



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

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	4
1. BEVEZETÉS	5
2. CÉLKITŰZÉS	7
3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	8
3.1. A hús összetétele és szerkezete	8
3.2. A pácolás eredete.....	10
3.3. A pácolás módjai	11
3.4. A pácolás hatása a húsokban	14
3.5. Az érlelést befolyásoló tényezők.....	20
3.6. Diffúziós és empirikus modellek.....	23
3.7. A pácolást gyorsító eljárások.....	25
3.7.1. Az ultrahang	27
4. ANYAG ÉS MÓDSZER	41
4.1. A kísérletek és mérések helyszíne	41
4.2. A kísérleti alapanyag	41
4.3. A pácolási kísérletek ismertetése.....	41
4.3.1. Mintaelőkészítés a laboratóriumi pácolási kísérletek elvégzéséhez	41
4.3.2. A száraz sózás, nedves pácolás és ultrahanggal kombinált nedves pácolási kísérletek kivitelezése (I. kísérlet).....	42
4.3.3. A nedves pácolás, ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékkoltatással kombinált ultrahangos pácolási kísérletek kivitelezése (II. kísérlet).....	43
4.3.4. Mintaelőkészítés a kisüzemi, pilot méretű pácolási kísérlet elvégzéséhez	44
4.3.5. Kisüzemi, pilot méretű pácolási kísérlet kivitelezése (III. kísérlet).....	45
4.4. Mérési és számítási módszerek.....	46
4.4.1. Sótartalom meghatározása.....	46
4.4.2. Nedvességtartalom meghatározása	47
4.4.3. Kiegyenlítődési só- és nedvességtartalom meghatározása.....	47

4.4.4.	Diffúziós és anyagtranszport modellek.....	47
4.4.5.	Vízköttőképesség meghatározása.....	50
4.4.6.	Fehérjedenaturáció vizsgálata	50
4.4.7.	Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat.....	51
4.4.8.	Állománymérés	51
4.4.9.	Vízaktivitás mérése	52
4.4.10.	Színmérés	53
4.4.11.	pH mérés	53
4.4.12.	Statisztikai értékelés módszere	54
5.	EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	55
5.1.	A száraz pácolás, nedves pácolás és az ultrahanggal kombinált nedves pácolás kísérletének eredményei.....	55
5.1.1.	A húsminták sótartalmának változása a pácolások során	55
5.1.2.	A sódiffúziós tényezők (D_s) eredményei	56
5.1.3.	A húsminták nedvességtartalmának változása a pácolások során	59
5.1.4.	A vízdiffúziós tényezők (D_v) eredményei	60
5.1.5.	Az anyagtranszport modellek eredményei.....	62
5.1.6.	A vízkötő képesség eredményei.....	66
5.1.7.	A fehérjedenaturáció vizsgálatának eredményei.....	67
5.1.8.	A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálat eredményei.....	70
5.1.9.	Az állománymérés eredményei	72
5.2.	A nedves pácolás, ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérletek eredményei	73
5.2.1.	A húsminták sótartalmának változása a pácolások során	73
5.2.2.	A sódiffúzió számításának (D_s) eredményei	74
5.2.3.	A húsminták nedvességtartalmának változása a pácolások során	76
5.2.4.	A vízdiffúzió számításának (D_v) eredményei.....	77
5.2.5.	Az anyagtranszport modellek eredményei.....	79

5.2.6.	A vízkötő képesség eredményei	82
5.2.7.	A fehérjedenaturáció vizsgálatának eredményei	84
5.2.8.	A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálat eredményei	87
5.2.9.	Az állománymérés eredményei	89
5.3.	A kisüzemi, pilot méretű mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos kísérlet eredményei	91
5.3.1.	A bőrös karaj sótartalmának változása a pácolás és érlelés során.....	91
5.3.2.	A sódiffúzió számításának (D_s) eredményei	92
5.3.3.	A bőrös karaj nedvességtartalmának változása a pácolás és érlelés során.....	94
5.3.4.	A vízdiffúzió számításának (D_v) eredményei.....	96
5.3.1.	Az anyagtranszport modellek eredményei	98
5.3.2.	A vízaktivitás (a_w) mérés eredményei	100
5.3.3.	A színmérés eredményei (L^* , a^* , b^* , ΔE^*)	101
5.3.4.	Az állománymérés eredményei	104
5.3.5.	A pH mérés eredményei	106
6.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	107
7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	111
8.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	112
	SUMMARY.....	115
	MELLÉKLETEK.....	118

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

Rövidítés	Angol megnevezés	Magyar megnevezés
UH	ultrasound	ultrahang
mbUH	ultrasound combined with microbubbles	mikrobuborékolatással kombinált ultrahang
a_w	water activity	vízaktivitás
L^*	lightness	CIELab színtér világossági tényező
a^*	chromaticity coordinates red (+) and green (-) in CIE Lab color space	CIELab színtér vörös (+), zöld (-) színtényező
b^*	chromaticity coordinates yellow (+) and blue (-) in CIE Lab color space	CIELab színtér sárga (+), kék (-) színtényező
ΔE^*	color difference	színinger különbség
SEM	scanning electron microscope	pásztázó elektronmikroszkóp
DSC	differential scanning calorimetry	differenciáló pásztázó kalorimetria

1. BEVEZETÉS

Az állati eredetű élelmiszerek tápanyagokban gazdag élelmiszerek. Számos kulcsfontosságú tápanyaggal járulnak hozzá az emberi étrendhez. Amellett, hogy magas biológiai értékű fehérje-forrásként 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. Az így tartósított húsok feltehetőleg a dél-európai országokból eredeztethetők, ahol a mediterrán éghajlat lehetővé tette a sózás mellett a húsok szárítását és érlelését is (Toldrá, 2002). A pácolás során olyan mennyiségű só t 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 „újszerűbb” 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, amely ugyan kecsegtető eredményeket mutat (Jónás, 2021), azonban ipari méretű kivitelezése a kezelő berendezések korlátozott elérhetősége miatt még várat magára. Az alternatív technikák közé sorolható még a pulzáló elektromos erőtér (PEF) (Crotova et al., 2021), a vákuum alatt végzett pácolás (Tomas 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 (microjet), amelyek fizikai sérülést képesek okozni szilárd felületeken, képesek átszakítani a sejtek falát (Cárcel et al., 2012). Az oszcillálás során a kavitációs üreg és például egy sejtfa között nyíróerő ébred, aminek hatására a sejtfa szintén átszakadhat. A sejtfa 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 húsipari pácolási technológia új kutatási területeként kínálkozik és olyan alapkutatásokat céloz meg, amelyek záros határidőn belül a gyakorlatban is elterjedhetnek.

2. CÉLKITŰZÉS

Ahogy arra a bevezetésben rámutattam, a pácolás hagyományos módjaival a só bejutása a húsba nagyon lassú, időigényes folyamat. Ennek gyorsítására az ultrahang adhat lehetőséget, és ezen túlmenően az ultrahang kísérő jelenségének, a kavitációnak intenzívebbé tétele mikrobuborékok generálásával a páclében további lehetőségeket hordozhat magában a sóbevitel gyorsításának tekintetében. Mivel erről jelenleg nem állnak rendelkezésre információk, 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 céloom vizsgálni az ultrahang hatását.
- Sertéskaraj húshenger (d=15 mm, h=80 mm) nedves pácolása, ultrahanggal (20 kHz; 100 W) kombinált nedves pácolása, valamint mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos (20 kHz; 400 W) nedves pácolása 20 m/m% sókoncentrációjú páclében 180 percig. Ezzel céloom 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 mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos (35 kHz, 1 kW; 2 db lapsugárzó) nedves pácolása. Ezzel céloom egész húsdarabon, kisüzemi méretű berendezésben vizsgálni az ultrahang és mikrobuborékok együttes hatását.

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1. A hús összetétele és szerkezete

A hús évezredek óta fontos táplálékforrásként szolgál az emberek számára. Az olyan állatok, mint a gímszarvas (*Cervus elaphus*) és a bölény (Észak-Amerikában általában bivaly néven ismert) több, mint 500 000 éve szolgálnak bőr, csont és hús forrásául. Az emberek a történelem során azért fogyasztottak húst, mert az tápláló tulajdonságokkal rendelkezik, és mert az esszenciális aminosavak (fehérjék), vas, vitaminok, valamint más tápanyagok és ásványi anyagok fontos forrása. Azok, akik a húsfogyasztás mellett döntenek, gyakran három okra hivatkoznak. Az első ok, amiért húst fogyasztanak, az a kívánatos íz. Másodsor, a húsfogyasztás gyakran társadalmi státuszhoz kapcsolódik. Végül pedig azért fogyasztják a húst, mert olyan táplálkozási előnyökkel rendelkezik, ami támogatja az emberi egészséget (McNeill, 2014). A húsban található fehérjék magas biológiai értékkel rendelkeznek. A biológiai érték azt méri, hogy az élelmiszerforrásból származó fehérje milyen arányban kerül felhasználásra az állat szervezetében a fehérjék szintéziséhez. Minél nagyobb a felhasználható fehérjék aránya, annál nagyobb a biológiai érték. A legtöbb állati eredetű élelmiszert, például a húst, a tejet és a tojást magas biológiai értékűnek tekintik. Az emberi anyatej biológiai értéke 100% (ez azt jelenti, hogy a tej által biztosított fehérje 100%-a hasznosul a szervezetben), a tojásfehérjéé 100%, a tehéntejé 88-90%, a húsé pedig állatfajtól és testtájtól függően 75- 85% biológiai értékű. Általánosságban elmondható, hogy az esszenciális aminosavak százalékos aránya a nyersfehérje százalékában alig különbözik a marha-, sertés- és bárányhúsok között, bár egyesek azt állítják, hogy a marhahúsban nagyobb a leucin, lizin és valin, és kisebb a treonin aránya, mint a sertés- vagy bárányhúsban. A hús a tápláló fehérje mellett értékes vitaminokat és ásványi anyagokat is biztosít a teljes értékű étrendhez. A vasat, különösen a hem-vasat gyakran említik, mint a húsfogyasztás által biztosított leghasznosabb ásványi anyagot (Boler and Woerner, 2017).

A "hús" kifejezés nemcsak a vázizomzatra, az azt határoló zsírra és egyéb szövetekre vonatkozik, hanem más ehető szövetekre, például belsőségekre is. A hús nagyra becsült élelmiszer, amely számos, az emberi egészséghez nélkülözhetetlen tápanyagot biztosít.

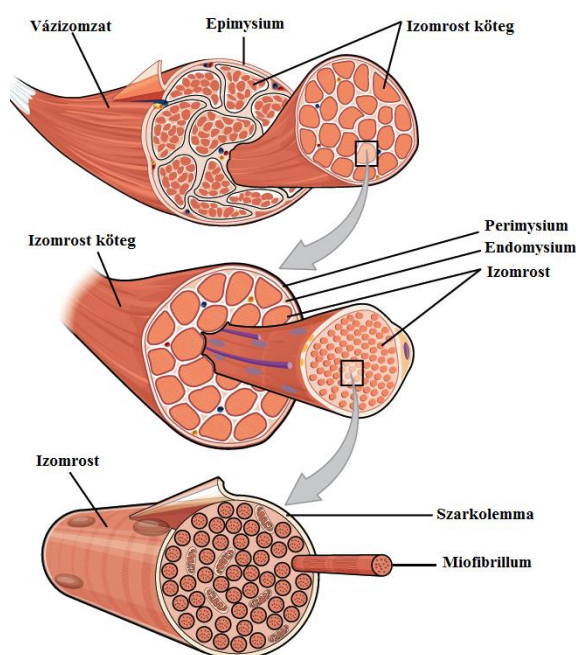
A húsokat általában a származási forrás (az állat típusa/faj) szerint osztályozzák, az alábbiak szerint:

- A vörös hús az emlősök húsának felel meg.
- A fehér hús a szárnyasok húsának felel meg.
- A tenger gyümölcsei a halak és kagylók húsának felelnek meg.
- A vadhús az általában nem házasított állatok húsát jelenti (Hamill and Botineştean,

2016).

A húsnak nevezett vázizom a 75% víz mellett körülbelül 20% fehérjét, 4% zsírt és 1% vitamint és ásványi anyagot tartalmaz.

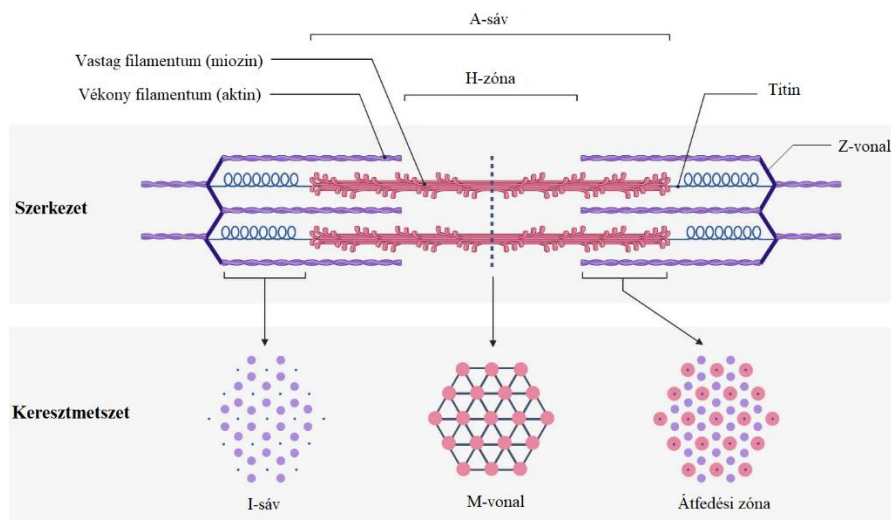
A vázizomzat körülbelül 90%-ban izomrostokból és 10%-ban kötő- és zsírszövetből áll. A vázizom kötőszöveti rétege 3 részre osztható fel. Az epimysium, amely körbefogja az izom egészét, egy kemény, szinte nyújthatatlan kötőszöveti réteg. Ez rögzíti az izmokat a csonthoz. A másik rész a perimysium, amely az izomrostkötegeket veszi körül. A kötőszövet 3. része az endomysium, ami az egyes rostokat választja el egymástól, és közvetlenül az izomsejtmembránhoz kapcsolódik. A rostokon belül a miofibrillumok szinte a teljes intracelluláris térfogatot elfoglalják. A miofibrillumokban ismétlődő mintázatban helyezkednek el az aktin (vékony filamentum) és miozin (vastag filamentum) fehérjeszálak (1. ábra) (Astruc, 2014).



1. ábra: A vázizom szerkezete
(Committee, 2015 alapján)

A vázizomsejtekben a sejt térfogatának mintegy 80%-át a miofibrillumok foglalják el. A vázizomsejt keresztmetszetében jellemzően 500-1000 miofibrillum található. Nem határolja őket membrán, és teljes egészében fehérjékből állnak. A miofibrillum szerkezete húrszerű, és ismétlődő szarkomerekből áll, amelyek az izom legkisebb összehúzóegységét alkotják. Egy szarkomer egység két szomszédos Z-vonal között helyezkedik el. A Z-vonal kettévágja a világos I-sávot, amelyet elsősorban az aktint tartalmazó vékony filamentumok alkotnak. A miozin fehérjét tartalmazó vastag filamentumok a szarkomer közepén helyezkednek el, a széles, sötét A-sávot alkotva. Az A-sávot az M-vonal osztja ketté. A vékony és vastag filamentumok elrendeződése adja a vázizomsejtek csíkos megjelenését, vagyis a harántcsíkolt izomzatot (2. ábra). A miofibrillumok sávos

mintázatának megértése azért fontos, mert a szarkomerek hossza összefügg a hús puhaságával (Guo and Greaser, 2017).



2. ábra: A harántcsikolt izom szerkezete
(Dahal, 2023 alapján)

3.2. A pácolás eredete

A pácolás a legősibb tartósítási műveletek egyike. Feljegyzések alapján alkalmazása már i. e. 3000-ben is előfordult. A sumérok abban az időben sót használtak különböző élelmiszerek, mint a halak és a húsok tartósítására. Az ókori Palesztinában i. e. 1600-ban a Holt-tenger sóját, míg a kínaiak és a görögök kősót használtak hasonló célból, így beillesztve a pácolt húsokat étrendjükbe. Egyéb források szerint a hús pácolása nem a suméroktól, hanem a görögöktől származik. Ahogy azonban különböző só típusok használata elterjedt a hús tartósításában, kiderült, hogy csak bizonyos típusú só segít a pácolt húsok kívánatos rózsaszínű színének és különleges ízének kialakításában. Az 1800-as évek második felében a húsipar kezdett átalakulni az elsősorban állatok levágását végző iparágból a vágás-feldolgozás-tartósítás iparágává, ennek oka, hogy a népesség demográfiai összetétele kezdett megváltozni, és egyre nagyobb szükség volt a kereskedelmi célú élelmiszertartósításra. A századforduló a kémia alkalmazását hozta a húsiparban. A német kémikusok egyik jelentős felfedezése megmutatta, hogy a húspácolás egyik lényeges lépése a nitrát nitritté történő átalakítása. Az ezt követő kutatások megállapították a szükséges nitritkoncentrációkat, és 1926-ban az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériuma (USDA) közzétette a nitrit, mint pácolt húsösszetevő engedélyezett felhasználását és koncentrációját leíró rendeleteket (Pegg and Shahidi, 2008). Az élelmiszer-adalékanyagként használt nitritek (E 249–250) és nitrátok (E 251–252) felhasználásának és specifikációjának módosításáról szóló legfrissebb uniós rendelet

alapján (48/2016. (VII. 18.) FM rendelet, 2016), a hagyományosan pácolt hústermékekben a legmagasabb maradékszint NaNO_3 -ban kifejezve 65 mg/kg lehet.

Manapság a pácolás céljának nemcsak a tartósítás tekinthető a vízaktivitás csökkentése és a káros mikrobiológiai folyamatok gátlása által, hanem a termékre jellemző íz- és színekialakítás is (Taormina, 2014). Mindemellett manapság már fontos szempontnak tekinthető a termelékenység és kihozatal növelése, valamint a hús víztartó képességének növelése is (Shahidi et al., 2014).

3.3. A pácolás módjai

A Magyar Élelmiszerkönyv 1-3/13-1 számú előírása ("48/2016. (VII. 18.) FM rendelet, 2016. A Magyar Élelmiszerkönyv kötelező előírásairól szóló 152/2009. (XI. 12.) FVM rendelet módosításáról," n.d.) alapján a húsipari pácolás fogalma az alábbiak szerint került meghatározásra:

„Pácolás:

lassú pácolás: a terméket tartósítás, íz- és színekialakítás céljából étkezési só (NaCl), nitrítet (NO_2^-), illetve nitrátokat (NO_3^-) és más összetevőket tartalmazó oldatba merítik, vagy felületüket ezen anyagok keverékével bedörzsölik és pácérettségig érlelik; vagy

gyorspácolás: a termékbe, vagy a termék egyes alapanyagaiba íz- és színekialakítás céljából étkezési só, nitrítet, illetve nitrátokat, valamint más összetevőket tartalmazó páclevet injektálnak, illetve vákuum alatt vagy anélkül a szöveti részekbe juttatnak.”

A száraz sózás és a száraz pácolás fogalma sok esetben keveredik, és rosszul van használva a szaknyelvben, így fontos tartom ezeknek a definícióknak a tisztázását is:

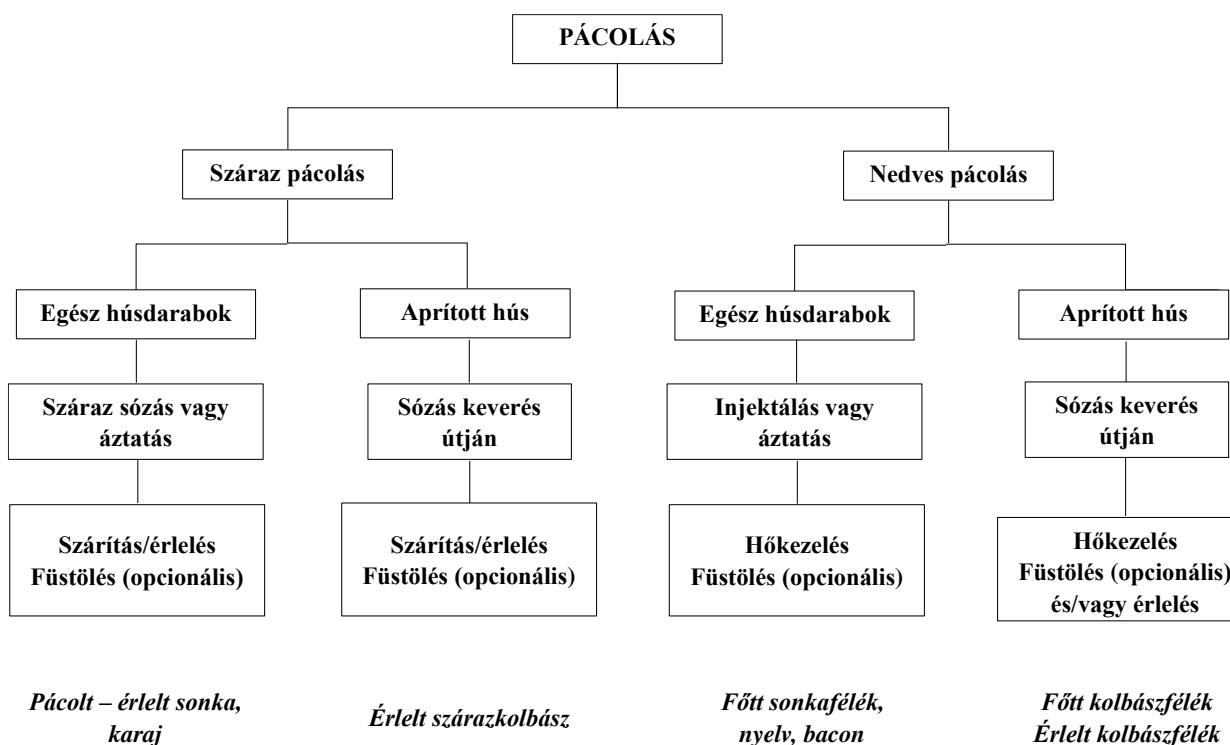
„*Száraz sózás:* a hús, illetve szalonna összetevők sózó edényben, étkezési sóval való behintése, bedörzsölése

Száraz pácolás: a nitrítet és/vagy nitrátokat, só és más összetevőket tartalmazó páckevertet szárazon felviszik a hús felületére, majd stabilizálják/érlelik. A húskészítményeket további kezelésnek, pl. füstölésnek is alávetik.”

A nátrium-klorid (NaCl) a hús pácolásához használt fő összetevő. Különböző funkciókat lát el, mint például a tartósítás, a kihozatal javítása, ezen kívül befolyásolja a hússzövet tulajdonságait, mint például a víztartó képességet és a fehérjeoldódást, ami viszont meghatározza a hús textúráját (Sharedeh et al., 2015). A sóhoz hozzáadott nátrium-nitrit a húspan lévő anyagokkal reagálva nitrozovegyületeket képez, amelyek nemcsak antioxidánsként hatnak és stabilizálják a hús színét, de gátolják a húspan a lipidek oxidációját is, ezáltal javítják a húskészítmények stabilitását, megakadályozzák a romlást és meghosszabbítják az eltarthatósági időt, miközben csökkentik a lipidek oxidációjából eredő nemkívánatos ízeket (Govari and Pexara, 2015).

