denaturációja is gyorsabban végbemegy. A denaturálható fehérjék mennyisége nagyobb mértékben csökkent a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás alkalmazásával, hatására a húsfehérjék denaturációja tehát nagyobb mértékű, ami könnyebben emészthető fehérjeforrást jelent. A mikroszkopos felvételeken a rostszálak duzzadását tapasztaltam, annak ellenére, hogy a minták dehidratálódtak. Ez alapján arra lehet következtetni, hogy a duzzadás nem a vízvisszatartás, hanem feltehetően az ultrahang okozta szerkezeti változás hatása, mely 20 m/m%-os páclé alkalmazása mellett még érvényesül. A mikrobuborékok bevezetése apró pórusok kialakulását eredményezi a hús felületén, a szerkezet tehát nagyobb mértékben roncsolódik, így az állomány tovább puhul az önmagában alkalmazott ultrahangos kezeléshez képest.

A sótartalom mérés során kapott eredmények a III. kísérletben is a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés hatását mutatják a sóbehatolásra. A mikrobuborékok összeomlásának következtében kialakult microjetek könnyítik a só húsba való behatolását. A kombinált kezelés alkalmazása kedvezően befolyásolta a sódiffúzió kinetikáját és a sótartalom termékben történő kiegyenlítődését is. A hagyományosan pácolt termékeknel az egyik fő cél a nedvesség eltávolítása a termékből. A nedvesség eltávolításával a vízaktivitás (a_w) értéke is csökken, ami

a termék eltarthatóságát jelenti. Pácolt termékek esetén a vízaktivitás értéke maximum 0,91 lehet. A mikrobuborékos ultrahangos pácolás alkalmazásával kb. 14 nappal rövidíthető a pácolási és az érlelési idő a nedves pácoláshoz képest, a kísérletben alkalmazott körülmények között.

A bőrös karaj minták színében a pácolás és érlelési folyamat során változás következett be, a kísérlet végére a minták szignifikánsan sötétebbek és szignifikánsan vörösebbek lettek a nyers húshoz képest. A pácolási módoknak a világossági tényező (L^*) értékére volt szignifikáns hatása, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással készített minták szignifikánsan sötétebbek voltak, ami a gyorsabb sóbejutással és a gyorsabb vízleadással magyarázható. A termékek száradásának köszönhetően a minták keménysége folyamatosan nőtt a kísérlet alatt, jelentősebb mértékben az érlelési szakaszban. Az ultrahang szerkezetromboló hatását ipari körülmények között is tapasztaltam, a kísérlet végére a kavitáció intenzívebbé tétele szignifikánsan puhább állományt eredményezett. Megfigyeltem, hogy a pácolási és érlelési kísérlet során a húsminták pH értéke nőtt, jelentősebb növekedést az érlelés kezdetekor tapasztaltam, ami a beinduló proteolízis eredményeként keletkező szabad aminosavak jelenlétével függhet össze.

Méréseim során kapott eredményeim alapján megállapítottam, hogy az ultrahang alkalmazásával a pácolás során lezajló diffúziós folyamatok felgyorsíthatók. Azonban a kisózás jelenségével számolni kell, ami eredményeim alapján 3,25-3,58 m/m% sótartalomnál következett be.

A kavitáció jelenségének intenzívebbé tétele mikrobuborékok páclébe vezetésével hasznos kiegészítése lehet az ultrahangos pácolási technológiának a gyorsabb só- és vízdifúzió, gyorsabb fehérjedenaturáció, gyorsabb vízaktivitás csökkenés és puhább állomány elérése érdekében. A kezelés alkalmazása egyrészt precíziós pácolási technológiát tenne lehetővé, másrészt a fogyasztói igények gyorsabb ki-elégítése valósulhat meg.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Megállapítottam, hogy sertéskaraj húshengerek ($d=15$ mm, $h=80$ mm) 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású ultrahanggal kombinált nedves pácolása kétszer gyorsabb sódiffúziót és 1,6-szer gyorsabb vízdiffúziót eredményez a száraz pácoláshoz képest telített sóoldatban történő, 180 perces pácolása esetén.
2. Megállapítottam, hogy sertéskaraj húshengerek ($d=15$ mm, $h=80$ mm) mikrobuborékkoltatással kombinált 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású ultrahangos pácolása 1,2-szer gyorsabb só- és vízdiffúziót eredményez az ultrahanggal kombinált nedves pácoláshoz képest 20 m/m%-os sókoncentrációjú páclében történő, 180 perces pácolása esetén.
3. Megállapítottam, hogy sertéskaraj húshengerek ($d=15$ mm, $h=80$ mm) telített sóoldatban, 8°C-on történő, 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású ultrahangos pácolása esetén a pácolási idő 43%-kal csökkenthető a száraz pácoláshoz, és 29%-kal a nedves pácoláshoz képest, a 20 m/m%-os páclében való mikrobuborékkoltatással kombinált 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású ultrahangos pácolása esetén a pácolási idő 30%-kal csökkenthető a nedves pácoláshoz, és 11%-kal az ultrahanggal kombinált nedves pácoláshoz képest a nyers sonkafélék maximális 5 m/m%-os sótartalmának figyelembevételével a Peleg modell alapján.
4. Megállapítottam, hogy sertéskaraj húshengerek ($d=15$ mm, $h=80$ mm) 20 m/m%-os páclében, 8°C-on történő, 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású ultrahanggal kombinált, valamint mikrobuborékkoltatással kombinált 20 kHz, $5,09$ W/cm² intenzitású 60 percig tartó ultrahangos pácolása esetén (6,96 m/m% és 7,51 m/m% sótartalom mellett) denaturálható fehérje nem mutatható ki.
5. Megállapítottam, hogy a 20 m/m%-os sóoldatban, 180 percig tartó mikrobuborékkoltatással kombinált 20 kHz, $5,09$ W/cm² ultrahangos pácolás a sertéskaraj húrostjainak szerkezetváltozását okozza, duzzadását 28%-ban növeli és felületén mikroméretű pórusokat hoz létre.