Maga a pácolási folyamat a lassú tömegtranszport műveletek közé sorolható. Ennél a technológiánál a kétirányú anyagtranszport a hús és a páclé/pácsó között megy végbe: egyrészt a só bediffundál a húsba, melynek hatására a húsból a víz ozmózis útján távozik. Ennek a szakasznak az időtartama általában a sonka súlyától függ, és kilogrammonként 17-48 óra között mozog. A pácoló helyiség hőmérsékletét általában 6-8 °C alatt tartják a mikrobiális romlás elkerülése végett, a só könnyebb behatolásának biztosítása és a felület túlzott kiszáradásának elkerülése érdekében azonban a relatív páratartalom magas (~90-95%) (Estévez et al., 2014).

A húskészítmények 2016-ban a világ teljes élelmiszerpiacának 15%-át tették ki, azonban a megnövekedett egészségügyi aggályok és a hús alternatívái iránti vágy miatt ma a fogyasztói kereslet stagnál (Frank et al., 2017). Világszerte sokféle pácolt húskészítményt gyártanak, de a gyártási folyamatot tekintve két fő csoportot lehet megkülönböztetni: a szárazon és nedvesen pácolt termékeket (3. ábra).



3. ábra: A pácolt termékek csoportosítása (Geiker et al., 2021 alapján)

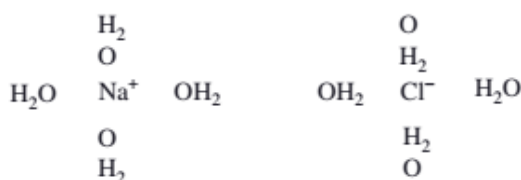
A szárazon pácolt termékeket alapvetően az érlelt-szárított sonkák és az érlelt kolbászok képviselik. Számos országban gyártanak szárazon pácolt sonkát, például Country style sonkát az USA-ban, Jerky sonkát Dél-Amerikában, Serrano és ibériai sonkát Spanyolországban, Parma, San Daniele, Toscano és Nero Siciliano sonkát Olaszországban, Bayonne sonkát Franciaországban, Spekeskinke sonkát Norvégiában, Hangikjöt sonkát Izlandon, Jinhua sonkát Kínában (Toldrá et al., 2014), vagy Magyarországon a hagyományos magyar parasztszónkát.

A száraz pácolás során a hús felületét sóval vagy só és nitrit keverékével bedörzsölik, vagy azt például a kolbász gyártástechnológiája során darált hússal összekeverik. A hús felületének bedörzsölése esetén a só diffúzió útján jut be az egész húsdarab belsejébe. A hozzáadott só mennyisége a sonka típusától és a származási országtól függ. A pármái sonkák esetében például a só mennyisége a sonka súlyával arányos. Spanyolországban a sonkákat bőrös felületükkel lefelé nagy tartályokba helyezik, tengeri sóval bedörzsölik és a sózás idejét szigorúan ellenőrzik. Az alkalmazott sózási idő ezeknél a termékeknél 1,1 nap/hús kilogramm (Toldrá, 2004).

A pácolás lépését követheti a füstölés, majd a húsok érlelésével és szárításával készül el a fogyasztásra alkalmas termék. Ezeket a termékeket hosszú ideig szárítják és érlelik a dehidratáció és az íz biokémiai és mikrobiológiai fejlődése érdekében (Flores, 2018). Ez elsősorban az érlelési időszak alatti proteolízis és lipolízis jelenségeit jelenti, amelyek döntően hozzájárulnak az íz és a textúra kialakulásához (Toldrá and Flores, 1998).

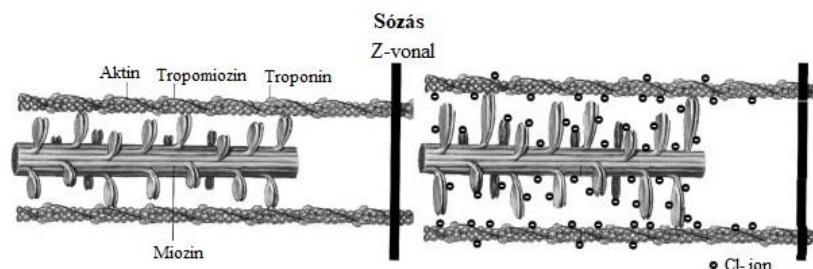
A nedves pácolás esetén a húsdarabokat a pácso (só és nitrit/nitrát) vizes oldatába merítik, vagy azt a húsba injektálják. Főtt kolbászfélék gyártása során a páclevet az aprított/darált húshoz keverik. Az injektálásnak, vagy befecskendezésnek köszönhetően a páclé gyorsabban bejut és eloszlik a húsban, így a mikrobiológiai stabilitás kialakulása, és a termékre jellemző érzékszervi tulajdonságok elérése hamarabb megtörténik az izomzat mélyebb rétegeiben (Taormina, 2014). A nedves pácolást is követheti füstölés, majd a húsokat hőkezelik.

A nedves pácolás nagy előnyeként említhető a száraz pácolással szemben, hogy a felhasznált só (NaCl) a vízben való oldás során Na^+ és Cl^- ionokra disszociál, ezáltal a só bejutása a húsba könnyebben végbemegy. A Na^+ és Cl^- ionokat körülveszik a vízmolekulák, ezáltal azok képesek oldatba kerülni (4. ábra). A poláros vízmolekulák (H_2O), amelyek a két hidrogénatom és az oxigénatom között 105° -os szöveget zárnak be, az oxigénatom körül részben negatív, a hidrogén atomoknál pedig részben pozitív töltést mutatnak. E polaritás miatt a vízmolekulák több rétegben immobilizálódnak (nincs szabad mozgás) az ionok körül, és már nem állnak rendelkezésre a különböző kémiai/enzimikus reakciókhoz, sem az élelmiszerekben, sem a mikroorganizmusokban. Ennek köszönhetően megtörténik a mikrobiális gátlás a termékben belül (Toldrá, 2010).



4. ábra: A Na^+ és Cl^- ionok oldatba kerülése (Toldrá, 2010)

A vízmolekulákkal körülvett sóionok behatolnak a miofibrilláris fehérjék közé, amelynek következtében a fehérjeszálak megduzzadnak (5. ábra). Ez bizonyos sókoncentrációig az izom jobb víztartó képességéhez vezet (Schmidt et al., 2008).

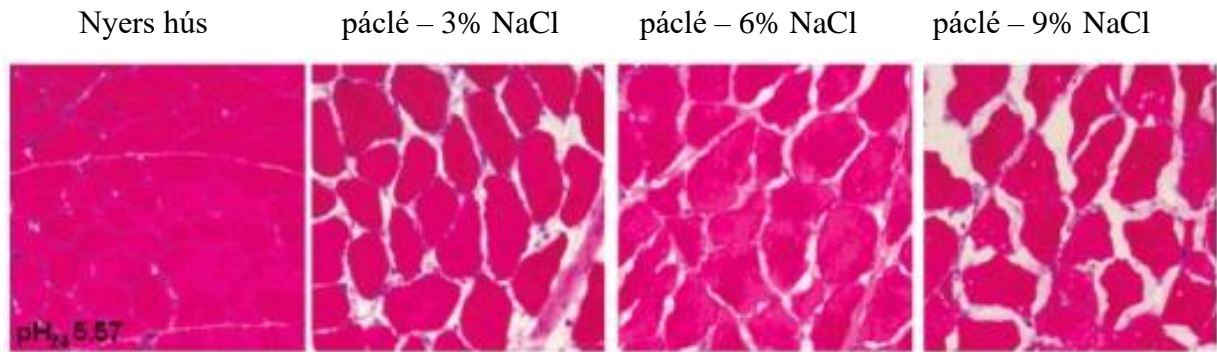


5. ábra: A Cl^- ion miofibrilláris fehérjékkel történő komplex képzésének illusztrációja (Schmidt et al., 2008 nyomán)

3.4. A pácolás hatása a húsokban

3.4.1. A pácolás hatása a hús szerkezetére

A pácolási technológiákat általában a húsiparban alkalmazzák a hústermékek tartósítására vagy minőségének javítására. A pácolás kulcsszerepet játszik többek között a késztermékek fizikai tulajdonságainak kialakításában is. A pácsó behatolása, eloszlása, valamint esetleges felhalmozódása megváltoztatja a fehérjék állapotát és a szövetek mikroszerkezetét, kémiai folyamatokat indít el, amelyek íz- és aromaanyagok kialakulásához vezetnek, illetve stabilizálja a termék színét. A pácolási folyamat során a pácolószerek (sók és adalékanyagok) kölcsönhatásba lépnek a hús alkotóelemeivel, és ezáltal molekuláris szerkezeti változásokat idéznek elő, mikroszkopikus és makroszkopikus szinten (6. ábra). Amikor egyre több Na^+ és Cl^- ion hatol be a húsba, az ionok és a fehérjék között verseny alakul ki a vízmolekulákkal való kölcsönhatásért. Az ionok kölcsönhatásba lépnek a vízmolekulákkal, ami azt eredményezi, hogy kevesebb vízmolekula áll rendelkezésre a fehérje-víz kötések kialakításához. Így a fehérje-fehérje kölcsönhatások gyakoribbá válnak, és a fehérjemolekulák hidrofób kötések képeznek egymással. Ennek eredményeképp a fehérjék dehidratálódnak és felszabadítják a vizet, aminek következtében a hús vízkötő képessége csökken.



6. ábra: Különböző NaCl tartalmú páclében pácolt sertésminták fénymikroszkópos felvételei (miofibrillumok vörösre festettek, a sejtmagok kékre)
(Böcker et al., 2006)

Offer and Trinick (1983) úttörő munkájukban azt vizsgálták, hogyan módosulnak a miofibrilláris struktúrák a pácolás hatására. Ezt a változást Cl^- ionok miofibrilláris fehérjékhez való kötődésének tulajdonították, ami növeli a fehérjék negatív töltéseit. Ez elektrosztatikus taszító erőt okoz az egyes molekulák között, ami a miofibrillumok duzzadását eredményezi, mivel az izoelektromos pH csökken, és az ellentétes töltésű csoportok közötti kölcsönhatás gyengül. Ezt a szerkezeti változást alátámasztották a hús pácolásával kapcsolatos nukleáris mágneses rezonancia (NMR) T2 relaxációs vizsgálatok is, amelyek megerősítették a miofibrilláris fehérjék só általi szolubilizációja okozta miofibrilláris terek duzzadását (Andersen et al., 2007). Ennek a duzzadásnak az eredményeképpen a hús víztartó képessége is javul. Ahogy a miofibrillumok közötti tér megnő, a szarkoplazmatikus fehérjék hajlamosak kizáródní, és a szarkoplazma felhígul. Ezután az ozmotikus nyomás csökken, ami a sejtmembránon keresztüli víztranszportozhoz vezet, amely először az extracelluláris térben, majd az izomzaton kívül jelenik meg.

Molekuláris szinten a fehérjék másodlagos szerkezetének Fourier-transzformációs infravörös (FT-IR) mikrospektroszkópiával történő vizsgálata azt is kimutatta, hogy a húspácolás a miofibrilláris fehérjékben a natív β -redő szerkezetek növekedését, míg az érlelés az α -hélix szerkezetek növekedését idézte elő. Ez magyarázatot adhat a pácolás és az érlelés vízeloszlásra és vízfelvétele gyakorolt hatására (Wu et al., 2006).

3.4.2. A pácolás mikrobiológiai hatásai

A só gátló hatást fejt ki az élelmiszer-kórokozókkal szemben, elsősorban a vízaktivitás (a_w) csökkentése, a vízmolekulák kémiai vonzása és a Cl^- ion esetleges közvetlen hatása révén. A mikroorganizmusok túlélő képessége vagy szaporodása só hiányában vagy csökkentett sókoncentráció mellett jelentősen megnő, a pácolt húskészítmények biztonságának garantálása érdekében tehát a

húsiparnak komoly feladata van. A fokozott mikrobiális növekedés hozzájárul a biogén aminosavak növekedéséhez is. A dekarboxiláz-aktivitással rendelkező baktériumok, mint például az enterobaktériumok és enterococcusok, hozzájárulhatnak a biogén aminosavak termeléséhez, és a nitritszármazékokkal történő esetleges további nitrozaminok képződése révén veszélyeztethetik a pácolt húskészítmények biztonságát (Elias et al., 2020).

Általánosságban úgy tartják, hogy 10%-os koncentrációban a só gátolja a legtöbb baktérium növekedését; 5%-os koncentrációban csak az anaerobok ellen irányul. A só biztonságos eltarthatóságot meghosszabbító hatása a vizes fázisban lévő koncentrációjával függ össze, mivel oldott állapotban bakteriosztatikus hatású. A nátriumionok a víz elérhetőségét szabályozó hatásuknak köszönhetően befolyásolhatják a víz áramlását a baktériumok féligáteresztő membránján keresztül. Ezt általában vízaktivitásként (a_w) vagy a mikroorganizmusok növekedéséhez rendelkezésre álló szabad víz mennyiségeként említik (Inguglia et al., 2017). Ezenkívül az a_w a termék összetételétől függően változik, és nem a só az egyetlen befolyásoló tényező a víz elérhetőségében. A só bakteriosztatikus hatékonysága az érintett mikroorganizmusok típusától is függ: egyeseket az alacsony sókoncentráció is blokkol, míg mások magasabb koncentráció mellett is növekednek. Egyes mikroorganizmusok esetében a só korlátozhatja az oxigén oldhatóságát is, zavarhatja a sejt enzimeit, vagy arra kényszerítheti a sejteket, hogy energiát fordítsanak a nátriumionok sejtből való kizárására, ami mind csökkentheti a növekedés ütemét.

A són kívül a nitritnek is kulcsszerepe van számos mikroorganizmus, különösen a *Clostridium botulinum* gátlásában. A nitrit azonban más, a húskészítményekben potenciálisan jelen lévő biológiai veszélyforrásokat is gátol, mint például a *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp.*, *Escherichia coli* és *Clostridium perfringens* (Majou and Christieans, 2018). A nitrit a bakteriális nitritreduktázok vagy a mioglobinnal való kölcsönhatás révén anaerob és savas körülmények között nitrogén-oxidá (NO) redukálódik. A nitrát- és nitritszármazékok bonyolult kölcsönhatása a mioglobinnal, a mikrobiotával és más, esetleg felhasznált, ugyanezen reakciókban egymással versengő vegyületekkel számos kémiai N-fajta, többek között salétromsav, salétromsav, dinitrogén-trioxid keletkezéséhez vezet, amelyek instabilak és rövid élettartamúak, de hozzájárulhatnak a kórokozók gátlásához. A keletkezett NO reakcióba lép a jelen lévő vassal és kénnel, azokkal stabil kötéseket képezve. Ez a két elem az úgynevezett vas-kén enzimkomplexben (Fe-S-NO) van jelen. Ebbe a széles Fe-S csoportba számos olyan enzim tartozik, amely a mikroorganizmus ATP-szintézisében vesz részt, nevezetesen a *Clostridium spp.* ferredoxinja. Ez a Fe-S-NO mechanizmus a *Clostridium spp.* vegetatív sejtjeinek növekedési gátlásában játszik fő szerepet. Ez figyelhető meg több aerob és fakultatív kórokozónál is, amelyek a pácolt húskészítményekkel kapcsolatosak. A NO gátló mechanizmusaiban a peroxinitrit, egy erősen oxidatív és instabil vegyület

is szerepet játszhat. Kialakulása a mioglobin és a nitrát redukciója során keletkező köztes vegyületek oxidatív állapotának változásával függ össze. Oxidáló és nitráló képessége miatt károsítja a fehérjéket, a DNS-t és a lipideket, veszélyeztetve a mikroorganizmusok növekedését, és végül túlélését (Majou and Christeans, 2018).

3.4.3. A pácolás hatása a színre

A mioglobin a gerincesek oxigénellátását biztosító izomfehérje, amelynek koncentrációja az izomszövetben igen változó. Ez az a fehérje, ami nagymértékben befolyásolja a hús színét. A vérben található hemoglobin ebben kisebb szerepet játszik. A mioglobin vas tartalmú hem csoportból (4%), és globuláris fehérjecsoportból (94%) áll. A hem csoport egy porfirinyűrűből (négy pirrolgyűrű, amelyek négy metinhíddal kapcsolódnak egymáshoz) és egy központi kétértékű vas kationból áll. A hem molekula központi vasionja felelős a mioglobin színváltozásáért. Amikor a hús feldolgozási körülményeknek van kitéve, a mioglobin szerkezete megváltozik, így a hem vasa fel-táruul, és elősegíti az oxidációt (Suman et al., 2016). A hús színét így a hem-komplex tetragonális bipiramisának hatodik pozíciójában lévő ligandum és vas vegyérték-állapota határozza meg a mioglobin (Mb), deoximioglobin (DMb), oximioglobin (OMb), karboximioglobin (COMb) és metmioglobin (MMb) négy kémiai formája révén (Pöhl, 2016).

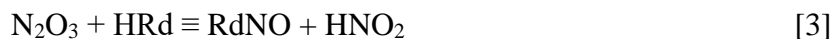
Az NO a páclében vagy pácsóban található nitritből (vagy nitrátból) származik. Segít a pácolt hús színének rögzítésében azáltal, hogy egy reverzibilis kémiai kötés kialakításával stabilizálja a mioglobint. A nitrit a salétromos sav (HNO_2) konjugált bázisa. Savas környezetben az oldat pH-értékétől függően egyensúly alakul ki az ionizált só és az egyesített salétromos sav között [1].



A HNO_2 koncentrációja azonban a pácolt húsban nagyon alacsony (0,1-1,0%) a hús átlagos pH-értékei mellett (pH=5,5-6,5). Így ebben az esetben a dinitrogén-trioxid (N_2O_3) lesz reakcióképes [2].



Redukálószer (HRd) (pl. aszkorbinsav vagy aszkorbát), és a hússzövetben lévő endogén redukáló csoportok vagy vegyületek (pl.: cisztein, redukált nikotinamid-adenin-dinukleotid, citokrómok és kinonok) jelenlétében NO keletkezik N_2O_3 -ból, amint az a [3] és [4] egyenletekben látható.



aránya az izomban fokozatosan növekszik a nedvességtartalom feldolgozás során bekövetkező csökkenésével. Több tanulmány is kimutatta, hogy a szárazon pácolt húskészítmények illékony vegyületei főként a lipidek oxidációjából és a fehérjék lebomlásából származnak (Ventanas et al., 2008; Zhou and Zhao, 2007). Korábbi vizsgálatok azt mutatták, hogy a só a proteolitikus enzimek aktivitásának szabályozásával visszafoghatja a proteolízist a száraz pácolás során, valamint serkentheti a lipidoxidációt (Martín et al., 1998; Vestergaard et al., 2000). A sonkák pácolási folyamata során intenzív proteolízis zajlik, amely főként az izomproteinázok: a kalpainok és a kathepszinek hatásának eredménye. A proteinázok e két csoportja közül a kalpainok meglehetősen instabilak, és aktivitásuk a sózási szakasz után nem mutatható ki, míg a kathepszinek még a pácolási folyamat végén is aktívak. A proteolízis jelensége kulcsfontosságú a szárazon pácolt sonka feldolgozása során felmerülő érzékszervi és technológiai problémák némelyikének megértéséhez, mint például a sonka rendellenes puhasága, vagy a sonka felületén megjelenő fehér filmréteg és fehér tirozinkristályok. Az alacsony só/nedvesség arány például kedvezhet a puha állomány kialakulásának, mivel az izom magasabb maradék nedvességtartalma hosszabb ideig teszi aktívvá a proteínázokat, ami nagyobb mértékű proteolízist eredményez. A pácolás során hozzáadott só által okozott változások a sózás és a sókiegyenlítési lépések korai szakaszában jönnek létre, és a pácolási folyamat hátralévő részében fennmaradnak, de valószínűleg nem fokozódnak tovább (Gil et al., 1999).

A hozzáadott só a fehérjék denaturációjára is hatással van. A fehérjék termodinamikai stabilitásának tanulmányozására a differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) hatékony technika, amely alapvető ismereteket nyújthat a húsfehérje denaturációjáról. Graiver et al. (2006) a sertésizom fehérje denaturációját vizsgálták DSC módszerrel, melynek során megállapították, hogy a hús NaCl-tartalmának növelése destabilizálja a miozin és az aktin hőstabilitását. Általánosságban elmondható, hogy a húsban lévő NaCl szintjének növekedésével az egyes fehérjék hőstabilitása csökken, és 20 mg/g NaCl szint felett a miozin denaturálódik (Kajitani et al., 2011).

A lipidoxidáció szintén egy olyan fő tényező, amely korlátozza a húsok és húskészítmények minőségét és elfogadhatóságát. Az izomfehérjék érzékenyek a feldolgozás során keletkező oxidáló lipidek, fémionok és egyéb prooxidánsok által indított oxidatív reakciókra (Estévez et al., 2008). Oxidációjuk az esszenciális aminosavak elvesztésével jár, és csökkenti a fehérje emészthetőségét, ami hatással van a táplálkozási értékére. Ezenkívül a hús színének és állagának romlását is a fehérje oxidációjának jelenségével hozták összefüggésbe (Decker et al., 2000; Estévez et al., 2005). Mivel a só klorid-anionja elősegíti az oxidációt, így annak hústermékhez történő hozzáadása a zsír oxidációját és avasodását okozhatja. A legtöbb szárazon pácolt húskészítmény esetében azonban a jellegzetes íz kialakulásához megfelelő lipidoxidációra van szükség. A lipidekre gyakorolt prooxidáns hatás a 0,7% és 2,5% közötti sótartalmú húsoknál jelentkezik. Ez a jelenség a sónak

az antioxidáns enzimekre, a katalázra, a szuperoxid-dizmutázra és a glutation-peroxidázra gyakorolt gátló hatásának köszönhető (Devatkal and Naveena, 2010). A prooxidáns hatás függ azonban az izmok anyagcsere-profiljától, az összes zsírtartalomtól és a többszörösen telítetlen zsírsavak szintjétől is. Magasabb sótartalom (3%-tól) esetén viszont a só bizonyos esetekben megvédi a lipideket az oxidációtól, csökkentve az enzimaktivitást. Ez a hatás az oxigén oldhatóságának csökkenésével magyarázható a nagy ionerősségű oldatokban (Sárraga et al., 2002).

3.5. Az érlelést befolyásoló tényezők

A hagyományosan pácolt termékek gyártástechnológiájának két fő lépése a húsok pácolása, vagyis a só húsba való bejuttatása, valamint a hús szárítása, érlelése. A pácolt termékek érlelési szakaszának két fő célja van: (1) a sonkák szárítása addig, amíg el nem éri a tömegveszteség a 32%-ot, és (2) az enzimreakciók lezajlása, melyek során megtörténik a megfelelő íz- és állomány kialakulása. Ez a szakasz tehát nagyon fontos a késztermék végső minősége szempontjából. Az itt lezajló enzimatikus folyamatok közé sorolható az izomfehérjék hidrolízise (proteolízis), a triacilglicerinnel és foszfolipid komponensek hidrolízise (lipolízis), a glükóz hidrolízise (glikolízis) és a nukleotidok átalakulása. A folyamat során olyan kémiai reakciók is lejátszódnak, mint a Maillard-reakciók, a Strecker-degradáció és az oxidatív reakciók, amelyek hozzájárulnak a késztermékek jellegzetes ízének kialakulásához (Gandemer, 2002). Az említett enzimatikus reakciók során az izomfehérjéket a proteázok denaturálják és lebontják, ami kis tömegű nitrogéntartalmú molekulák (aminosavak és peptidok) keletkezéséhez vezet, és a fehérje funkcionalitásának és oldhatóságának elvesztését okozza. Az oxidatív folyamatok intenzitása a száraz pácolt sonkák érlelése során az antioxidáns és prooxidáns tényezők, elsősorban a zsírsavösszetétel és az izmok antioxidáns státusza közötti egyensúlytól függ (Cava et al., 2000), míg a lipolitikus változásokat endogén (izom) és exogén (mikrobiális) enzimek okozzák (Toldrá, 1998).

Az egyik legfontosabb biokémiai változásként az endogén izompeptidázok hatására végbe menő intenzív proteolízis említhető. A proteolízisnek ugyanis fontos hatása van a textúrára és az ízre, közvetve pedig az aroma kialakulására. Feltételezhető, hogy az izomfehérjék lebontásáért felelős fő enzimek ebben az időszakban az endopeptidázok, elsősorban a kalpainok és a katepszinek, valamint az exopeptidázok bizonyos csoportjai (Toldrá, 2004). Az endopeptidázok az intakt fehérjék hasításával lebontják az izomfehérje szerkezetét, így nagyméretű polipeptidek keletkeznek, amelyeket az exopeptidázok tovább bontanak.

Az izom endopeptidázok (pl. a katepszinek és a kalpainok) hatása tehát nagy jelentőséggel bír a feldolgozás során, mivel közvetlenül felelősek a postmortem izomszerkezet változásaiért (Lametsch et al., 2003). A katepszineknek egyértelmű hatása van a pácolt termékek állományára, túlzott aktivitásuk azonban negatívan befolyásolhatja az érzékszervi minőséget (Virgili et al., 1995).

A spanyol pácolt sonkák esetében kimutatták, hogy a katepszin B+L maradék enzimaktivitása okozza az erős proteolízishez kapcsolódó állománybeli hibákat (García-Garrido et al., 2000). A kalpainok gyenge stabilitásának és aktivitásának köszönhetően azok az érlelés korai szakaszában vesznek csak részt, az izom proteolízis során (Toldrá and Flores, 1998).

Az exopeptidázok olyan proteolitikus enzimek, amelyek lebontják az endopeptidázok által létrehozott nagyméretű polipeptideket, így kis peptidek és szabad aminosavak keletkeznek. A szabad aminosavak felhalmozódását, amelyek a szárazon pácolt sonka jellegzetes száraz ízének kialakulásáért felelősek, az izmok aminopeptidázainak tulajdonítják, amelyek felelősek az aminosavak felszabadulásáért a peptidek és fehérjék N-terminusából (Toldrá et al., 2000).

A folyamat során végbemenő másik fontos biokémiai változás a lipidfrakció lebomlása. A lipolízis az egyik fő lebontási mechanizmus, amely a lipideket érinti a szárazon pácolt sonka feldolgozása során. A sonkára jellemző érzékszervi tulajdonságok kialakulása szorosan összefügg a zsír hidrolízisével és oxidációjával (Andres et al., 2005; Martín et al., 1998).

Ahhoz, hogy az érlelés folyamata rendben végbe menjen, az érlelőkamrában uralkodó körülményeket folyamatosan ellenőrizni kell. A légsebesség, a hőmérséklet és relatív páratartalom a modern érlelőkamrákban általában számítógépes vezérlésű, de ellenőrzésük ebben az esetben is rendkívül fontos. A hőmérséklet jól ismert akadálya a mikrobiális stabilitásnak, és befolyásolja a proteolízist és egyes érzékszervi tulajdonságokat, a relatív páratartalom (RH) hatását azonban csak részben vizsgálták a szárazon pácolt sonkák esetében.

Az érlelési, szárítási folyamat során a hús belső részéből a víznek a felszínre kell diffundálnia, majd onnan a nedvesség elpárolog a kamra környezetébe. Fontos, hogy a diffúzió és a párolgás hasonló sebességgel történjen, hogy a túlzott párolgás elkerülhető legyen. Ellenkező esetben a termék felületén kérgesedés következik be. A víz a friss hús legnagyobb mennyiségben előforduló összetevője, és fontos szerepet játszik a hús fizikai-kémiai, funkcionális és érzékszervi tulajdonságai tekintetében. A nedvességtartalom az élelmiszeripari termékek feldolgozását és tárolását befolyásoló fontos kémiai paraméter. Az izomszövetben a víz a miofibrillumokon belül, a miofibrillumok között, a miofibrillumok és a sejtmembrán (szarkolemma) között, az izomsejtek között (extracelluláris víz) és az izomkötegek között található (Huff-Lonergan and Lonergan, 2005). Az izomszövetben lévő víz fehérjékhez kötött, sejtes struktúrákban immobilizált vagy szabad víz formájában lehet jelen. A víz eloszlása és mobilitása a húsokban és húskészítményekben nagyban befolyásolja többek között a mikrobiológiai stabilitást, valamint a termék minőségét (megjelenés, állomány, szaftosság stb.) (Dhall et al., 2012; Shao et al., 2016). A kérgesedés problémáját illetően a sonkák külső része nagymértékben szárad, miközben a belső rész nedvességtartalma továbbra is nagyon magas marad. Ennek eredményeként nagyon erős nedvességgradiens jelenik meg a belső és a külső zóna között. A belső zónából a víz diffúziós sebessége nem kompenzálja a felszínen

bekövetkező magas kiszáradási sebességet, és ennek következtében a felület megkeményedik, és kéreg képződhet (Serra et al., 2005). Ebben az esetben a víz diffúziója a hús felszínére már nagyon nehezen megy végbe (Toldrá, 2012).

A vízdifúziós képesség hőmérsékletfüggését a szárítás-érlelés szakaszában már számos esetben vizsgálták (Bantle et al., 2014; Clemente et al., 2007; Gou et al., 2003). Ez az összefüggés a legtöbb élelmiszertermék esetében Arrhenius-egyenlettel [5] írható le:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad [5]$$

Ahol:

D diffúziós tényező [m²/s]

D₀ maximális diffúziós tényező végtelen hőmérsékleten [m²/s]

E_a aktiválási energia [J/mol]

R egyetemes gázállandó [J/mol K]

T hőmérséklet [K]

A levegő hőmérséklete és relatív páratartalma befolyásolja az egyensúlyi víztartalmat és a felület összetételét és ennek következtében a felület megjelenését és textúráját (Arnau et al., 2003). Kimutatták például, hogy a pácolt termékek gyártási folyamatának késői szakaszában a hőmérséklet emelkedésével nő a proteolízis mértéke, ezáltal olyan termékhibák fordulhatnak elő, mint a húsfelszín fényesedése, a pasztaszerű állomány vagy a savanykás íz kialakulása (Arnau et al., 1997; Martín et al., 1998). Egyes kísérletek során azt a megállapítást tették, hogy 75% RH érték alatt az egyensúlyi víztartalom jelentősen csökken, valamint jelentősebb zsírkiválás volt tapasztalható a bőr alatti rétegen (Arnau and Gou, 2001; Comaposada et al., 2000). Általánosságban ajánlott elkerülni azonban a túl magas RH-értékeket is az érlelés során a nemkívánatos nyálkásodás megelőzése és a foszfátkristályosodás lassítása érdekében. A leggyakrabban használt páratartalom 75-95% a sózási szakaszban és 65-80% a szárítási-érlelési szakaszban (Toldrá, 2004). A levegő relatív páratartalma döntő fontosságú paraméter, még a legkisebb változások is jelentősen befolyásolják a dehidratálási sebességet (Bantle et al., 2014).

A szabadtartású, hagyományos sertésfajtákból származó, kiváló minőségű, száraz pácolt sonkák (pl. Iberico sonkák) esetében általában hosszabb szárítási időt alkalmaznak a hagyományos eljárások szerint, míg az iparszerű sertésekből (pl. Serrano sonkák) származó sonkák esetében általában rövid, magasabb hőmérsékleten történő érlelési folyamatot választanak. A spanyol hagyományosan pácolt sonkák esetén a sózást legalább 30 napos nyugalmi időszak követi 1-5°C-on,

hogy a NaCl elérje a sonka belső részét. Ezután a hőmérsékletet a vízaktivitás csökkenéséhez viszonyítva fokozatosan emelik, hogy felgyorsítsák a száradási folyamatot és a jellegzetes érlelt íz kialakulását. Az ibériai sonka gyártásánál azonban az érlelési szakasz akár 24 hónapig is eltarthat 10-20°C-os hőmérsékleten, 65-82%-os relatív páratartalom mellett. Ez a hosszú érlelési idő lehetővé teszi a további kémiai és enzimatis reakciók révén létrejövő finom és intenzív ízek kialakulását (Estévez et al., 2014). Az érlelési idő lerövidítésével a szárítóberendezések kihasználhatósága növelhető, amortizációja csökkenthető lenne, valamint az a termékben álló töke, illetve a szükséges munkaerő csökkentését eredményezné. Ezen kívül növelné a haszonkulcsot és a termék versenyképességét, miközben csökkentené például a penészesedés, a lipioxidáció és az atkaferőzés lehetőségét is (Arnau et al., 2007).

3.6. Diffúziós és empirikus modellek

Napjainkig számos tanulmányt végeztek a sódiffúzió vizsgálatára pácolt sonka feldolgozása során. A NaCl diffúziója az izmokba általában gyorsan végbemegy, a zárt szöveti mikroszerkezettel rendelkező húsok esetén azonban ez a folyamat lassúnak mondható (Lawrie and Ledward, 2006). Az oldott anyagok (pácolás esetében a pácsó) és a víz diffúziós sebessége az élelmiszerből és az élelmiszerbe több tényezőtől függ, mint például az alapanyag (alak, méret), az ozmotikus oldat összetétele és koncentrációja, a hőmérséklet, az oldat és a minta tömegének aránya, valamint az oldat keverésének intenzitása (Chiralt and Fito, 2003; Lazarides et al., 2007).

A hő- és anyagátadási paraméterek, mint például a hőátadási együttható és a termikus diffúziós tényező értékei, valamint az anyagátadási együttható és a diffúziós tényező értékei nagyon fontosak az élelmiszer-feldolgozási műveletek jellemzése és modellezése szempontjából (Erdogdu, 2005). A transzportjelenségek alapfogalmainak tanulmányozása és azok alkalmazása bármely folyamat elemzésére, előrejelzésére és tervezésére, fontos lépés az élelmiszer-mérnöki tudományok fejlődésében (Welti-Chanes et al., 2005). Az ozmotikus folyamatok során a víz- és szilárdanyag-átadás kinetikájának ismerete különleges technológiai jelentőséggel bír. A tömegátadási folyamatok pontos ismerete megkönnyíti például a húsok ozmotikus oldatban (páclében) való mérítési idejének becslését, hogy meghatározott nedvesség- és sótartalmú termékeket kapjunk (Schmidt et al., 2008). A diffúziós folyamatokat leíró modellek fő célja, hogy hosszadalmas és költséges kísérletek nélkül adjanak információt a pácolási és érlelési folyamat során lezajló anyagtranszport műveletekről (Chabbouh et al., 2012). A hagyományosan pácolt sonkák gyártása hosszú folyamat, így a modellezés hasznos eszköz a pácolási és a szárítási kinetika ellenőrzésére és előrejelzésére, valamint a teljes folyamat értékeléséhez. Az ozmotikus folyamatok leírására különböző matematikai modelleket használtak számos tanulmányban többek között sertéshús (Gómez

et al., 2019, 2015), marhahús (Aykın-Dinçer, 2021), csirkehús (Schmidt et al., 2009) és strucchús (Alamatian et al., 2019) esetén is.

Az élelmiszertudományi szakirodalomban gyakran találkozunk empirikus vagy elméleti matematikai modellekkel (Ghafoor et al., 2014). Az empirikus modellek általában kísérleti adatok egyszerű matematikai korrelációjából származnak (Öner et al., 2010), míg az elméleti modellek esetében a diffúziós és/vagy konvekciós tömegátadás elemi lépéseit veszik figyelembe (Yildirim et al., 2011). Az utóbbi modellek előnye, hogy ezek pontosabb betekintést nyújtanak a fizikai folyamatokba (Sablani et al., 2006).

Az empirikus modellek egyszerűbbek, mint a diffúziós modell, mivel nincsenek geometriai korlátozások, és a folyamatparaméterekre vonatkozó feltételezések sem szükségesek. Sok esetben ezek a modellek jobb illeszkedést is nyújtanak. Hátrányuk azonban, hogy a diffúziós folyamatok leírása csak adott körülmények között lehetséges (Ochoa-Martinez et al., 2007). Az empirikus modellek közé tartozik többek között a Peleg, Azuara, Zugarramurdi és Lupín modell is (Azuara et al., 1992; Peleg, 1988; Zugarramurdi and Lupín, 1980). Ezek a modellek lehetővé teszik az egyenlí értékek (S_∞ , N_∞) kiszámítását is rövid idő alatt nyert kísérleti adatok felhasználásával (Assis et al., 2016).

Az ozmotikus kezelés során történő tömegátadás kinetikájának leírására használt elméleti modellek diffúziós egyenleten alapulnak (Chiralt et al., 2001). A leggyakrabban alkalmazott elméleti modellek Fick II. diffúziós törvényéből [6] származnak.

$$J_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad [6]$$

Ahol,

J_x anyagáram [mol/s]

D diffúziós tényező [m^2/s]

C koncentráció [mol/m^3]

Az egyenlet felhasználásával só és a víz diffúziós tényezőjének (D [m^2/s]) számítása lehetséges. A diffúziós együttható az az arányossági tényező, amely az egységnyi idő alatt egységnyi koncentrációgradiens révén egységnyi területen át diffundáló anyag mennyiségét jelöli. Ez az egyenlet azonban csak klasszikus geometriák (henger [7], gömb [8], végtelen síklap [9]) esetén nyújt analitikus megoldást. A nem klasszikus geometriák megoldása azonban numerikus technikák alkalmazását igényli (Schmidt et al., 2009).

$$\frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_{eq}} = \sum_{n=1}^{inf} \frac{4}{Be_n^2} \exp\left(-\frac{b_n^2 Dt}{r^2}\right) \quad [7]$$

$$\frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{inf} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D t}{r^2}\right) \quad [8]$$

$$\frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{inf} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D t}{L^2}\right) \quad [9]$$

Ahol:

- C_0 hús kiindulási sótartalma [g/100g]
- C_t hús sótartalma t időpontban [g/100g]
- C_{eq} hús kiegyenlítődségi sótartalma [g/100g]
- n pozitív egész szám [dimenziómentes]
- D diffúziós tényező [m^2/s]
- Be Bessel függvény n helyen vett gyöke [dimenziómentes]
- r sugár [m]
- L vastagság [m]

Amennyiben az egyenletekbe a koncentrációkat (C) nedvességtartalommal (X, [kg/kg szárazanyag]) helyettesítjük, a víz diffúziós tényezőjét kapjuk meg.

A mechanikus és empirikus matematikai modellek összehasonlítását több kutató is vizsgálta (Chabbouh et al., 2012; Corzo et al., 2012; Dimakopoulou-Papazoglou and Katsanidis, 2016). Összességében megállapították, hogy Zugarramurdi és Lupin, valamint Peleg modelljei kielégítően írják le a vízvesztéséget és a só felvételét a pácolási folyamat során. Dimakopoulou-Papazoglou és Katsanidis (2016) arról számolt be, hogy Peleg és Fick modelljei között nem mutatkozott jelentős eltérés, ami nyilvánvalóvá teszi, hogy mindkét modell megfelelően képes leírni a vízvesztéséget és a sófelvételt az ozmotikus folyamat során.

3.7. A pácolást gyorsító eljárások

A hagyományosan pácolt sonkák érlelése nagyon hosszú és lassú folyamat, ezért számos javaslat született a folyamat felgyorsítására. Kezdetben a sonkák kicsontozásában, és a bőr eltávolításában látták a megoldást, hogy ennek köszönhetően a sódiffúzió gyorsabban végbe menjen. Számos tanulmány szól a sonkák fagyasztás és felengedetetés után történő pácolásáról, mely szintén gyorsabb sóbehatolást eredményez, azonban szerkezeti károsodást okoz (Barat et al., 2005; Marriott et al., 1983).

Az újabb javaslatok a vákuum alatt történő páclében történő impregnálás módszerén alapulnak, amelyet friss, vagy fagyasztott sonkák felolvasztása közben is lehet alkalmazni (Flores et al., 2009). Ennek a módszernek köszönhetően a pácoláshoz, valamint a felolvasztáshoz szükséges idő

csökkenthető anélkül, hogy a lezajló biokémiai reakciókat vagy a végtermék érzékszervi minőségét befolyásolná (Barat et al., 2006; Flores et al., 2006).

Később egyre elterjedtebbé váltak azok az eljárások, amelyeknek köszönhetően a páclé gyorsabb bejutása és egyenletesebb eloszlása érhető el a közvetlenül a hús belsejében. Ennek köszönhetően a pácolási és érlelési folyamat is lerövidíthető. Ilyen technológia például az injektálás, amikor a páclevet konkrétan a hús belsejébe juttatják be fecskendővel. A páclé egyenletes eloszlásának biztosítására gyakran alkalmaznak tumblerezést is, amely során a pácolt sonkákat egy lapátokkal ellátott forgó dobba helyezik. A berendezésben így a sonkák egymáshoz és a lapátokhoz ütődnek, egyfajta „masszírozás” történik, ami a szövetek belső hőmérsékletének emelkedését eredményezi, ezáltal növeli a sóoldat behatolását és eloszlását a termékbe. Emellett a mozgásnak köszönhetően a vízdoldható fehérjék a hús felületére jutnak, így nő a sonkák víztartó képessége is (Shahidi et al., 2014).

Az elmúlt időszak fontos fejlesztéseként említhető a proteolízis szabályozása a pácolt termékeknel. Ez a módszer a pácolási és érlelési folyamat paramétereit (pH, sótartalom, vízaktivitás stb.) használja fel az izom endoproteázainak és exoproteázainak szabályozására, amelyek legfőképpen a textúra és az íz kialakításában vesznek részt (Toldrá, 2012).

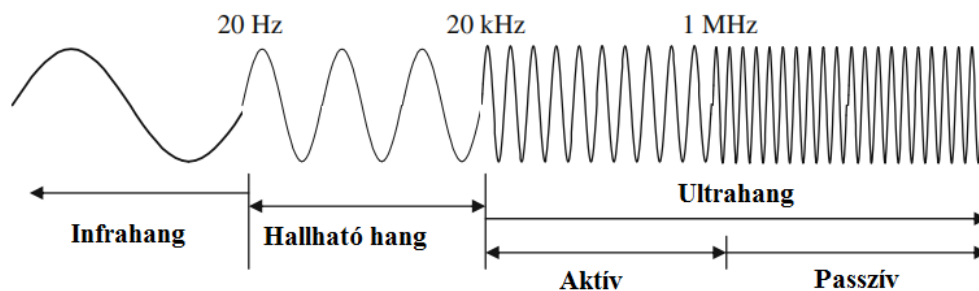
Léteznek még további tömegtranszport folyamatokat felgyorsító eljárások, melyek manapság egyre elterjedtebbek. Az élelmiszeriparban az elmúlt pár évtizedben a tudatosabb fogyasztói szokások, igények és ízlések változásai hívták életre a hagyományos élelmiszer feldolgozó technológiák fejlődését, valamint új eljárások kialakítását. Így fejlődött a hatékonyság és az élelmiszerbiztonság, az élelmiszerek tápértéke és minősége javult, meghosszabbodott az eltarthatóság. Ilyen jövőbe mutató nem-termikus technológiának tekinthető a nagy hidrosztatikus nyomáskezelés (HHP), a pulzáló elektromos erő (PEF) vagy az ultrahang (UH) (Cárcel et al., 2012). A nem termikus technológiák önmagukban vagy kombinálva nagyon vonzóak az élelmiszeripar számára, mivel lehetőséget nyújtanak a fogyasztók kiváló minőségű termékek iránti igényének kielégítésére. A nem termikus élelmiszeripari technológiák egyik legfontosabb előnye, hogy csökkenthetik a magas hőmérséklet alkalmazásából eredő táplálkozási és minőségi romlást az élelmiszeripari termékekben. Ezek a technológiák képesek az élelmiszer-biztonságot környezeti vagy szubletális hőmérsékleten is biztosítani, minimális vagy semmilyen negatív hatással az élelmiszerek minőségére és táplálkozási profiljára.

3.7.1. Az ultrahang

3.7.1.1. Az ultrahang elve és mechanizmusa

Az ultrahang az emberi hallásküszöböt meghaladó frekvenciájú (>16 kHz) hanghullámként definiálható. A hanghullámok frekvenciatartományok alapján három kategóriába sorolhatók (8. ábra). Ezek a következők:

- infrahanghullámok, azaz a hallható tartomány alatti (<20 Hz) frekvenciájú hullámok
- hallható hullámok, azaz a 20Hz-16kHz frekvenciatartományba eső hullámok
- ultrahangok, azaz a 16kHz feletti hullámok. Az 1 W/cm^2 vagy 10000 W/m^2 teljesítmény alatt passzív ultrahangról, felette aktív ultrahangról beszélünk.



8. ábra: A hanghullámok

(Kentish and Ashokkumar, 2011)

Az ultrahanghullám a rezgési energia egy formája, amelyet az elektromos energiát rezgő hangenergiává alakító ultrahangos átalakítók állítanak elő. A két leggyakrabban használt transzformátor az elektromechanikus átalakítók csoportjába tartozó piezoelektromos és a magnetosztatikus átalakító (Mason and Peters, 2002; Shung et al., 2007). Ezen kívül előfordulhatnak még aerodinamikus, hidrodinamikus és mechanikus átalakítók. Az ultrahangos átalakítók szintén képesek a hanghullámokat elektromos energiává alakítani, és az alkalmazástól függően különböző méretekben és frekvenciákban állnak rendelkezésre.

Frekvenciatartományuk alapján alacsony (20-100 kHz), közepes (100 kHz – 1 MHz) és magas (1-10 MHz) frekvenciájú ultrahang hullámokat különböztethetünk meg (Li et al., 2021). Az élelmiszerek tartósítására és feldolgozására alkalmas ultrahang frekvenciatartomány 20 és 1000 kHz között mozog, az 1000 kHz feletti frekvenciákat (passzív ultrahang) elsősorban diagnosztikai célokra és az élelmiszerek minőségének értékelésére alkalmazzák. A nagyfrekvenciás ultrahanghullámok nem, vagy csak minimális fizikai és/vagy kémiai hatást gyakorolnak az élelmiszerekre, ezért az élelmiszerek minőségének roncsolásmentes értékelésére használják. Az ultrahang fizikai hatásai az alacsonyabb, 20-100 kHz-es frekvenciatartományban dominálnak, ahol magasabb az átmeneti kavitáció szintje, míg a kémiai hatások a 200-500 kHz-es tartományban dominálnak a

nagyszámú aktív buborék keletkezése miatt (Kentish and Ashokkumar, 2011). Az alacsony frekvenciájú ultrahang, más néven aktív ultrahang nagy intenzitású hullámokat alkalmaz, amelyek a kívánt fizikai és kémiai változásokat idézik elő az élelmiszerekben.