6. Megállapítottam, hogy mikrobuborékoltatással kombinált 35 kHz, 2,74 W/cm² ultrahangos pácolás alkalmazásával a vízaktivitás alapján 36%-kal rövidíthető a pácolási és az érlelési idő a nedves pácoláshoz képest 2,3-2,5 kg csont nélküli bőrös sertéskaraj 20 m/m% sókoncentrációjú páclében történő pácolása esetén.
7. Megállapítottam, hogy 2,3-2,5 kg tömegű csont nélküli bőrös sertéskaraj mikrobuborékoltatással kombinált 35 kHz, 2,74 W/cm² 8 napig tartó ultrahangos pácolása és 30 napig tartó érlelése 11%-kal puhább terméket eredményezett a csak nedves pácolással készült termékhez képest.

PUBLIKÁCIÓK

Impakt faktoros folyóiratcikk

Visy, A.; Jónás, G.; Szakos, D.; Horváth-Mezőfi, Zs.; Hidas, K. I.; Barkó, A.; Friedrich, L. (2021): Evaluation of ultrasound and microbubbles effect on pork meat during brining process. ULTRASONICS SONOCHEMISTRY 75 Paper: 105589, 8 p. **D1**

Visy, A.; Hidas, K. I., Barkó, A., Nguyen, L. L. P., Friedrich, L., Jónás, G. (2021): Effect of wet-curing on physical properties and proteins of cured ham. PROGRESS IN AGRICULTURAL ENGINEERING SCIENCES 17: S1 pp. 145-155., 11 p. **Q3**

Visy, A., Hidas, K. I., Surányi, J., Jónás, G., Friedrich, L. (2020): Monitoring of salt content during the dry salting of ham. PROGRESS IN AGRICULTURAL ENGINEERING SCIENCES 16 S2 pp. 45-54., 10 p. **Q3**

Visy, A., Csonka, J., Hidas, K. I., Jónás, G., Friedrich, L. (2020): Examination of the parameters of active ultrasound treatment for the quality of curing. JOURNAL OF HYGIENIC ENGINEERING AND DESIGN 30 pp. 120-124. 5 p. **Q4**

Visy, A., Hidas, K. I., Csonka, J., Friedrich, L., Jónás, G. (2019): Combined effect of various nitrite concentration and high pressure treatment on functional characteristics of raw meat batter. JOURNAL OF HYGIENIC ENGINEERING AND DESIGN 26 pp. 47-51., 5 p. **Q4**

Impakt faktoral és Q1-Q4 minősítéssel nem rendelkező folyóiratcikkek

Visy, Anna; Hidas, Karina Ilona; Koósz, Zsuzsanna; Barkó, Annamária; Horváth-Mezőfi, Zsuzsanna; Lien, Phuong Le Nguyen; Friedrich, László; Jónás, Gábor (2021): Az ultrahang és a nagy hidrosztatikus nyomású kezelés kombinált hatásának vizsgálata a hús pácolása során. ACTA AGRONOMICA ÓVÁRIENSIS 62. III pp. 88-110., 23 p.

IRODALOMJEGYZÉK

Abbasi Souraki, B., Ghaffari, A., Bayat, Y., 2012. Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. *Food and Bioproducts Processing* 90, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.11.015>

Körmendy, L., 1991. A pácolásnál játszódó fizikai folyamatok. II. Húsipari Továbbképző Napok, Pácolt termékek gyártásának elmélete és gyakorlata, I. kötet. p. 78-84.,

Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M., Saguy, I.S., 2003. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *Eur Food Res Technol* 217, 311–318. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0719-y>

Peleg, M., 1988. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Journal of Food Science* 53, 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>

Stanton, A., 2022. 4. How much Meat and Dairy is Good for Us? The Importance of Transparent Evidence-Based Health Metrics. *Animal - science proceedings* 13, 2. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.03.005>

Telis, V.R.N., Romanelli, P.F., Gabas, A.L., Telis-Romero, J., 2003. Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38, 529–535. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000400012>

Zugarramurdi, A., Lupín, H.M., 1980. A Model to Explain Observed Behavior on Fish Salting. *Journal of Food Science* 45, 1305–1311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb06543.x>