Amikor az ultrahang bármely közegben terjed, a közeg molekuláiban összenyomódást majd dekompressziót/ ritkulást idéz elő. A folyékony közegben tehát váltakozó pozitív és negatív nyomásciklusok alakulnak ki. Amikor a pillanatnyi negatív nyomás egy ponton meghaladja a környezeti nyomást, légbuborékok keletkeznek, mivel az oldott gázok oldhatósága erősen csökken. Ezt kavitációnak nevezik. A kavitációt a keletkezés módja alapján négy típusba sorolják: akusztikus, hidrodinamikus, optikai és részecskekavitáció. Csak az akusztikus és a hidrodinamikus kavitáció okozhat kémiai és/vagy fizikai változásokat, míg az optikai és a részecskekavitációt jellemzően egyetlen buborék kavitációjára használják, amely nem idéz elő fizikai és/vagy kémiai változásokat az anyagokban (Gogate and Kabadi, 2009).

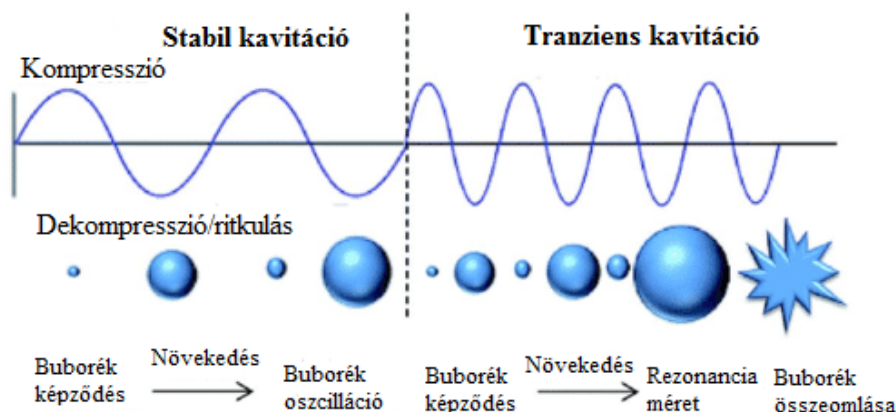
Az akusztikus kavitáció létrehozására számos módszer létezik, lökéshullámok vagy állandósult állapot révén. A jelenséggel kapcsolatban széleskörű ismeretek állnak rendelkezésre, leírásáról folyamatos viták folynak a szonolumineszcencia, a szonofizika és a szonokémia területén.

A kavitációs- vagy Blake-küszöbérték az a legalacsonyabb akusztikus nyomás, amelynél buborékképződés figyelhető meg. A Blake-küszöbérték növekedésével csökken a környezeti buborékméret, mivel a ritkítási ciklusokban a negatív nyomás nagyobb értéke kisebb buborékmagokra hathat, ami több kavitációs buborékot eredményez (Feng et al., 2011). Alacsonyabb frekvenciákon sokkal könnyebb nagy amplitúdójú akusztikus hullámot (nagy akusztikai nyomást) létrehozni. Magasabb frekvenciákon (>1 MHz) az akusztikus nyomás kisebb.

Az akusztikus kavitáció során képződött buborékok a rezonanciaméret elérése után vagy összeomlanak, melynek következtében turbulenciát idéznek elő a kavitációs közegben, vagy tovább rezeghetnek (méretcsökkenés és növekedés következtében). A buborékok életciklusának hosszától függően beszélhetünk tehát tranziens/tehetetlenségi, vagy stabil kavitációról (9. ábra) (Cárcel et al., 2012).

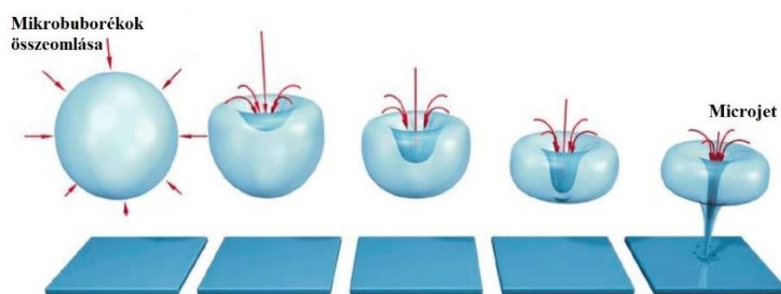
A tranziens kavitáció során a buborékok adiabatikus összeomláson mennek keresztül, ami rendkívül magas helyi hőmérsékletet és nyomást eredményez. Ez a jelenség bizonyos kémiai reakciókat okozhat vagy fokozhat. Ezeket a hatásokat együttesen szonokémiának nevezik (Li et al., 2021). A buborékok összeomlása, kipukkadása által mikroörvények képződhetnek, amelyek hozzátűközhetnek a szilárd test felületéhez, ezáltal pedig folyadékrészecskék áramolhatnak be a szilárd testbe. A mikrobuborékok összeomlását megelőzően a buboréknövekedés pulzáló hatása a hanghullám-ciklusok révén akusztikus áramlást okozhat, amely biztosítja a folyadék keverését, fokozva a hús pácolása során a tömegátadást (Cárcel et al., 2007). Emellett a buborékok összeomlása

lökéshullámok és mikrojetek kialakulását eredményezi, amelyek biológiai szövetkárosodást okoznak, ezáltal tovább növelve a húsba történő tömegátadást, vagyis a só bejutását (Siró et al., 2009).



9. ábra: Stabil és tranziens kavitációt bemutató kavitációs buborékok
(Gupta et al., 2021)

A szonoporáció olyan folyamatra utal, amelyben az ultrahangot a sejtek membránpermeabilitásának fokozására használják (Miller et al., 1999). A kavitációs buborékok mechanikai és kémiai hatást gyakorolnak a sejtmembránra, valamint nyírófeszültséget hoznak létre, melynek következtében abban különböző pórusok alakulnak ki. Azok lehetővé teszik a molekulák bejutását a sejtbe passzív diffúzió útján (Fan et al., 2017). A gyógyszeradagolás területén számos tanulmány vizsgálta a mikrobuborékok használatát az ultrahang biofizikai hatásainak felerősítésére. A mikrobuborékok általában fehérje-, lipid-, vagy polimer héjjal stabilizált vagy héj nélküli, gázzal töltött struktúrák, és közülük némelyik klinikailag is jóváhagyott ultrahangos hatóanyag (Hernot and Klibanov, 2008). Egyes kutatások vizsgálták a héj nélküli mikrobuborékok hatását, és az eredmények alapján azt a megállapítást tették, hogy az összeomló mikrobuborékok olyan folyadéksugarakat (microjet) hoznak létre (10. ábra), amelyek képesek átszűrni a sejtek felületét és membránpórusokat alakítani ki. Ennek következtében azt feltételezték, hogy a kialakuló microjetek képesek a sejtekbe juttatni a különböző gyógyszereket (Dijkink et al., 2008; Ohl et al., 2006; Postema et al., 2005). Ez alapján a mikrobuborékokkal kombinált ultrahang használata ígéretes módszernek tűnik a NaCl-bejutás további fokozására az izommembránon keresztül a pácolás során.



10. ábra: Kavitációs buborék összeomlása és a microjet kialakulása
(Malek et al., 2020)

3.7.1.2. Az ultrahang élelmiszeripari felhasználása

Az élelmiszeripari alkalmazásban is a microjetek képződésének jelenségét használják ki az ultrahangos kezelések során. Ez azért lehetséges, mert az élelmiszerfeldolgozási technológiákban a folyadék-szilárd, vagy folyadék-gáz határfelületeken létrejövő energiaveszteség, vagy felületmódosulás a különböző részecskék/buborékok leválását (pl. membrántisztítás, gáztalanítás), aggregátumok felbomlását (pl. emulgeálás), vagy a felület morfológiai változásait eredményezi (Li et al., 2018; Muthukumaran et al., 2004).

Az élelmiszeriparban az aktív ultrahang alkalmazása az elterjedt, hiszen képes a kívánt kémiai és fizikai változásokat előidézni az élelmiszerben. Az ultrahang azonban csak olyan rendszerekben alkalmazható, amelyekben az ultrahanghullámok továbbítására alkalmas közeg van.

Az ultrahangos kezelés sok lehetőséget rejt magában számos élelmiszeripari alkalmazásban (1. táblázat). Az alkalmazások többségében az ultrahang alkalmazása kedvező változásokat eredményez a legfontosabb élelmiszer-minőségi és fizikai-kémiai tulajdonságokban. A kezelés azonban negatív hatásokat is kiválthat az élelmiszerek minőségére, például mellékízek megjelenését és a táplálkozási jellemzőkkel kapcsolatos vegyületek lebomlását (Pingret et al., 2013).

1. táblázat: Ultrahang alkalmazása a különböző élelmiszeripari műveletekben (Ojha et al., 2018)

Művelet	Ultrahangos alkalmazása
Főzés és sütés	A továbbfejlesztett hőátadás rövidebb főzési időt és egyenletesebb főzést biztosít.
Vágás	Ultrahangos rezgések alkalmazása a vágóeszköznél. A módszer alkalmas fagyasztott vagy puha élelmiszerekhez.
Keverés és homogenizálás	A turbulens keverés a folyadék/folyadék határfelületeken történő kavitáció jellemzője, és széles körben alkalmazzák a szószok és majonéz előállításánál.

Pácolás	A folyadékok jobb behatolása az élelmiszer-alapanyagokba. Zöldség- és hústermékekhez egyaránt alkalmazható.
Szárítás, szűrés	A levegőn történő szárítási sebesség növekedése a jobb hőátadásból adódik. Az ultrahang a szűrésnél is alkalmazható, mivel javítja a víz áramlását a szűrőn keresztül.
Hús puhítása	Az ultrahang puhítja a hús állományát.
Extrakció	A növények sejtfalának lebontása a jobb oldószerpenetrációval együtt a növényekből, gyógynövényekből és magvakból származó aromák és tápanyagok jobb és néha célzottabb extrakcióhozamát eredményezi.
Fagyasztás és kristályosítás	A kristályosodás kialakulása kavitációval javítható, miközben hatékony hőátadást is biztosít.
Gáztalanítás és habzástgátlás	Az ultrahangos hullámok meggátolják a habzást, és lehetővé teszik a gázok eltávolítását a folyékony élelmiszerekből, hogy biztosítsák a termék stabilitását, és megakadályozzák a termék oxidatív károsodását. Fontos folyamat az italok konzerválása vagy palackozása előtt.

Az ultrahang alternatív technikaként történő alkalmazását a folyékony élelmiszerek és italok esetében széles körben vizsgálták. Az ultrahang önmagában vagy enyhe hővel, nyomással, vagy hő és nyomás kombinációjával való hatásosságáról számoltak be a folyékony élelmiszerek, például gyümölcslevek, tejek és folyékony tojásszuszenziók legfontosabb romlást okozó és patogén mikroorganizmusainak inaktiválása esetén (Bermúdez-Aguirre et al., 2009; Dinçer and Topuz, 2015; Kahraman et al., 2017). Azonban az ultrahang alkalmazása nemcsak az élelmiszer-biztonság javításában mutatkozik meg, hanem az élelmiszer tulajdonságainak pozitív irányba történő megváltoztatásában is. Az esetek többségében az ultrahang folyékony élelmiszereknél történő alkalmazásának előnyei közé tartozik az eltarthatósági idő növelése a romlást okozó mikroorganizmusok csökkentése révén, valamint a termék stabilitásának javítása a tárolás során, például a gyümölcslevek zavarosságának meggátolása révén. A gyümölcslevek ultrahangos feldolgozása bizonyítottan minimális hatással van a gyümölcslevek kulcsfontosságú táplálkozási és érzékszervi tulajdonságaira (Aadil et al., 2013; Jambrak et al., 2017; Tiwari et al., 2008).

Az ultrahangot számos esetben alkalmazzák szilárd élelmiszerek kezelésére is. Az ultrahang szilárd élelmiszerekben történő alkalmazása azonban nagyobb kihívást jelent a folyékony élelmiszerekhez képest. Az ultrahang-technológia alkalmazása a lipideket tartalmazó élelmiszereknél például az alkalmazott feldolgozási körülményektől függően nemkívánatos változásokat okozhat

az élelmiszerek lipidprofiljában. A lipidek oxidációja pedig nemcsak kellemetlen szagokat és ízeket eredményez, hanem a másodlagos reakciótermékek képződésével az élelmiszerekben csökkentheti a minőséget és a biztonságot is.

3.7.1.3. Az ultrahang alkalmazása a húsiparban

A húsminőség legfontosabb, az iparra nagy hatással lévő jellemzői a pH, a víztartó- és vízkötő képesség (WBC, WHC), az állomány, az oxidatív stabilitás és az érzékszervi tulajdonságok. Az új technológiák húsiparban való alkalmazásának mérlegelésekor ismerni kell mind a hatásmechanizmusokat, mind az élelmiszer átalakulására, tartósítására és integritására gyakorolt hatásokat.

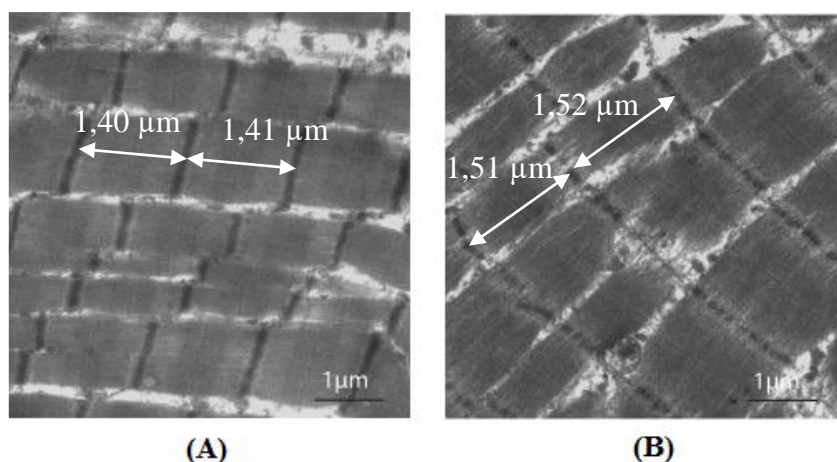
Az élelmiszerek vizuális megjelenése, ízletessége, textúrája, valamint íz kibocsátása és emészthetősége nagymértékben függ az összetevők szerkezetétől. Az akusztikus kavitáció fizikai hatásainak és kémiai termékeinek köszönhetően az ultrahang egyedülálló módon képes módosítani az élelmiszerek szerkezetét. A vízmolekuláknak az akusztikus kavitáció során a magas helyi hőmérséklet és nyomás hatására bekövetkező hasadása hidroxilgyököket hoz létre, amelyek az élelmiszerekben mikroszintű kémiai változásokat okozhatnak (Barteri et al., 2004). Az így keletkező szabad gyökök oxidálhatják a sejtfal szerkezeti fehérjéit és a fenolokat, ami lehetővé teszi a sejtfal poliszacharidok közötti keresztkötést és a szövetek későbbi keményedését. Az erős fizikai erők, mint például a nyírás, a lökéshullámok és a mikrosugarak a részecskéket és a molekulákat nagyobb erővel való ütközésre kényszerítik, ami a részecskék széteséséhez, a sejtfalak átteresztőképességének megváltozásához vagy széteséséhez, valamint a gyengébb intermolekuláris erők, például a hidrofób és van der Waals kötések felszakadásához vezet (Mason et al., 2011; Rokhina et al., 2009; Tian et al., 2004).

Az ultrahang használata a húsiparban a szarvasmarhák zsírjának és izomzatának értékelésével kezdődött. Ezt az 1950-es évek óta végzik. Napjainkban az alacsony intenzitású ultrahangot már rutinszerűen használják a minőség, az íz és a zsengeség javítására, amelyek a legfontosabb minőségi jellemzők a fogyasztói elégedettség szempontjából.

A közelmúltban számos tanulmány számolt be azonban a nagy intenzitású ultrahang felhasználási lehetőségeiről a friss hús esetében. A kutatási eredmények alapján az ultrahang alkalmazása előnyös lehet a fagyasztás (Zheng és Sun, 2006), a hús pácolása (Cárcel et al., 2007), a főzés (Chemat et al., 2011), a baktériumok gátlása (Caraveo et al., 2015) és a puhítás (Peña et al., 2017) terén is.

A húsok pácolása során több ízben alkalmazták például a statikus pácolást az állomány javítására. Kang et al. (2017) kutatásai alapján a szöveteken belüli kavitáció hosszabb ideig (pl. 120

perc) történő alkalmazása az izomrostok duzzadását okozza (11. ábra). A 20 kHz 300 W teljesítményű ultrahang alkalmazása kísérletük alapján sikeresen alkalmazható a pácolás során a marhahús zsengeségének növelésére.



11. ábra: 6% sótartalmú marhaszegyek transzmissziós elektronmikroszkópos felvételei. (A) 120 percig tartó statikus pácolás (B) 120 percig tartó ultrahangos pácolás (300 W).

(Kang et al., 2017 alapján)

Hasonló állománypuhító hatást figyeltek meg 15 kHz 2200 W teljesítményű ultrahanggal kezelt sertéskarajnál, valamint 20 kHz 1000 W teljesítményű ultrahang alkalmazása esetén is marhahús főzése során (Yeung and Huang, 2017; Zou et al., 2018). Ezzel szemben az ultrahangos fürdő használatával (40 kHz, 110 W) a nyúlhús keményedett a pácolás során. Ez a sejtek közötti lipidek és fehérjék szabad gyökök által kiváltott oxidációjával magyarázható, ami a miofibrilláris keményedéshez vezetett (Gómez-Salazar et al., 2018; Z. Wang et al., 2018).

Sok kutatás alátámasztotta a húspuhító hatáson kívül az érlelési idő rövidítésének lehetőségét is az ultrahang alkalmazásával anélkül, hogy a termék egyéb minőségi tulajdonságait a kezelés megváltoztatná. A hatást elsősorban a miofibrilláris fehérjeszerkezetek mechanikai szakadásának, a kollagén makromolekulák fragmentálódásának, valamint a fehérjék és egyéb vegyületek migrációjának tulajdonították (Stadnik et al., 2008). Ezáltal felgyorsul a proteolízis, vagy a fehérjék denaturációja a dezmin és a troponin-T degradációjának növekedésével, valamint a miofibrillumok szakadása a Z-vonalak és az I-sávok mentén (Barekat and Soltanizadeh, 2018; Jayasooriya et al., 2004). Ezeket a változásokat a proteolízis aktiválásával is összefüggésbe hozták a lizoszóma katepszinek és/vagy az intracelluláris kalciumionok felszabadulása révén, amelyek aktiválják a kalpainokat és rövidítik az érlelési időt (Chang et al., 2015; Stadnik and Dolatowski, 2011).

Több kutatás során kapott eredmények alátámasztják, hogy a nagy intenzitású ultrahangos kezelés hatással van a hús mikroszerkezeti változására is. Az aktív ultrahang akár önmagában, akár más technológiákkal kombináltan (pl. pácolás, enzimek hozzáadása) javítja a hús állományát.

A mikroszerkezeti változások közé tartozik a miofibrillumok Z és M vonalakon keresztüli szakadása, a miofibrilláris fehérjék másodlagos szerkezetének megváltozása, valamint a miozin denaturációja (Chang et al., 2015; Kang et al., 2017, 2016; A. Wang et al., 2018). Az ultrahangos kezelés során alkalmazott frekvenciától függően létrejött váltakozó pozitív és negatív nyomás az anyag tágulását vagy összenyomódását okozza, ami a sejtek repedését, szakadását eredményezi.

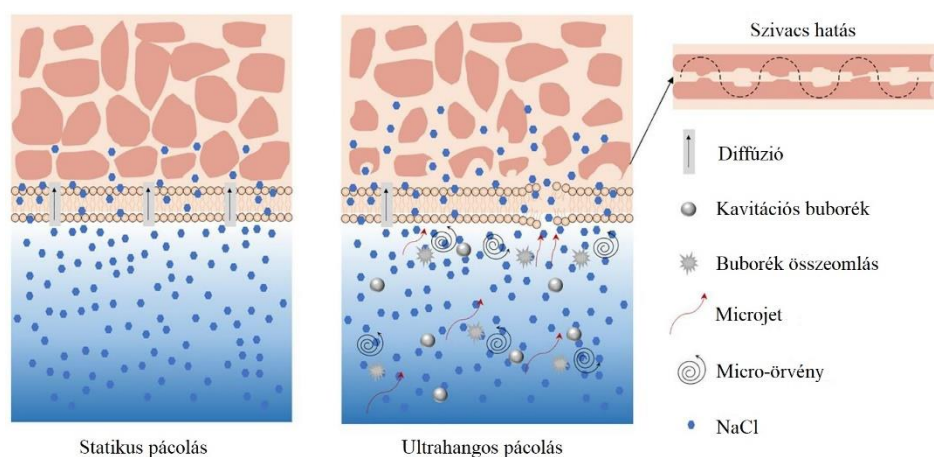
Egyes kutatások szerint az ultrahang hatására az izomszövet áteresztőképessége is megnő, ami nagy előnyt jelenthet a húsok pácolása során (Leal-Ramos et al., 2011). A húsminták víz – és NaCl tartalmát a kezelés jelentősen befolyásolja például Carcel et al. (2003) vizsgálata alapján. Kísérleteik során kapott eredményekből az a megállapítás tehető, hogy az ultrahang alkalmazásánál egy bizonyos intenzitás fölött (39 W/cm^2) érhető el nagyobb tömegtranszport a NaCl és a víz tekintetében. Az ultrahang intenzitásának és só diffúziójának kapcsolatáról több tanulmány is beszámol. Siró et al. (2009) három pácolási kezelést alkalmaztak sertéskarajon alacsony frekvencia (20 kHz) és intenzitás ($2\text{-}4 \text{ W/cm}^2$) mellett. A három kezelés a hagyományos pácolás, a vákuum alatti tumblerezés és az ultrahangos pácolás voltak. A kísérletek során a só diffúziójának jelentős javulását figyelték meg a hagyományos, sós lében történő pácoláshoz képest. A diffúziós együttható értéke exponenciálisan növekedett az ultrahang intenzitásának növelésével. Az ultrahang alkalmazása során képződő kavitációs buborékok növekedésének pulzáló hatása akusztikus áramlást okozhat, amely biztosítja a páclé keverését, ezáltal fokozva a tömegátadást (Cárcel et al., 2007).

Az ultrahang pácolás során történő alkalmazási lehetőségeit már ipari körülmények között is vizsgálták sonkagyártás során. Egy kísérletben $10,7$; $17,1$ és $25,4 \text{ W/cm}^2$ intenzitású ultrahangos kezelést alkalmaztak $2,4$ és 6 órán keresztül. A kívánt sótartalom $2,25\%$ volt, melyet mindegyik paraméter mellett 2 órán belül elértek, míg a kontroll mintánál ennek az értéknek az eléréséhez 4 órára volt szükség. Az intenzitásnak a kísérletben tehát nem volt hatása, így valószínűleg már a legalacsonyabb érték is elérte a küszöbértéket, vagy az energia egyenletesen eloszlott a folyadékban. Az ultrahangos kezeléseknél a termék minőségére és érzékszervi tulajdonságaira nem volt hatása, az alkalmazott módszer tehát csak felületi hatással rendelkezik (McDonnell et al., 2014).

Eddig az ultrahangot alkalmazó vizsgálatok többsége csak a hús tömegátadási kinetikájának vagy technológiai tulajdonságainak kérdéseivel foglalkozott. Az ultrahang alkalmazásának a só diffúziójára és az olyan technológiai tulajdonságokra, mint például a hús színére, pH-jára, lipoxidációjára és fehérje denaturációjára gyakorolt együttes hatásának értékeléséről csak kevés tudományos publikáció áll rendelkezésünkre. Sanches et al. (2021) ezt vizsgálták kísérletükben, melyben az alkalmazott ultrahang intenzitását és a páclé sótartalmát változtatták. Megállapították,

hogy a páclé sótartalmának növelése csökkentette a világosság (L^*), a vörösség (a^*) és a sárgaság (b^*) intenzitását a húspan, hatására csökkent a vízaktivitás, valamint a miofibrilláris fehérjék denaturációs hőmérséklete és entalpiája is. Az ultrahang alkalmazásával szintén csökkent a vízaktivitás, a denaturációs hőmérséklet és az entalpia is, anélkül, hogy a kezelés negatívan befolyásolta volna a hús pH értékét, színét vagy oxidatív stabilitását. Kísérleti eredményeik alapján tehát elmondható, hogy az ultrahang olyan technológia, amely felgyorsíthatja a marhahús nedves pácolási folyamatát, lehetővé téve a páclé NaCl tartalmának csökkentését vagy a feldolgozási idő lerövidítését, ezenkívül a fehérjék megváltoztatásával technológiai előnyöket is képes biztosítani.

Az ultrahang alkalmazása a pácolt termékek másik legfőbb lépésének, a szárítási/érlelési folyamatnak az idejét is képes csökkenteni a termék belsejében lévő víz kifelé történő diffúziójának növelése által. Amikor ugyanis a nagy intenzitású ultrahanghullám áthalad egy szilárd anyagon (pl. a húspan), a már korábban említett váltakozó tágulást és tömörülést okoz, amit "szivacs hatásnak" nevezünk (12. ábra). A "szivacs hatás" által keltett erő mikroszkópikus csatornát hoz létre, amely a vízmolekulák kifelé irányuló diffúziója szempontjából előnyösen működik, növelve a hatékony vízdifúziós képességet (Fernandes and Rodrigues, 2008; Gallego-Juarez et al., 1999).



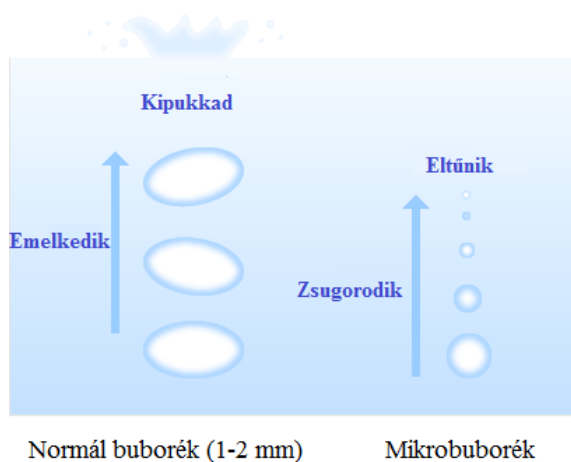
12. ábra: A statikus és az ultrahangos pácolás mechanizmusának sematikus ábrája (Guo et al., 2024)

3.7.1.4. Mikrobuborékok

A mikrobuborékok definícióját illetően nem található egységes megfogalmazás a szakirodalomban. Navarro-Becerra et al., (2022) 0,1-10 μm átmérőjű gázgömbökként definiálják, Jangjou et al. (2021) az 50 μm átmérőnél kisebb meghatározással élnek. Lu et al. (2023) 0,1-100 μm átmérőjű, kis buborékként definiálja a mikrobuborékokat. Egyes publikációban felhasználási terület szerint tesznek különbséget a méretét tekintve. Fizikai környezetben való alkalmazásnál a 100 μm

átmérő alatti, míg az élettani tevékenységek vizsgálatában a 10-40 μm átmérőjű buborékokat tekintik mikrobuborékoknak (Parmar and Majumder, 2013).

A mikrobuborékok jelentőségéről és ipari alkalmazásbeli lehetőségükről már az 1970-es években beszámoltak (Sebba, 1971). Tulajdonságai jelentősen különböznek a hagyományos, milliméter nagyságrendű buborékokétól. A mikrobuborékok nagyobb felület-térfogat aránnyal rendelkeznek, mint a hagyományos buborékok. A tömegátadási sebesség arányos a gáz- és a folyadékfázis közötti határfelület nagyságával, ezért a mikrobuborékok esetében ez a sebesség fokozódik. A 13. ábra vázlatosan szemlélteti a normál, milliméteres nagyságrendű buborékok, és a mikrobuborékok közötti különbséget a folyadékban történő viselkedésük alapján. A normál, 1-2 mm méretű buborékok gyorsan emelkednek, majd a folyadék felszínén szétpukkannak, az oxigén a légkörbe kerül. Ezzel szemben a mikrobuborékok hosszú ideig stabilak maradnak, majd a belső gázok környező folyadék általi oldódása miatt fokozatosan zsugorodnak, végül eltűnnek. Ez, valamint a negatív felületi töltésük, illetve szabadgyök előállítására való képességük azok a tulajdonságaik a mikrobuborékoknak, amelyek miatt érdemes hatásukat és alkalmazási lehetőségeiket vizsgálni (Agarwal et al., 2011). A szabad gyökök képződése feltehetően a zsugorodó gáz-víz határfelület körüli ionkoncentráció növekedésével függ össze. Savas körülmények között kimutatták, hogy hidroxil (OH) gyökök keletkeznek, amelyek erős oxidálószer a vízben, és képesek a fenol bontására (Takahashi et al., 2007).



13. ábra: Normál buborék és mikrobuborék viselkedése folyadékban

(IDEC : Corporate Message, " n.d nyomán)

A mikrobuborékok előállítására különböző módszerek ismertek:

a. Dekompresszió

Ennél a módszernél a buborékok a légköri nyomásnál nagyobb (0,3-0,6 MPa) nyomáson levegővel előzetesen telített víz nyomáscsökkentésével keletkeznek. A túltelített vizet túszelepeken

vagy speciálisan kialakított fúvókarendszeren nyomják át, ami által 30-100 μm átmérőjű buborékfelhők keletkeznek (Rodrigues and Rubio, 2007). A kívánt folyadéktelítettségi szint eléréséhez többféle módszer is alkalmazható. Például a víz és a sűrített levegő egyszerűen összekeverhető egy nyomás alatt álló tartályban (Parmar and Majumder, 2013). Alternatív megoldásként többfázisú centrifugál szivattyúk is használhatók a hatékonyabb előállításához, így nincs szükség légkompresszorokra és telítési tartályokra. A szivattyú szívókamrájába folyamatosan levegő kerül, miközben a víz a berendezésbe áramlik. A bevezetett levegő vízbe oldása után már a mikrobuborékkal összekevert víz kerül kivezetésre a rendszerből (14. ábra).



14. ábra: Többfázisú szivattyú mikrobuborék előállításához
(Lu et al., (2023) alapján)

b. Ultrahang

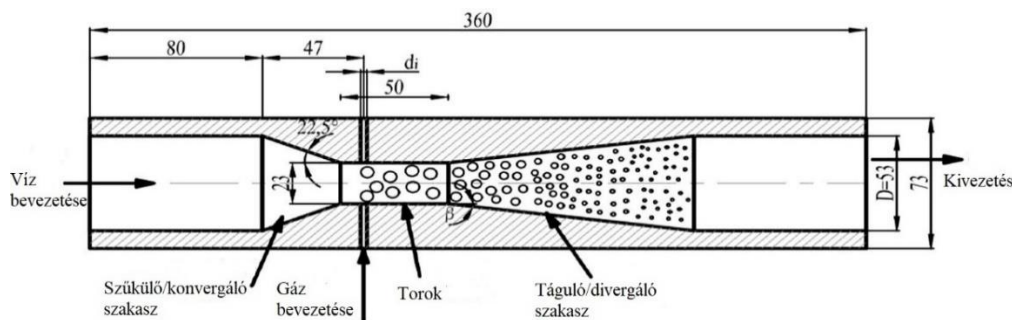
A mikrobuborék előállításának egyik módszere önmagában az ultrahang alkalmazása. A már korábbi fejezetben bemutatott módon az ultrahang alkalmazásával a folyadékban a kavitáció jelensége megy végbe, ami által szintén mikrobuborékok keletkeznek. Az ultrahanggal gerjesztett mikrobuborékok a kavitáció során eredeti méretük több, mint kétszeresére nőhetnek, majd a környező folyadék nagy tehetetlensége miatt összeomlanak (Mondal et al., 2021).

c. Venturi generátor

A Venturi típusú buborékgenerátor széles körben alkalmazható különböző területeken, és teljesítménye nagymértékben függ a geometriai méretétől.

A klasszikus Venturi generátor három fő részből áll: egy konvergáló szakaszból, egy torokból és egy divergáló szakaszból. A berendezés Bernoulli-féle energiamegmaradás elve alapján működik. Amikor a folyadék átáramlik egy Venturi-csővön, a torokban a sebességnövekedés (mozgási energia) a nyomás csökkenésével (nyomási energia) jár együtt, míg az elágazó szakaszban a mozgási energia csökkenésével nyeri vissza a nyomási energia nagy részét (Huang et al., 2020).

Venturi típusú buborékgenerátor nagy előnye az egyszerű szerkezet, a könnyű telepíthetőség, illetve a belső mozgó alkatrészek hiánya (15. ábra). Ezen kívül az alacsony energiafogyasztás teszi gazdaságos alternatívává a gáz-folyadék tömegátvitel fokozására (Terasaka et al., 2011). A Venturi buborékgenerátor képes nagy számsűrűségű, általában 100 μm alatti átlagos átmérőjű mikro- vagy finom buborékok előállítására és az előállított buborékok koncentrációja és mérete a folyadék és a gáz áramlási sebességének működtetésével a tíz mikronoktól a milliméterekig terjedő széles tartományban szabályozható (Kaneko et al., 2013).



15. ábra: Venturi típusú buborékgenerátor sematikus ábrája

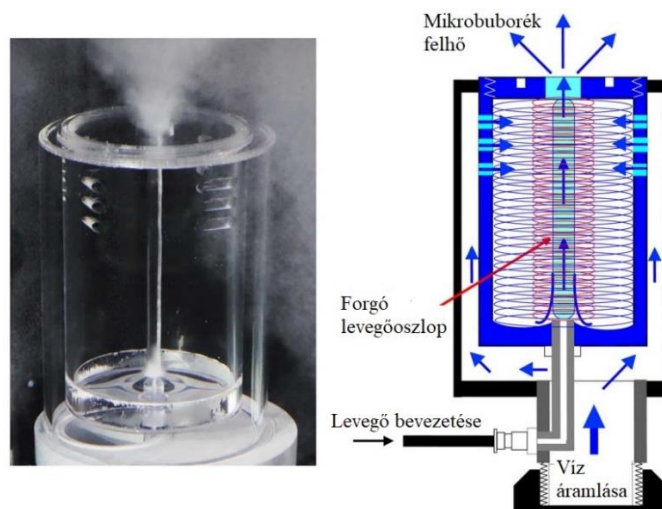
(Li et al., 2017)

d. Örvényáramlás generálása

Az örvényáramlás generálása jól ismert módszer mikrobuborékok előállítására a folyadék örvényei és a turbulencia által történő buborék szétválasztás révén. Ezekben a generátorokban a nagy sebességgel forgó folyadék által kiváltott hidrodinamikai nyírás hatására a makroszkopikus gáz-buborékok először megnyúlnak, majd leválnak, és ennek során mikrobuborék-felhő keletkezik (16. ábra). A forgó áramlást úgy hozzák létre, hogy a folyadékot spirális áramlási csatornákon keresztül szivattyúzzák, vagy érintőlegesen bevezetik egy hengeres keverőkamrába. Ennél a módszernél a gáz- és a folyadék áramlási sebessége kulcsfontosságú. A gáz áramlási sebességének növelése jellemzően növeli a mikrobuborékok méretét, míg a folyadék áramlási sebességének növelése csökkenti azt (Mawarni et al., 2022). Ez a generálási módszer lehetővé teszi az egyszerű kialakítást és a finom buborékok létrehozását, gyakran alacsonyabb költséggel, mint a ultrahangos és dekompresziós módszerek.

A mikrobuborékok előállításával kapcsolatos nehézségek egyik oka a folyamatot szabályozó Laplace-Young-törvény. Ez kimondja, hogy a buborék felületén fellépő nyomáskülönbség fordítottan arányos a buborék görbületi sugarával. Ez azt jelenti, hogy egy adott gázmennyiségből sok kis mikrobuborék (és nem néhány nagy buborék) előállítására fordított energia összességében igen nagy lehet. Ezenkívül a mikrobuborék-termelésre használt tipikus mechanizmusok általában elpazarolják a bemenő energia nagy részét (Tesař, 2014). A kutatók folyamatosan dolgoznak a generátorok tervezésének javításán. A közelmúltban elért előrelépést az új gyártási módszerek, például

az additív gyártás, valamint a mechanikai megértéshez szükséges nagy pontosságú számítógépes szimulációk alkalmazása segítette elő. Kim et al. (2019) például olyan innovatív 3D-nyomtatott konstrukciót fejlesztettek ki, amely spirális csatornákat kombinál az örvénylő áramlás előidézésére és egy axiális irányú központi csövet a sűrített levegő bevezetésére.



16. ábra: Mikrobuborék előállítására szolgáló, örvényáramlás elvén működő generátor
(<http://ecobubble.jp> alapján)

A növekvő környezetvédelmi aggályok és korlátozások közepette az elmúlt évtizedekben intenzíven vizsgálták a mikrobuborékokban, mint a víztisztítás és szennyvíztisztítás ígéretes technológiájában rejlő lehetőségeket. A mikrobuborékok a nagy belső nyomásuk által vezérelt gyors gázoldódási sebesség miatt zsugorodnak és összeesnek a környező folyadékban. Az összeomlás következtében erőteljes lökeshullámokat és nagy sebességű folyadéksugarakat hoznak létre, amelyek felhasználhatók akár a különböző szennyező anyagok eltávolítására is (pl. élelmiszer-feldolgozó felületekről és berendezésekről). Hagyományosan a feldolgozó berendezések tisztításához és az élelmiszerfelületek fertőtlenítéséhez vegyi tisztítószerket és bőséges mennyiségű vizet kell használni a vegyszerek leöblítéséhez. A mikrobuborékok használatával csökkenthető vagy kiküszöbölhető ezeknek a vegyszereknek a szükségessége és a vízfelhasználás is (Lu et al., 2023). A mikrobuborékok összeomlása elősegíti a nagy reakcióképeségű kémiai fajok, például hidroxilgyökök képződését is. A nagy mennyiségű szabad gyökök képesek lebontani a szerves vegyi anyagokat és elpusztítani a mikroorganizmusokat (Cox and St, 1995). Így a mikrobuborék és az ultrahang-technológia kombinációja szinergikus hatásokat eredményez, és hatékony megközelítést biztosít a szennyvízkezelés, valamint a mosás és tisztítás számára.

A létrejövő hidroxilgyökök hatékonyan megbonthatják a biofilmeket, és segíthetnek eltávolítani a peszticid- és szennyezőanyag-maradványokat is a gyümölcsökből, zöldségekből és más élelmiszerekből. Sikeresen alkalmazták a mikrobuborékokat például bazsalikom és menta levelek felületéről történő, élelmiszereredetű kórokozók mosás során történő eltávolítására is (Klintham et al., 2018). A mikrobuborékoknak számtalan más élelmiszeripari alkalmazása is van. Például nagy kollektív felületük és gyors oldódási sebességük miatt hatékony hordozói a gázfertőtlenítőknek (pl. ózon) vagy oxigénnek (Li et al., 2023). Az élelmiszer-mátrixba juttatva javíthatják az élelmiszer-alapanyagok, például a fehérjék funkcionális tulajdonságait. Ha pedig megfelelő stabilizáló héjjal látják el őket, a mikrobuborékok felhasználhatók a zsír krémes szájérzetének utánzására a diétás élelmiszerekben is.

Az ultrahang által kiváltott akusztikus kavitáció hatása ismert a hús pácolása során, de az ultrahang és a pluszban hozzáadott mikrobuborékok együttes hatásáról még nem áll rendelkezésre információ.

4. ANYAG ÉS MÓDSZER

4.1. A kísérletek és mérések helyszíne

A laboratóriumi kísérleteket és méréseket a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet, Állattermék és Élelmiszertartósítási Technológia Tanszékén végeztem. A kutatási munkám során kisüzemi, pilot méretű kísérlet kivitelezésére is sor került, ami a Funkció Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., Darnózselin található húsüzemében valósult meg (9232 Darnózseli, Fő út 94.). Itt került kialakításra a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácoló berendezés, amelyet a laboratóriumi mérések eredményei alapján terveztünk meg. A pácolást követően a termékek füstölésére és érlelésére is ezen a helyszínen került sor.

4.2. A kísérleti alapanyag

A laboratóriumi kísérleteimben bőr és csont nélküli sertéskarajt (m. *Longissimus dorsi*, pH $5,82 \pm 0,05$) használtam, amit a SPAR Magyarország Kereskedelmi Kft. Bicskei húsüzeméből (2060 Bicske, SPAR út 0326/1.) napi friss bontásból szereztem be.

A kisüzemi, pilot méretű kísérletben csont nélküli, bőrös sertéskarajt (m. *Longissimus dorsi*, pH $5,58 \pm 0,06$) használtam, amelyet a Funkció Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. (Darnó-Hús, 9232 Darnózseli, Fő út 94.) biztosított.

4.3. A pácolási kísérletek ismertetése

Kutatási munkám során laboratóriumi méretben száraz pácolás, nedves pácolás, ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérleteket végeztem el. A laboratóriumi kísérletek eredményei alapján kisüzemi, pilot méretű nedves pácolási és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérletet is végeztem. Ezek kivitelezését az alábbiakban részletezem.

4.3.1. Mintaelőkészítés a laboratóriumi pácolási kísérletek elvégzéséhez

A sertéskaraj alapanyagot 80 mm hosszúságú darabokra vágtam és 30 percig kéregfagyasztottam Normann NorTech (Normann Srl., Fontanafredda (PN), Olaszország) gyorsfagyasztó berendezésben az alaktartás biztosítása céljából. Ezt követően a darabokból az izomrostokkal párhuzamos irányban, dugófűrő segítségével 15 mm átmérőjű húshengereket fűrtam ki, amelyek méretei $d_{\text{átlag}}=14,8 \pm 0,8$ mm, $h_{\text{átlag}}=81,2 \pm 1,8$ mm és $m_{\text{átlag}}=13,3 \pm 0,8$ g voltak. A laboratóriumi pácolásokat 15, 30, 60, 90, 120, 150 és 180 perc időtartamokban végeztem. Ezekben az időpontokban mindegyik pácolás esetén három darab húshengeren végeztem vizsgálatokat.

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. Az előzőekben bemutatott módon készített húshengereket a 2. táblázat szerint osztottam el a pácolási kísérletek között.

2. táblázat: A laboratóriumi pácolási kísérletek, pácolási időtartamok és a felhasznált húshengerek száma

Pácolás módja		Pácolás időtartama (perc)						Húshenger összesen (db)	
		15	30	60	90	120	150		180
I. kísérlet	Száraz sózás	3	3	3	3	3	3	3	21
	Nedves pácolás	3	3	3	3	3	3	3	21
	Ultrahanggal kombinált nedves pácolás	3	3	3	3	3	3	3	21
II. kísérlet	Nedves pácolás	3	3	3	3	3	3	3	21
	Ultrahanggal kombinált nedves pácolás	3	3	3	3	3	3	3	21
	Mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás	3	3	3	3	3	3	3	21
									126

4.3.2. A száraz sózás, nedves pácolás és ultrahanggal kombinált nedves pácolási kísérletek kivitelezése (I. kísérlet)

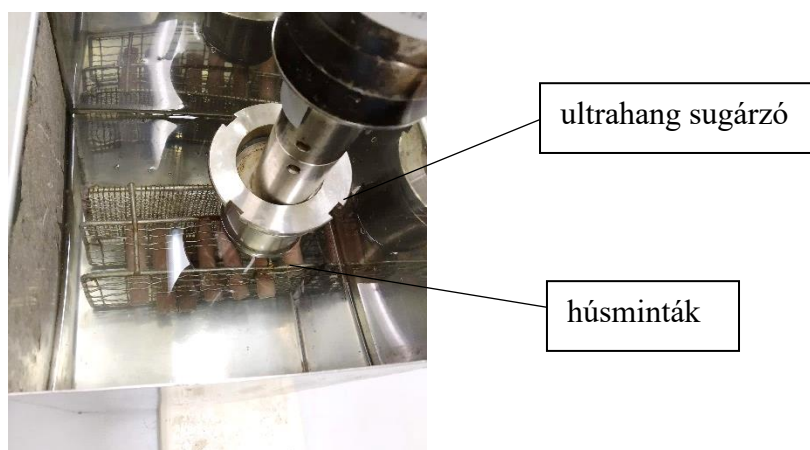
A pácolási kísérletekben Gustosal nitrites pácst (NaCl tartalom 99,55%, NaNO₂ tartalom 0,45%) használtam (Nitrites pácst 1000gr. - Böllérbolt webáruház, n.d.)

A száraz pácolás során a húshengereket nitrites pácstóval fedtem be úgy, hogy a húshengereket sóágyra fektettem, majd a felületüket is nitrites pácstóval borítottam be 1:10 hús-só tömegarányal. Mivel a húsfelületre juttatott nitrites pácstó a hús felületi nedvességtartalmában feloldódva telített sóoldatot (26,3 m/m%) képez, így a nedves pácoláshoz és az ultrahanggal kombinált nedves pácoláshoz telített sóoldatot (358,6 g/L) készítettem, amelynél figyelembe vettem a felhasznált nitrites pácstó NaCl tartalmát.

A nedves pácolást rozsdamentes fém edényben, a páclé direkt kevertetése nélkül végeztem, 1:25 hús-páclé aránnyal. A pácolás során a húshengereket kémcsőtartó állványba helyezve merítettem a páclébe, hogy megakadályozzam a páclé és hús közötti sűrűségkülönbségből adódó felúszásukat továbbá, hogy a lehető legnagyobb felületet biztosítsam a húshengereknek a páclével való érintkezéshez.

Az ultrahanggal kombinált nedves pácolást rozsdamentes fém edényben végeztem, 20 kHz frekvenciájú, 100 W teljesítményű Active Ultrasound Laboratory ultrahangos kezelőberendezéssel (Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország), 5,09 W/cm² intenzitással és 1:25 hús-

páclé aránnyal. A húshengereket ez esetben is kémcsőtartó állványba helyezve merítettem a páclébe. A húshengereket az ultrahang sugárzó alatt olyan módon helyeztem el, hogy ne érintkezzen a sugárzóval, és a sugárzott ultrahang lehetőség szerint merőleges legyen a húrostokra (17. ábra). Az ultrahanggal kombinált nedves pácolást is a páclé direkt kevertetése nélkül végeztem. Az ultrahangos pácolás esetében a húshengerek mintavételezését véletlenszerűen végeztem, hogy minimalizáljam a besugárzott energia esetleges egyenlőtlen eloszlásának hatását.



17. ábra: A húshengerek és az ultrahang sugárzó elhelyezése az ultrahanggal kombinált nedves pácolás során

Az I. kísérletben végzett száraz pácolást, nedves pácolást és ultrahanggal kombinált nedves pácolást 8 °C hőmérsékletű hűtött térben végeztem.

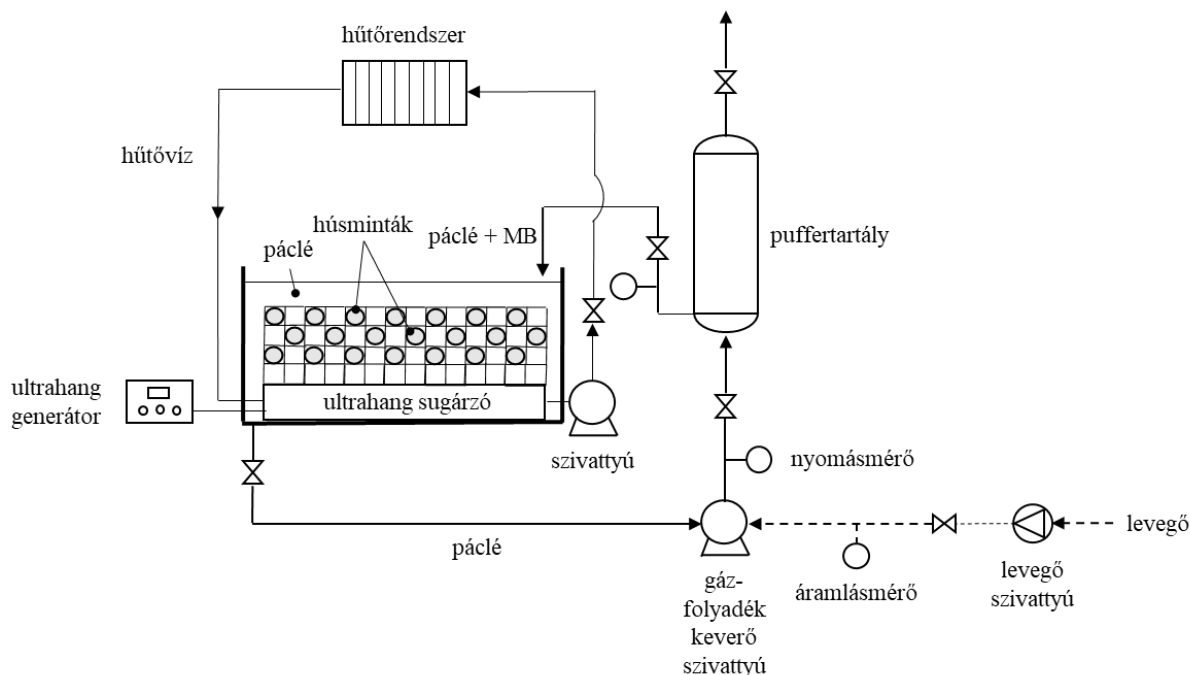
4.3.3. A nedves pácolás, ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérletek kivitelezése (II. kísérlet)

A laboratóriumi kísérletek II. körét – igazodva az iparban használt páclé sókoncentrációhoz – 20 m/m% sókoncentrációjú páclében végeztem (251,2 g/L), amit Gustosal nitrites pácso (Nitrites pácso 1000gr. - Böllérbolt webáruház, n.d.) felhasználásával készítettem, figyelembe véve a pácso NaCl és NaNO₂ tartalmát.

A nedves pácolást és az ultrahanggal kombinált nedves pácolást a 4.3.2. fejezetben ismertetett módon végeztem.

A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás technikai kivitelezésének vázlata a 18. ábra látható. A 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 mikrobuborékok létrehozásának eredményeként a páclé áttetsző, víztiszta színe tejszerű fehérré változott. A páclében direkt keverést nem alkalmaztam, de a gáz-folyadék keverő szivattyú a páclé kismértékű keveredését eredményezte.



18. ábra: Mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácoló rendszer felépítésének vázlat (MB - mikrobuborék)

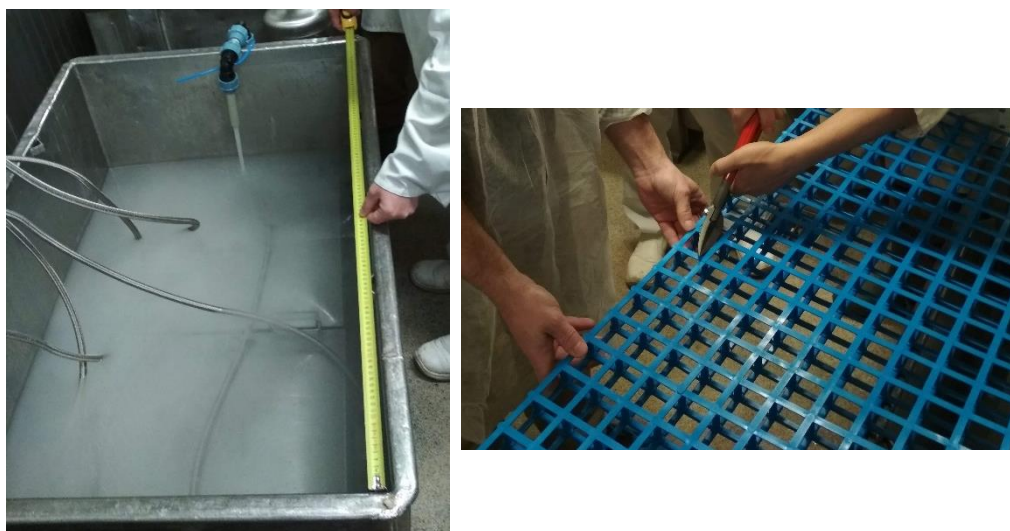
A pácolás során a húshengereket kémcsőtartó állványba helyezve merítettem a páclébe olyan módon, hogy az állványt a pácoló edény alján elhelyezett ultrahang sugárzóra (20 kHz, 400 W, 14,14 W/cm², Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország) helyeztem. A pácolást 1:500 hús-páclé aránnyal, 8 °C-on végeztem, amelyet a rendszerbe épített hűtőrendszer biztosított (18. ábra). A húshengerek mintavételezését ez esetben is véletlenszerűen végeztem, hogy minimalizáljam a besugárzott energia esetleges egyenlőtlen eloszlásából eredő hatást.

4.3.4. Mintaelőkészítés a kisüzemi, pilot méretű pácolási kísérlet elvégzéséhez

A kisüzemi, pilot méretű mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolási kísérlet elvégzéséhez csont nélküli, bőrös sertéskarajt (m. *Longissimus dorsi*) használtam, amelyeket a Funkció Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. (Darnó-Hús, 9232 Darnózseli, Fő út 94.) húsüzemében, a normál napi sertés darabolás során, gyártási célra dolgoztak ki. A pácolás megkezdése előtt az alapanyagok bőrös felületébe lézer gravírozó segítségével mintaszámot gravíroztak a későbbi azonosítás érdekében.

4.3.5. Kisüzemi, pilot méretű pácolási kísérlet kivitelezése (III. kísérlet)

A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kísérleti pácoló berendezés 2 db egyenként 35 kHz frekvenciájú, 1 kW teljesítményű ultrahang lapsugárzóból, 2 db ultrahang generátorból (Ultrasonotech Team, Mosonmagyaróvár, Magyarország), a sugárzók hűtését biztosító hűtőrendszerből, a mikrobuborékok előállítására szolgáló gáz-folyadék szivattyúból (Típus: YL8022, Model: 25GO-2SS, 1.1 kW, Guangzhou Ozone Environmental Technology Co. GZ, Kína) és puffer tartályból, a szabályozáshoz szükséges hőmérsékletmérő szenzorokból és vezérlőpanelből áll. Az ultrahang sugárzók rozsdamentes, fém pácolókád alján kerültek elhelyezésre. 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 (19. ábra) helyeztem. A legfelső alapanyag sor tetejére fém leszorító rácsot helyeztem az alapanyag felúszásának elkerülésére. Az alapanyagok elhelyezését követően a pácolókádat (19. ábra) Gustosal nitrites pácsóból készített 20 m/m% páclével (251,2 g/L) töltöttem fel úgy, hogy az alapanyagot a páclé teljesen ellepje.



19. ábra: A kísérlethez használt pácolókád és a húsminták közé elhelyezett távtartó rács

Ezt követően 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 pácolóhelyiségben végeztem, 1:12 hús-páclé tömegarányal. 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 mikrobuborékoltatás és ultrahang besugárzás nélkül, nedves pácolással készített termék szolgált, amelynél az alapanyag jelölése, pácolókádban való elhelyezése, a páclé sókoncentrációja, a hőmérsékletviszonyok megegyeznek a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolásnál ismertetekkel. A méréseimet a 3., 5., 8., 11., 17., 24., 32. és 38. napokon végeztem, mindegyik alkalommal 3 db húst vizsgálva.

4.4. Mérési és számítási módszerek

4.4.1. Sótartalom meghatározása

A húsminták sótartalmát (*C*) Mohr-féle argentometriás módszerrel (AOAC, 1990) határoztam meg. A méréshez a húsmintákat felaprítottam, majd ezekből $5,0 \pm 0,5$ g tömeget mértem be 100 ml-es Stift lombikokba. A bemérést követően a lombikokat félig feltöltöttem desztillált vízzel és 30 percre 80°C-os vízfürdőbe helyeztem őket. Ezt követően a lombikokat jeges vízben szobahőmérséklet eléréséig hűtöttem, majd desztillált vízzel jelre töltöttem. A kapott elegyet redős szűrőpapíron leszűrtem a szilárd részek leválasztása céljából. A szűrletből 10 ml mennyiséget titráltam 0,1 M ezüst-nitrát (AgNO_3) mérőoldattal, 3-4 ml kálium-kromát (K_2CrO_4) indikátor jelenlétében. A titrálás során elsőként a kisebb oldhatóságú ezüst-klorid (AgCl) válik ki. Amikor az oldatban lévő összes kloridion kicsapódott, az ezüst-nitrát fölöslegétől vörösbarna ezüst-kromát (Ag_2CrO_4) csapadék válik ki, ami a titrálás végpontját jelzi. A vizsgált minta NaCl tartalma a mérőoldat fogyása alapján a [10] egyenlettel számolható:

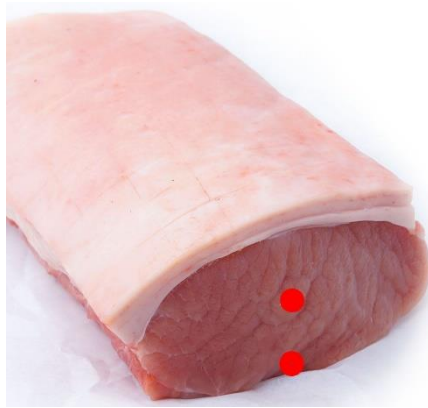
$$C_{NaCl} [\%] = \frac{V_f \times f \times E \times V_{St}}{V_t \times m} \quad [10]$$

Ahol:

- V_f mérőoldat fogyása [ml]
- f mérőoldat faktora
- E sóegyenérték (1 ml 0,1 M AgNO_3 0,00585 g NaCl-nak felel meg)
- V_{St} Stift lombik térfogata [ml]
- V_t titrált mennyiség [ml]
- m bemért hús tömege [g]

A húshengerek sótartalmának meghatározását a hengerek hosszirányát tekintve, középső részéből végeztem (párhuzamos mérések száma, $n=3$). A csont nélküli, bőrös sertéskarajokat a hosszirányuk felénél a húrostokra merőleges irányban kettévágtam és a keresztmetszetük külső

és középső (magközép) részéről vettem mintát a sótartalom meghatározásához (20. ábra). A sótartalmat ezek átlagaként adtam meg (párhuzamos mérések száma, n=3).



20. ábra: Sótartalom meghatározás helyei a csont nélküli, bőrös sertéskarajban (a mintavételi helyeket a piros körök jelzik)

4.4.2. Nedvességtartalom meghatározása

A húsminták nedvességtartalmát (X) 105 °C hőmérsékleten történő, tömegállandóságig végzett szárítással és a [11] egyenlet alapján végzett számítással határoztam meg. A húshengerek esetében a nedvességtartalom meghatározást a hengerek hosszirányát tekintve, középső részéből végeztem (párhuzamos mérések száma, n=3). A bőrös sertéskaraj esetében a nedvességtartalom meghatározás a hús középső részéből történt (párhuzamos mérések száma, n=9).

$$X[\%] = \left(\frac{m_0 - m_t}{m_0} \right) \times 100 \quad [11]$$

Ahol:

m_0 húsminta tömege a szárítás előtt [g]

m_t húsminta tömege a szárítás után [g]

4.4.3. Kiegyenlítődesi só- és nedvességtartalom meghatározása

A húsminták kiegyenlítődesi só- (C_{eq}) és nedvességtartalmának (X_{eq}) meghatározását az I. és II. laboratóriumi kísérletekben mérésrel határoztam meg. Ehhez 3-3 darab húshengert helyeztem 26,3 m/m%-os és 20 m/m%-os páclébe, 1:25 hús-páclé aránnyal. A pácolásokat 36 órán át, 8 °C-os hűtött térben, végeztem. A húshengerek méretének és a pácolás időtartamának tekintetében ez végtelen ideig tartó pácolásnak tekinthető. A csont nélküli, bőrös sertéskaraj kiegyenlítődesi só- és nedvességtartalmát Körmendy (1991) alapján számítással határoztam meg.

4.4.4. Diffúziós és anyagtranszport modellek

A só- és nedvesség diffúziójának és anyagtranszportjának jellemzésére a [12] – [17] modell egyenleteket használtam. A számítások során alapfeltevésem volt, hogy a kísérletben használt hús-mintákban azok geometriai méretei miatt egyirányú (sugárirányú) diffúzió történik, valamint, hogy a pácolások során a páclé sókoncentrációja állandó.

a) Marabi et al., 2003

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - e^{-\left(\frac{tD_s}{l^2}\right)^\beta} \quad [12]$$

Ahol:

- C_t a hús sótartalma t időpontban [g/100g]
- C_0 a hús sótartalma $t=0$ időpontban (kiindulási sótartalom) [g/100g]
- C_∞ a hús kiegyenlítődési sótartalma [g/100g]
- t idő [s]
- D_s sódiffúziós tényező [m^2/s]
- l a felület és mag közötti távolság (sugár, r) [m]
- β Weibull paraméter [dimenziómentes]

b) Abbasi Souraki et al., (2012)

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_s t}{R^2}\right) \quad [13]$$

Ahol:

- C_t a hús sótartalma t időpontban [g/100g]
- C_0 a hús sótartalma $t=0$ időpontban (kiindulási sótartalom) [g/100g]
- C_∞ a hús kiegyenlítődési sótartalma [g/100g]
- D_s sódiffúziós tényező [m^2/s]
- t idő [s]
- R sugár [m]
- μ_n az első típusú, nullarendű Bessel-függvény gyökei ($n=2,4048; 5,5201; 8,6537; 11,7915\dots$)

c) Telis et al., (2003) modell

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{R^2}\right) \quad [14]$$

Ahol:

C_0	a hús sótartalma $t=0$ időpontban (kiindulási sótartalom) [g/100g]
C_t	a hús sótartalma t időpontban [g/100g]
C_∞	a hús kiegyenlítődesi sótartalma [g/100g]
D	diffúziós tényező [m^2/s]
t	idő [s]
R	sugár [m]

d) Peleg (1988) modell

$$SC = SC_0 + \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad [15]$$

Ahol:

SC	a hús sótartalma [g/100 g]
SC_0	a hús sótartalma $t=0$ időpontban [g/100 g]
t	idő
k_{s1}	a hús sófelvételi sebesség állandó
k_{s2}	kapacitás állandó

A k_{s1} lehetővé teszi az egyensúlyi sótartalom (St_{eq}) meghatározását $t \rightarrow \infty$ ideig tartó pácolás esetén

$$St_{eq} = SC_0 + \frac{1}{k_{s2}} \quad [16]$$

Ahol:

St_{eq}	a hús kiegyenlítődesi sótartalma [g/100 g]
SC_0	a hús sótartalma $t=0$ időpontban [g/100 g]
k_{s2}	kapacitás állandó

e) Zugarramurdi és Lupín (1980) modell

$$SC = SC_0 \exp(-k_s t) + SC^\infty (1 - \exp(-k_s t)) \quad [17]$$

Ahol:

SC	a hús sótartalma [g/100 g]
SC_0	a hús sótartalma $t=0$ időpontban [g/100 g]
k_s	a só anyagtranszport állandója

t idő

A [12] – [17] 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 [18].

$$R^2 = \frac{\sum(x_p - \bar{x}_p)^2}{\sum(x_p - x)^2 + \sum(x_p - \bar{x}_p)^2} \quad [18]$$

Ahol:

x_p az x változó predikált értéke

\bar{x}_p az x változó predikált értékének átlaga

4.4.5. Vízkötőképesség meghatározása

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 vízkötő képesség meghatározásához megmértem a húsminták pácolás előtti tömegét ($m_{t,0}$), majd a pácolás utáni tömegét (m_t). Ezek különbségét a pácolás előtti tömeg %-ában kifejezve jellemeztem a vízkötő képességet [19]. A pácléből kivett húshengerek felületéről a páclevet háztartási törlőkendővel távolítottam el a tömegmérés előtt. Párhuzamos mérések száma $n=3$.

$$\text{Vízkötő képesség [\%]} = \frac{m_t - m_{t,0}}{m_{t,0}} \times 100 \quad [19]$$

Ahol:

m_t a pácolás utáni tömeg [g]

$m_{t,0}$ a pácolás előtti tömeg [g]

4.4.6. Fehérjedenaturáció vizsgálata

A fehérjedenaturációj vizsgálatát differenciális pásztázó kalorimetriás (Differential Scanning Calorimetry, DSC) méréssel végeztem SETARAM MicroDSC III (SETARAM Instrumentation Caluire, Franciaország) berendezésben. A fehérjék állapotának feltérképezésére szolgáló mérések

során felvett hőáramgörbék értékelésével információt kaphatunk a fehérjefrakciók csúcshőmérsékletéről, valamint a denaturációhoz szükséges hőmennyiségről, azaz az entalpiáról [J/g]. Ez a csúcsok alatti terület számításával határozható meg. A DSC megfelelő módszer a húsfehérjék denaturációs jelenségeinek nyomon követésére, nagy előnye ugyanis, hogy a vizsgálat natív állapotban történik.

A mérés elvégzéséig a húsmintákat vákuumsomagolva, $-22\dots-24$ °C hőmérsékleten tároltam. A mérés előtt a húshengereket hálózati csapvíz hőmérsékletű vízben engedtettem fel 20 perc alatt. 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, desztillált víz referencia minta ellenében. A mérések során felvett hőáramgörbékről a fő fehérjefrakciók denaturációs csúcshőmérséklet értékeit, valamint lineáris alapvonalra integrálva a fehérjék állapotváltozását jellemző entalpiákat [J/g] $40-80$ °C tartományban értékeltem, amelyeket SETSOFT 2000 v1.6 (SETARAM Instrumentation Caluire, Franciaország) szoftverben határoztam meg.

4.4.7. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

A pásztázó elektronmikroszkópos (Scanning Electron Microscopy, SEM) vizsgálatához a húshengereket hossz tengelyük irányában két részre vágtam. A vágott felületből a rostiránnyal párhuzamosan kb. 5×5 mm szélességű és $0,5$ mm vastagságú húsrészt metszettem ki, amelyet 5 ml $2,5\%$ -os glutáraldehidben 24 órán keresztül 6 °C-on fixáltam. A fixált mintát 10 ml 96% -os etanolban 24 órán keresztül dehidratáltam, majd végül a mintákat fagyasztva szárítottam. Az így előkészített húsminták mikrostruktúráját Thermo Scientific™ Prisma™ E SEM (Waltham, Massachusetts, USA) pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam.

4.4.8. Állománymérés

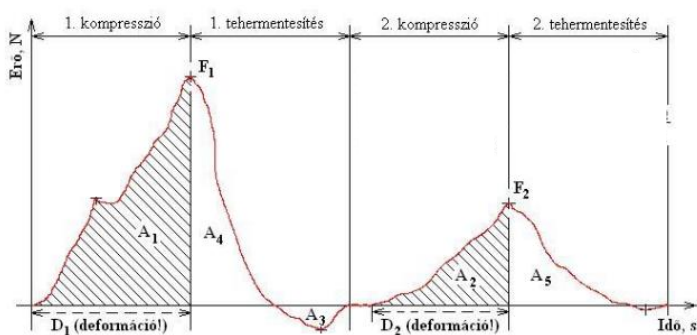
Az állománymérést egy 500 N erőmérő cellával felszerelt SMS TA.XT Plus (Stable Micro Systems Ltd., Egyesült Királyság) berendezéssel végeztem.

A húshengerek állományának jellemzésére állományprofil analízis (Texture Profile Analysis, TPA) mérési módszert használtam. A módszer lényege, hogy a vizsgálandó mintát két egymást követő ciklusban összenyomják. A húshengerek állományát az összenyomások során felvett deformációs görbéről (21. ábra) meghatározott keménységgel (F_1 , [N]) jellemeztem. A mérés során kapott görbéről a következő paraméterek olvashatók le:

- **F₁ - keménység:** az első kompressziós ciklus során mért erő csúcserték a maximális deformációnál

- **F₂ - 2. erő csúcserték:** a második kompressziós ciklus során mért erő csúcserték a maximális deformációnál
- **A₁ – terület:** az első kompressziós ciklus erő-idő görbéje alatti terület a mérés kezdetétől a maximális erő értékig, megfeleltethető az első rágással a mintán végzett kompressziós munkának
- **A₂ – terület:** a második kompressziós ciklus erő-idő görbéje alatti terület a kompresszió kezdetétől a maximális erő értékig, megfeleltethető a második rágással a mintán végzett kompressziós munkának
- **A₃ – adhézió:** első terhelési ciklus után a zérus erő alatti görbe területe, ami megfeleltethető a mérőfejnek a mintáról való leválasztásához szükséges munkának
- **kohézió (A₂/A₁):** a kompressziós ciklusok erőidő görbe alatti területeinek hányadosa
- **rugalmasság:** a második kompresszió során mérhető deformáció (vagy idő), de lehet számítani a második és az első kompressziós ciklus alatt bekövetkezett deformáció hányadosaként is (D₂/D₁)

A mérés előtt a húshengereket szobahőmérsékletre temperáltam. A stabil mintapozíció miatt a húshengereket vízszintesen helyeztem a fej alá, ahol összenyomásuk a vastagságuk, vagyis átmérőjük 50%-áig történt. A mérések során a fej sebessége 2 mm/s volt, az adatrögzítés minden esetben 0,049 N erő értéknél indult. Párhuzamos mérések száma n=3.



21. ábra: Állományprofil analízis (TPA) jelleggörbéje (forrás: Csima, 2015 alapján)

A bőrös karaj minták állományméréséhez 20 × 20 × 100 mm téglatest alakú húst vágtam kis a húsok közepéből, a rostiránnyal párhuzamosan. A minta testeken n=3 párhuzamos mérést végeztem Warner-Bratzler (WB) erőmérő cellával. A cellában egy 60° csúcshögű, fordított V alakú, gömbölyített vágóélű mozgó penge található, ami 138 mm hosszúságú, 76 mm szélességű és 1,3 mm vastagságú. A WB cellát a vágás közben fellépő igénybevétel modellezésére fejlesztették ki (Friedrich, 2008). A vágás közben fellépő ellenállással a minta keménysége jellemezhető.

4.4.9. Vízáktivitás mérése

A vízakktivitás leegyszerűsítve az élelmiszerekben lévő „szabad” víz rendelkezésre állásának mértékét jelenti. Minél kisebb az élelmiszer vízakktivitás, annál védettebbnek tekinthető a mikrobiológiai romlással szemben. A vízakktivitás változásának a szárazsonkafélék esetében (és a szárazáruknál is) kiemelt jelentősége van, mivel ezek eltarthatóságát a lecsökkenő vízakktivitás, illetve a termék sótartalma biztosítja.

A vízakktivitás mérését LabMaster aw (Novasina AG, Svájc) berendezéssel végeztem. A mérést a bőrös karajok hossz- és keresztirányát tekintve középső részéből vett mintákon végeztem. Párhuzamos mérések száma: n=9.

4.4.10. Színmérés

A színmérést Minolta CR 400 (Konica Minolta Inc., Japán) tristimulusos színmérő készülékkel végeztem, D65 fényforrással, 8,0 mm-es nyílásméretű kúppal, a húsfelülethez képest 90°-os konfigurációban. Az adatokat CIELab színingertérben értékeltem, ahol az L* a világosságot, az a* a vörösséget, és b* a sárgaságot jelenti. A színmérést a bőrös karajok hosszirányát tekintve középen elvágva kapott metszészlap középső, 3-4 cm átmérőjű körben végzett mérésekkel végeztem. Párhuzamos mérések száma, n=9.

A nedves pácolású és a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolású bőrös karaj minták közötti színinger különbséget (ΔE^*) az adott mérési napokon mért átlag L*, a* és b* értékekből számoltam a [20] egyenlet alapján.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad [20]$$

A ΔE^* értékéhez rendelt emberi szem számára érzékelhető színekülönbségeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Standard megfigyelő számára érzékelhető színekülönbség (ΔE^*)

(Mokrzycki and Tatol, 2011; Wright, 1981 alapján)

ΔE^*	Vizuálisan érzékelhető színekülönbség
$0 < \Delta E^* < 1$	nem érzékelhető különbség
$1 < \Delta E^* < 2$	tapasztalt megfigyelő számára érzékelhető különbség
$2 < \Delta E^* < 3.5$	standard megfigyelő számára is érzékelhető különbség
$3.5 < \Delta E^* < 5.0$	egyértelmű színekülönbség
$5 < \Delta E^*$	két különböző szín

4.4.11. pH mérés

A pH mérést Testo 206-pH2 (Testo GmBh, Ausztria) szűrőszondás, hőmérséklet-kompenzációval rendelkező, pH-mérővel végeztem. A mérések előtt az eszközt pH 4,0 és pH 7,0 pufferoldatokra kalibráltam. A bőrös karaj pH-jának mérését a színmérésénél bemutatott mérési helyen végeztem.

Párhuzamos mérések száma, $n=9$.

4.4.12. Statisztikai értékelés módszere

A mérési adatok statisztikai értékelését varianciaanalízissel (Analysis of Variance, ANOVA) végeztem IBM SPSS Statistics 23.0 (IBM Corp., USA) programban 95%-os konfidencia intervallummal ($p<0,05$). Az ANOVA elvégzése előtt a szórás homogenitást Levene teszttel ($p<0,05$), a mért/elmezt adatok normál eloszlását pedig Kolmogorov-Smirnov és Shapiro-Wilk teszttel ellenőriztem.

A vízkötő képesség, az állomány, a vízáktivitás és a színmérés eredményeire exponenciális egyenletet [21] illesztettem:

$$y = A \times (1 - \exp(-k \times t^n)) \quad [21]$$

Az A , k és n tényezők értékét a Microsoft Excel 365 Solver bővítményével határoztam meg, úgy, hogy a mért és a számolt értékek közötti négyzetes eltérés összegét (SSE) minimalizáltam.

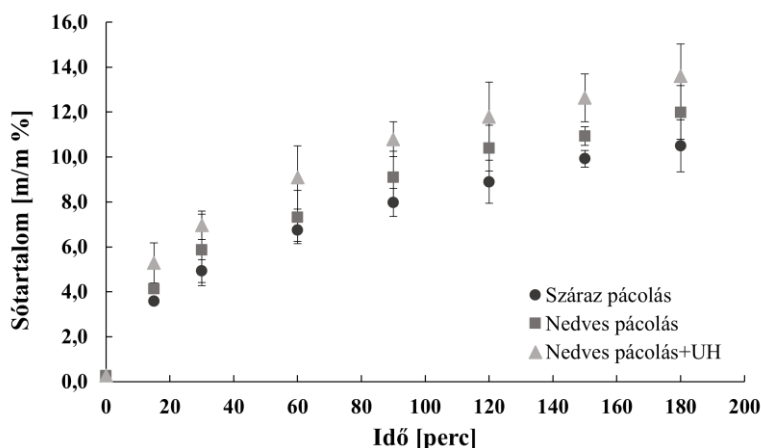
A mérési eredmények grafikus ábrázolását Microsoft Excel 365 (Microsoft Corp., USA) programban végeztem. A diagramokon az adatpontok a mért értékek átlagát, a hibásávok pedig ezek (\pm) szórását mutatják.

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

5.1. A száraz pácolás, nedves pácolás és az ultrahanggal kombinált nedves pácolás kísérletének eredményei

5.1.1. A húsminták sótartalmának változása a pácolások során

A kísérletben sertéskarajból kivágott, henger alakú ($d=15$ mm, $h=80$ mm) húsminták száraz pácolását, nedves pácolását, valamint ultrahanggal kombinált nedves pácolását végeztem sóra nézve telített páclében ($26,3$ m/m%). A húsminták sótartalmának alakulását a 22. ábra mutatja.



22. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm, $h=80$ mm) sótartalmának alakulása a pácolás során

A 22. ábra látható, hogy mindegyik pácolási mód során jelentősen nőtt a sótartalom, mely a hús és a pácoló közeg közötti nagy koncentrációgradienssel magyarázható. Ez a pácsó, illetve a páclé gyors behatolását eredményezi. A nitrit és a nátrium bejutása a hús szerkezetébe nagyon fontos folyamat a pácolási technológiában. A só és a víz transzportjelensége a hús pácolásakor bonyolult, és többek között olyan paramétereiktől függ, mint a sókoncentráció, a hőmérséklet, a pH és a húsrrostok iránya (Gómez et al., 2015). Ideális esetben a só eloszlásának minden irányból egyenletesnek kell lennie, azonban olyan tényezők, mint a hús geometriája és mérete szintén jelentős szerepet játszanak a diffúziós folyamatokban (Chabbouh et al., 2012).

A húsmintáim átlagos kiindulási sótartalma $0,14 \pm 0,11$ m/m% volt, ami már a 15. percre szignifikáns mértékben nőtt ($p < 0,05$) mindegyik pácolási mód esetén. A pácolási idő végére a száraz pácolás esetén ez az érték $10,50 \pm 0,86$ m/m%, nedves pácolás esetén $11,98 \pm 0,70$ m/m%, ultrahangos nedves pácolás esetén pedig $13,60 \pm 0,63$ m/m% lett. A 180 perces pácolás végére az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával 22,8%-kal, és 11,9%-kal magasabb sótartalom érhető

el a száraz-, valamint a nedves pácolásokhoz képest. A száraz- és a nedves pácolás összehasonlításánál az utóbbi alkalmazásával 12,1%-kal magasabb sókoncentrációt kaptam a kísérlet végére. A száraz és az ultrahangos nedves pácolás sótartalom értékei között szignifikáns különbség mutatkozott ($p < 0,05$).

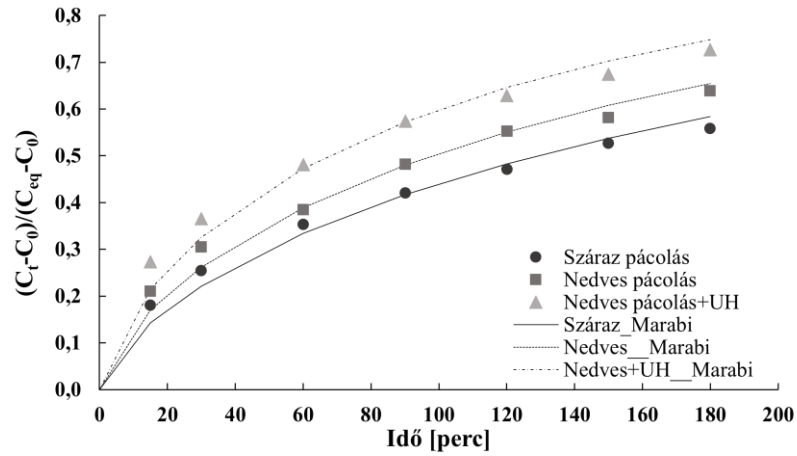
A nedves pácolás nagy előnyének tekinthető, hogy alkalmazásával egyenletesebb sóeloszlás érhető el a terméken belül a száraz pácoláshoz képest. A száraz pácolás esetén a só közvetlenül a termék felületére kerül, mellyel a felszíni sótartalom drasztikusan megnő, eloszlása a termékben azonban lassabban megy végbe (Park and Kim, 2022). Ezt az állítást támasztják alá Jeyasanta et al. (2016) halhúson végzett sózási kísérletének eredménye is, akik azt állapították meg, hogy a száraz pácolás során a só lerakódott a minta felületén, ami egy kemény állományú réteget eredményezett. Ezen a kemény rétegen keresztül lassabban képes behatolni a só a hús belsőbb rétegeibe. A száraz és nedves pácolást összehasonlítva utóbbi esetében egyenletesebb sóeloszlású terméket kaptak.

Az ultrahang alkalmazásának következtében kialakuló kavitáció úgynevezett „szivacs-hatást” idéz(het) elő, mely során a sejtfalakban kialakuló mikrocatornáknak köszönhetően a diffúziós folyamatok sebessége nő a pácolási folyamatok során (Guo et al., 2024). Időegység alatt tehát több só képes bejutni a húsminták belső rétegeibe. Ez az elvi magyarázata, hogy az ultrahanggal pácolt húsminták esetén az egész kísérlet alatt magasabb sókoncentráció értékeket mértem mind a száraz, mind a nedves pácolással készített mintákhoz képest. Az ultrahang sódiffúziót gyorsító hatását már 15 perces kezelés követően is tapasztaltam. Hasonló eredményről számoltak be Ojha et al. (2016), akik hagyományos és ultrahangos (20 kHz, 120 perc, 4°C) pácolást hasonlítottak össze, mely során a kísérlet első 30 percében 54,9 W/cm² intenzitású ultrahangos pácolás esetében jelentős sótartalom növekedést tapasztaltak a hagyományos pácoláshoz képest. Alacsonyabb (9 W/cm²) intenzitás mellett ez a különbség nem volt megfigyelhető.

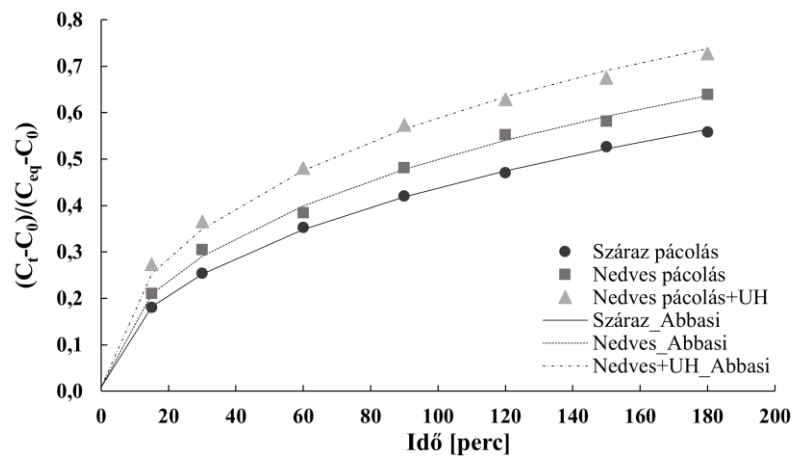
5.1.2. A sódiffúziós tényezők (D_s) eredményei

A diffúzió a legfontosabb anyagtranszport folyamat a pácolás során, ezért a só diffúziós tényezőjének meghatározásához a kísérletem során mért sótartalom értékekre a 4.4.4 fejezetben bemutatott diffúziós modelleket illesztettem.

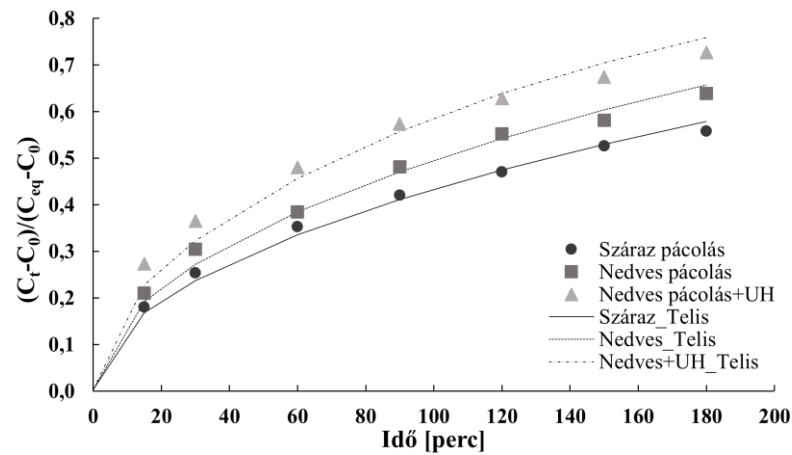
A 23. ábra a különböző módon pácolt húsminták relatív sómennyiségeire illesztett diffúziós modelleket mutatja. A diffúziós modelleket általában az élelmiszerekben történő tömegátadás leírására alkalmazzák. A diffúziós modellekkal lehetőségünk van előre jelezni a hús sótartalmának alakulását, ezáltal a pácolás várható időtartamát.



a



b



c

23. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) relatív sómennyiség $((C_t-C_0)/(C_{eq}-C_0))$ változásaira illesztett diffúziós modellek.

a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

A modell és a mért értékek közötti kapcsolat „szorosságának” megállapítására az R^2 , vagyis a determinációs együttható értékeit használtam. A kapott diffúziós tényező (D_S) és R^2 értékeket a

4. táblázatban foglaltam össze. A modellek és a mért értékek között mindhárom modell esetében szoros illeszkedést tapasztaltam ($R^2=0,9859 - 0,9994$). A legszorosabb illeszkedést az Abbasi modell mutatta, ezért a diffúziós tényezőket ennek a modellnek az alkalmazásával értékelem.

4. táblázat Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18$ mm, $h=80$ mm) számított só diffúziós együttható (D_s) és a determinációs együttható (R^2) értékei

		Száraz pácolás	Nedves pácolás	Nedves pácolás+UH
$D_s \times 10^{-10}$ (m ² /s)	Marabi	4,54	5,98	8,67
	Abbasi	4,37	5,91	8,76
	Telis	3,46	4,54	6,4
R^2	Marabi	0,9871	0,9881	0,9864
	Abbasi	0,9994	0,9976	0,9970
	Telis	0,9952	0,9930	0,9859

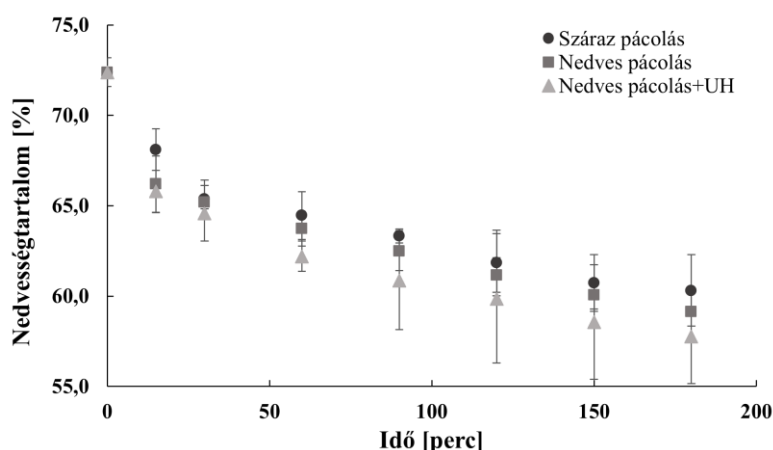
Az ultrahangos nedves pácolás során a diffúziós tényező $D_s=8,76 \times 10^{-10}$ m²/s értéket mutatott, ami száraz pácoláshoz ($D_s=4,37 \times 10^{-10}$ m²/s) képest kétszer, a nedves pácoláshoz ($D_s=5,91 \times 10^{-10}$ m²/s) képest pedig kb. 1,5-szer gyorsabb sódiffúziót jelent. Az ultrahang és a különböző sókoncentráció hatását vizsgálta Ozuna et al. (2013) a sertéskaraj pácolása során. Kísérletükben 50×30×10 mm-es, fagyasztott karajmintákat pácoltak ultrahang (40 kHz) alkalmazásával és ultrahang nélkül 50-280 kg NaCl/m³ sókoncentrációjú páclében 120 percig, és azt a megállapítást tették, hogy mind a sókoncentráció növelése, mind az ultrahang alkalmazása növeli a húsban a sódiffúziót. Eredményeik alapján az ultrahang alkalmazásával 23-45%-kal növelhető a só diffúziója. Az ultrahang sódiffúziót növelő hatásáról számolt be Siró et al. (2009) sertéshús és Carlos et al. (2007) paprika pácolása során. Tehát az általam meghatározott 1,5-szer nagyobb sódiffúziós tényező értékét alátámasztják a szakirodalmi eredmények is.

A nedves pácolás során 1,3-szer nagyobb sódiffúzió értéket kaptam a száraz pácolással összehasonlítva. A nedves pácolással tehát 26,1%-kal növelhető a sódiffúzió a száraz pácoláshoz képest. A különböző pácolások esetén a diffúzió sebessége közötti különbség azzal magyarázható, hogy a száraz pácolás során bizonyos időre van szükség ahhoz, hogy a sókristályok a hús felületi nedvességtartalmában feloldódjanak és húsba való bevándorlásuk csak ezt követően indul meg. A nedves pácolás során a só oldott formában van jelen, így a diffúzió a páclével való érintkezés pillanatában megkezdődhet. A pácolási módok diffúziós együtthatói között látható különbség a sónak a hús mikroszerkezetére gyakorolt hatásának is tulajdonítható. A szövetek mikroszerkezetének megváltoztatása, az izomrostok duzzadása a diffundáló oldott anyag koncentrációjától függő

diffúziós együtthatóhoz vezet. A nagyobb sótartalom nagyobb diffúziós együttható értékeket eredményez (Pinotti et al., 2002), amit mérési eredményeim is alátámasztanak.

5.1.3. A húsminták nedvességtartalmának változása a pácolások során

A különböző módon pácolt húsminták nedvességtartalmának változása a 24. ábra látható. Megfigyelhető, hogy az idő előrehaladtával a nedvességtartalom csökkenő tendenciát mutatott.

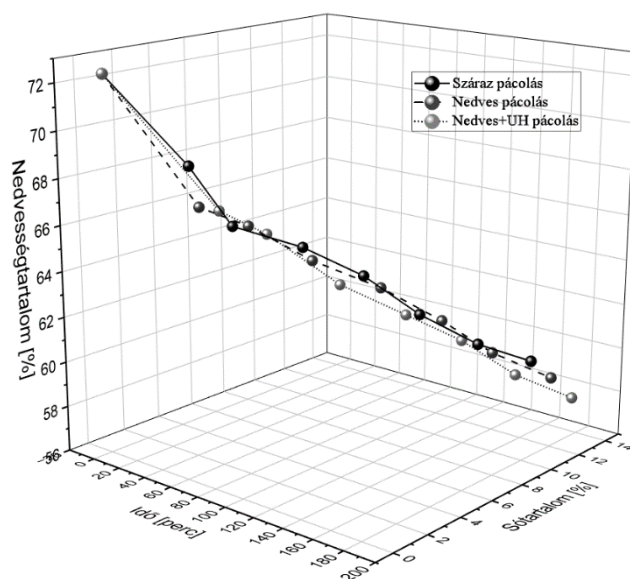


24. ábra: Száras pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) nedvességtartalmának alakulása a pácolás során

A húsminták kiindulási nedvességtartalma $72,4 \pm 0,80\%$ volt, ami a kísérlet végére (180 perc) szignifikánsan csökkent ($p < 0,001$) mindegyik pácolási mód esetén. A legnagyobb mértékű csökkenés az ultrahangos pácolással készített minták esetén volt tapasztalható. A kísérlet végére ezeknek a mintáknak a nedvességtartalma ($57,7 \pm 2,58\%$) kisebb lett, mint a nedves pácolással ($59,1 \pm 0,15\%$), valamint a száraz sózással készített ($60,3 \pm 1,97\%$) mintáké, köztük a különbség azonban nem szignifikáns ($p > 0,05$). A száraz és a nedves pácolású húsmintáknál az összes eltávozott nedvesség több mint fele a pácolás első 30 percében távozott. Az ultrahanggal kiegészítve pácolt minták nedvességtartalma 30 perc után is nagyobb mértékben csökkent. Ennek oka lehet, hogy a hús pácolása telített sóoldatban ($26,3\text{ m/m}\%$) történt, és a hús és a sóoldat közötti nagy koncentráció különbség miatt a páclé ozmotikus „húzóereje” nagyobb, mint a só hús irányába mutató diffúziója. Hasonló eredmény látható Schmidt et al. (2008) tanulmányában, akik 5-25% sókoncentrációjú páclében kezelt csirkemellet nedvességtartalmának és sótartalmának változását vizsgálták. Eredményeikből az látható, hogy 10% páclé koncentrációig a húsminták nedvességtartalma nőtt, vagyis páclévet (nedvességet) vettek fel, azonban 15% és 20%-os páclé koncentráció esetén a nedvesség csökkenését tapasztalták. Ozuna et al. (2013) sertéskaraj pácolása során szintén azt figyelték meg, hogy 24%-os páclé alkalmazásával a minták dehidratálódtak, azonban kisebb páclé koncentráció

(15 és 20%) esetén a húsminták nedvességtartalma nem változott. Tehát eredményeim és Ozuna et al. (2013) eredményei között hasonló összefüggés állapítható meg a nedvességtartalom csökkenése tekintetében.

A húsminták só- és nedvességtartalmát együtt vizsgálva (25. ábra) megállapítható, hogy a só tartalom növekedésével a nedvességtartalom csökken. Az ultrahangos nedves pácolás esetén az figyelhető meg, hogy az anyagtranszport folyamatok egyensúlyban vannak, a sódiffúziós és az ozmózis útján történő vízleadás egyidőben megy végbe. Ezzel szemben a száraz pácolásnál kissé mértékű hullámlás tapasztalható az értékekben, ami feltételezhetően annak köszönhető, hogy a só csak a felületi nedvességtartalomban való feloldódása után jut be a hús belsejébe, így a nedvesség távozása sem teljesen egyenletes.

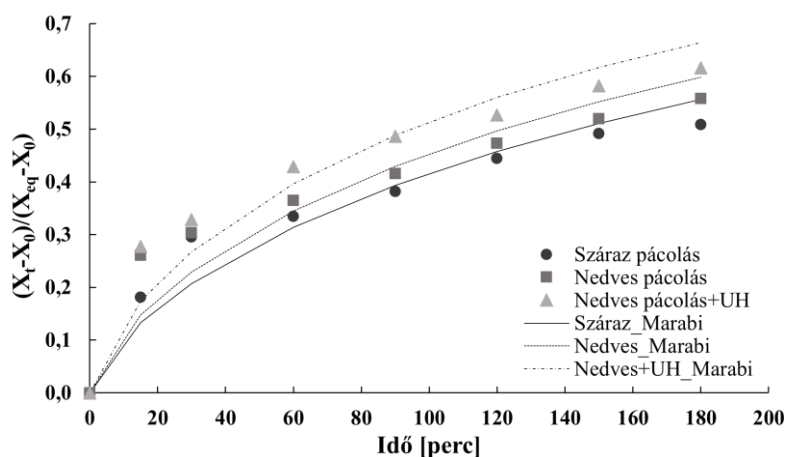


25. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) só – és nedvességtartalmának alakulása a pácolás során

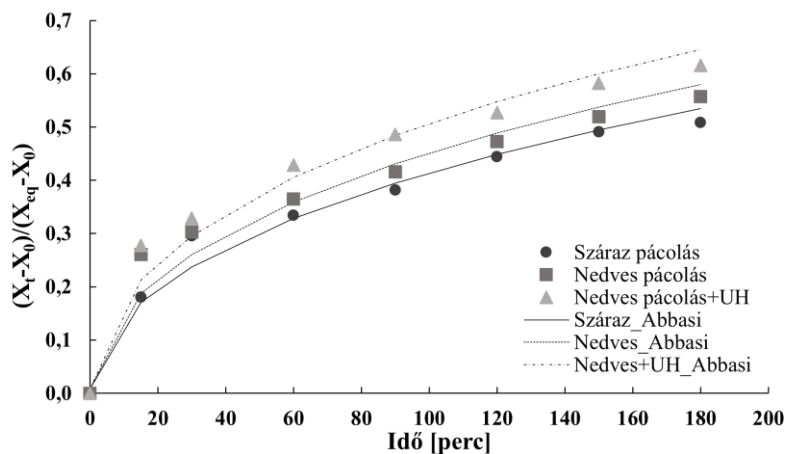
5.1.4. A vízdifúziós tényezők (D_v) eredményei

A só diffúziója mellett a pácolási folyamat során ozmózis útján szabad víz távozik a termékből, ami a hús vízaktivitásának (a_w) csökkenését is okozza (Sanches et al., 2021). A víz diffúziós együtthatójának vizsgálata, a húsfehérjék és a sóoldat kölcsönhatása révén segít leírni többek között a hús szerkezetének változását, valamint a sejtmembránok permeabilitását a pácolás során. Ezt figyelembe véve fontos a víz diffúziójának vizsgálata is. Ebben az esetben az alkalmazott modelleket a mért relatív nedvességtartalom értékekre illeszttem (26. ábra). A víz diffúziójánál $R^2=0,9329 - 0,9807$ értékeket kaptam. A legjobb illeszkedést a sódiffúzióhoz hasonlóan az Abbasi

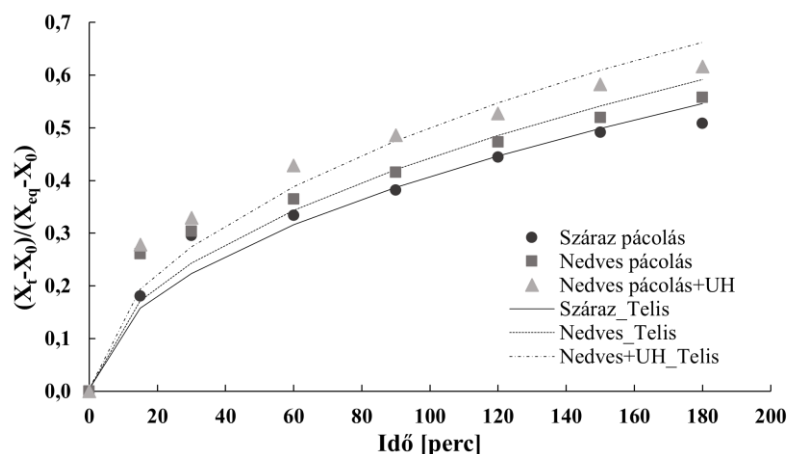
modell mutatta (5. táblázat), a víz diffúziós együtthatókat ennek a modellnek a felhasználásával értékelem.



a



b



c

26. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) relatív nedvességtartalom $((X_t - X_0) / (X_{eq} - X_0))$ változásaira illesztett diffúziós modellek

a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

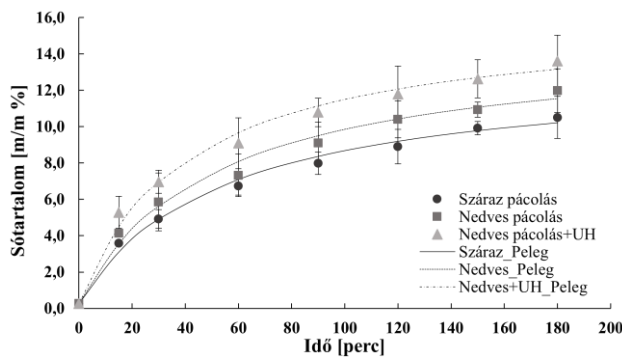
5. táblázat: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18$ mm, $h=80$ mm) számított víz diffúziós együttható (D_v) és a determinációs együttható (R^2) értékei

		Száraz pácolás	Nedves pácolás	Nedves pácolás+UH
$D_v \times 10^{-10}$ (m ² /s)	Marabi	4,07	4,81	6,20
	Abbasi	3,84	4,67	6,11
	Telis	3,06	3,62	4,62
R^2	Marabi	0,9517	0,9329	0,9495
	Abbasi	0,9807	0,9684	0,9777
	Telis	0,9693	0,9528	0,9594

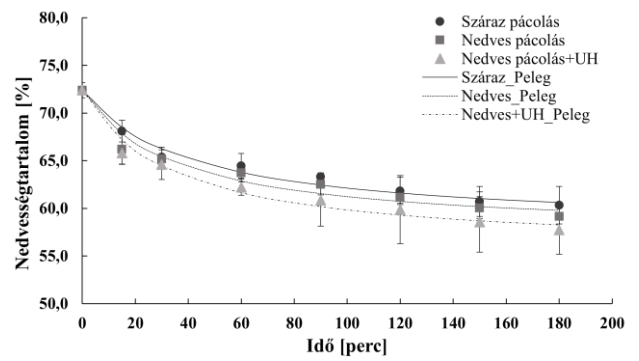
A só diffúziós eredményeimhez hasonlóan a víz diffúziójánál is a legnagyobb értéket az ultrahangos nedves pácolás esetén kaptam. Ennél a pácolási módnál a víz diffúziója ($D_v=6,11 \times 10^{-10}$ m²/s) 1,3-szer gyorsabbnak bizonyult a nedves pácoláshoz ($D_v=4,67 \times 10^{-10}$ m²/s), 1,6-szer gyorsabbnak a száraz pácoláshoz ($D_v=3,84 \times 10^{-10}$ m²/s) képest. Ez 23,6%-kal és 37,2%-kal gyorsabb vízdifúziót jelent. Az ultrahangos kezelés diffúziót gyorsító hatása a vízdifúzió esetében is látható.

5.1.5. Az anyagtranszport modellek eredményei

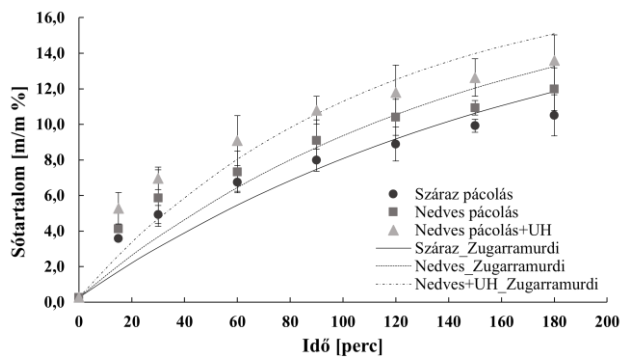
A pácolás során végbemenő tömegátadási folyamatok leírására, valamint a só/víz diffúziós együtthatók megállapítására dolgozatomban diffúziós modelleket használtam. Vannak azonban az anyagok transzportfolyamatát leíró empirikus modellek is, amelyek előnye, hogy geometriai korlátozások nélkül használhatók. Ezen kívül nincs szükség bonyolult matematikai algoritmusokra, ami a folyamat meglehetősen jó leírása mellett lerövidíti a számítási időt. A húskok sózásának és pácolásának leírására használt empirikus modellek közül kiemelendő Peleg, valamint Zugarramurdi és Lupín modellje (Zugarramurdi and Lupín, 1980). Ezeknek az empirikus modelleknek a mért só- és nedvességtartalom értékekre illesztését mutatják a 27. ábra valamint a modell paramétereit a 6. táblázat.



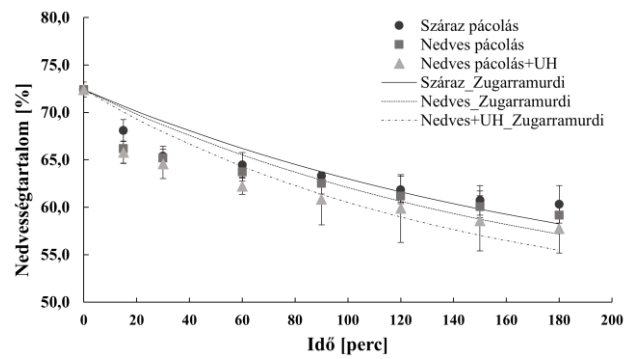
27. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) sótartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



28. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) nedvességtartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



29. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) sótartalmának változása és Zugarramurdi és Lupín modell illesztése a mért adatokra



30. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) nedvességtartalmának változása és Zugarramurdi és Lupín modell illesztése a mért adatokra

6. táblázat: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) sótartalom és nedvességtartalom értékeire illesztett Peleg, és Zugarramurdi és Lupin modellek számított paramétereit (k_s , k_v , St_{eq} , Nt_{eq}) és a determinációs együttható (R^2) értékek

Modell	Paraméter	Száraz sózás	Nedves pácolás	Nedves pácolás + UH
Peleg	k_{s1}	4,134	3,535	2,597
	k_{s2}	0,078	0,069	0,063
	St_{eq} [%]	13,169	14,759	16,114
	R^2	0,9921	0,9883	0,9909
	k_{v1}	2,817	2,314	2,002
	k_{v2}	0,069	0,066	0,060
	Nt_{eq} [%]	57,943	57,333	55,643
	R^2	0,9807	0,9614	0,9720
Zugarramurdi	k_s	$5,56 \times 10^{-3}$	$6,85 \times 10^{-3}$	$9,18 \times 10^{-3}$
	R^2	0,9199	0,9262	0,9216
	k_v	$5,04 \times 10^{-3}$	$5,69 \times 10^{-3}$	$6,93 \times 10^{-3}$
	R^2	0,8691	0,8481	0,8659

A Peleg-modell a kétparaméteres empirikus modellek közé tartozik, amelyet a dehidratáció sebességének, valamint a víz és az oldható szilárd anyagok egyensúlyi koncentrációjának előrejelzésére használnak számos élelmiszerben (Assis et al., 2017). Kísérletemben a modell alkalmazásával a sótartalom eredményeknél az $R^2=0,9883-0,9921$, a nedvességtartalom során mért eredményeknél $R^2=0,9614-0,9807$ értékeket kaptam, mely alapján elmondható, hogy a modell jó illeszkedést mutatott a mért adatokra. Ennél a modellnél két számolt paraméter szolgáltat számunkra információt, melyek a sebességi állandók (k_{s1} , k_{v1}), valamint a kapacitás állandók (k_{s2} , k_{v2}). A kisebb k_1 érték a nedvességtartalom csökkenés és a sófelvétel gyorsabb kezdeti sebességét jelenti. Ebben a tekintetben az ultrahangos nedves pácolásnál volt megfigyelhető a leggyorsabb kezdeti sófelvétel ($k_{s1}=2,60$) a nedves pácolással ($k_{s1}=3,54$) és a száraz pácolással ($k_{s1}=4,13$) összehasonlítva. Ez alapján az ultrahang alkalmazásával 1,5-szer gyorsabb sófelvétel érhető el a száraz pácolással szemben. A víz távozásának kezdeti sebessége szintén az ultrahangos pácolás során bizonyult a leggyorsabbnak ($k_{v1}=2,00$) a nedves pácoláshoz ($k_{v1}=2,31$) és a száraz pácoláshoz ($k_{v1}=2,82$) képest.

A k_{s2} és k_{v2} értékek lehetővé teszik az egyensúlyi sótartalom (St_{eq}), illetve az egyensúlyi nedvességtartalom (Nt_{eq}) meghatározását $t \rightarrow \infty$ időpontban. Az eredmények alapján az ultrahanggal kiegészített nedves pácolás esetén kaptam a legmagasabb egyensúlyi sótartalom értéket ($St_{eq} = 16,11\%$), ami 1,35%-kal magasabb, mint az nedves pácolással ($St_{eq} = 14,76\%$), és 2,94%-kal magasabb, mint a száraz pácolással ($St_{eq} = 13,17\%$) kapott értékek. A nyers sonkafélék esetén maxi-

málikan elérhető 5 m/m%-os sótartalom a Peleg modell alapján a kísérletben alkalmazott paraméterek mellett az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással már a 17. percre elérhető, míg a nedves pácolással a 24. percre, a száraz pácolással a 30. percre. Figyelembe véve a modell alkalmazásával számított értékeket, valamint a sebességi mutatókat, a száraz pácolással szemben az ultrahangos nedves pácolással $d=15$ mm és $h=80$ mm méretű húshenger esetén 43%-kal csökkenthető a pácolási idő. Az ultrahangos, illetve a nedves pácolást összehasonlítva 29%-os csökkenés érhető el.

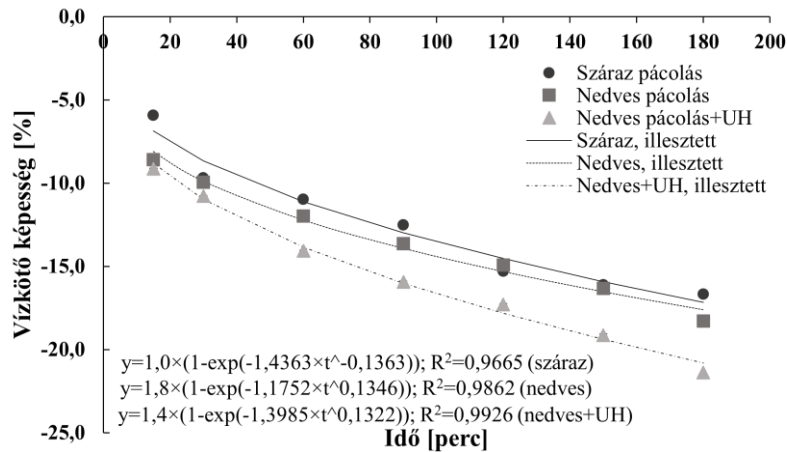
Az egyensúlyi nedvességtartalom számítása során a következő eredményeket kaptam: az ultrahangos nedves pácolással készített mintáknál a k_{v2} értékből számított N_{teq} érték ($N_{teq}=55,64\%$) alacsonyabb volt, mint a nedves pácolással ($N_{teq}=57,33\%$), és a száraz pácolással ($N_{teq}=57,94\%$) készített húsmintáké. Végtelen ideig tartó pácolás esetén tehát a nedves pácolás alkalmazása mellett a legmagasabb, míg az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával a legalacsonyabb nedvességtartalom érhető el a modell előrejelzése alapján. A Peleg-modell által kapott eredmények összhangban vannak a mért adatokkal, a pácolási módok hatása ennél az értékelési módszernél is egyértelműen látszik. A hús pácolása során a só és a víz diffúziós sebességének ismerete fontos, mivel lehetővé teszi a szükséges feldolgozási idő pontos meghatározását, figyelembe véve a kívánt végső só- és víztartalmat. Ezen modell alkalmazása precíziós pácolási technológiát tesz lehetővé.

A Zugarramurdi és Lupín modell paramétereinek eredményei a 6. táblázatban láthatók. A sótartalom esetén $R^2=0,9199-0,9262$, a nedvességtartalom esetén $R^2=0,8481-0,869$ értékeket kaptam a mért és a modellel számolt eredmények között. Ezen eredmények alapján a sótartalom értékeket tekintve ez a modell is jó illeszkedést mutatott a kísérleti adatok előrejelzésében a húsminták pácolása során. A nedvességtartalom értékek esetén a modell kevésbé szoros illeszkedést mutatott. A modellben a k_s és k_v paraméterek adnak számunkra információt, melyek a kezdeti tömegátadási arányra utalnak. Minél magasabb a k_s és k_v érték, annál nagyobb a sótartalom növekedésének és a nedvességtartalom csökkenésének üteme. E modell szerint is a pácolási módok közül az ultrahangos nedves pácolás adta a legmagasabb ($k_s=9,18 \times 10^{-3}$), a száraz pácolás a legalacsonyabb k_s értéket ($k_s=5,56 \times 10^{-3}$). A nedves pácolásnál $k_s=6,85 \times 10^{-3}$ értéket kaptam. Ez szintén alátámasztja azt a megfigyelést, hogy az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával nemcsak magasabb sókoncentráció érhető el, de a só behatolása is gyorsabb. A nedves pácolással összehasonlítva ez 1,3-szor, száraz sózáshoz viszonyítva 1,7-szer gyorsabb só transzportot jelent.

A k_v értékek alapján az ultrahangos nedves pácolás során volt a leggyorsabb a nedvesség távozása ($k_v=6,93 \times 10^{-3}$). Ennél a modellnél ez 1,2-szer nagyobb mértékű nedvességtartalom csökkenést jelent a nedves pácolással ($k_v=5,69 \times 10^{-3}$), és 1,4-szer nagyobbat a száraz sózással ($k_v=5,04 \times 10^{-3}$) összehasonlítva. A hagyományosan pácolt termékeknél a nedvességtartalom gyorsabb távozása előnyt jelenthet, hiszen ezáltal az érlelési idő csökkenthető.

5.1.6. A vízkötő képesség eredményei

A vízkötő képesség változását a pácolási idő függvényében a 31. ábra mutatja.



31. ábra: Száras pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) vízkötő képességének alakulása a pácolás során

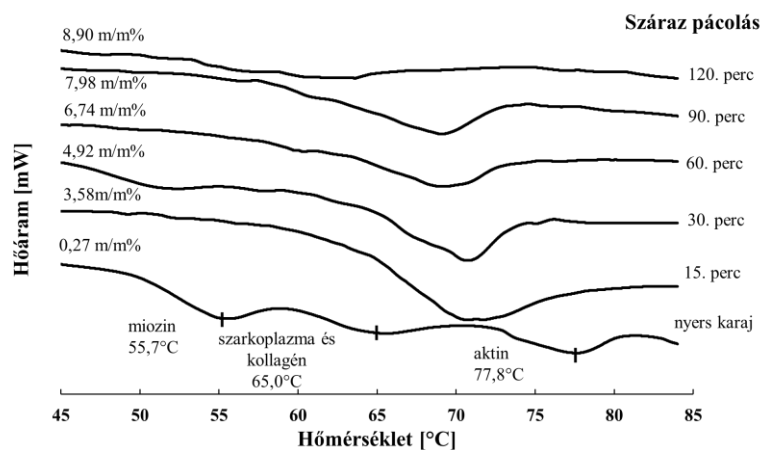
A kapott eredményekből megfigyelhető, hogy a kezelési idővel a vízkötő képesség folyamatosan csökken, és végig negatív értékeket mutat. A negatív értékek magyarázata, hogy a húsminta víztartalma ($m_{\text{víz}}$) alacsonyabb, mint a kezdeti víztartalom ($m_{\text{víz}0}$), ami dehidratálódásra utal. A mért értékekre illesztett exponenciális függvény mindhárom pácolási mód esetén szoros illeszkedést mutatott ($R^2=0,9665-0,9926$). A kísérletben alkalmazott telített sóoldatban való pácolás során a húspan kialakult magas sókoncentráció a miozin filamentumok depolimerizációját okozza, ami csökkenti az aktin-miozin-só komplex vízmegtartó képességét. Ezt támasztja alá Offer and Trinick (1983) szakmai eredménye is. A víztartó képesség értékeimet összevetve a sótartalom mérés során kapott eredményekkel, megfigyelhető, hogy már a legalacsonyabb mért sókoncentráció (15. perc; száraz pácolás: 3,58%, nedves pácolás: 4,13%, ultrahangos nedves pácolás: 5,28%) esetén dehidratálódott a húsminta. A 5.1.7 fejezetben bemutatásra kerülő fehérjedenaturációs vizsgálatok alapján már a 15. percnél kimutatható volt a hús fehérjéinek denaturációja, ami magyarázza a vízkötő képesség csökkenését. A saját vizsgálataim és a szakirodalom alapján (Knight and Parsons, 1988) a telített oldathoz közeli sókoncentráció erősen befolyásolja a fehérjék denaturálódását, ezáltal csökkentve a hús vízmegtartó képességét és a húspan lévő víz mennyiségét (Graiver et al., 2006). A 180. percre az ultrahanggal pácolt minták vízkötő képesség értéke 22,06%-kal kisebbnek bizonyult, mint a száraz pácolású mintáké, és 14,49%-kal kisebbnek, mint a nedves pácolású mintáké. A statisztikai értékelés alapján a különbség szignifikánsnak is bizonyult ($p<0,001$). Hasonló eredményt kaptak Chang et al. (2015) is, akik nagy teljesítményű ultrahang

alkalmazásnál (40 kHz, 1500 W) már 10 perces kezelés után a vízkötő képesség csökkenését tapasztalták marhahús esetén.

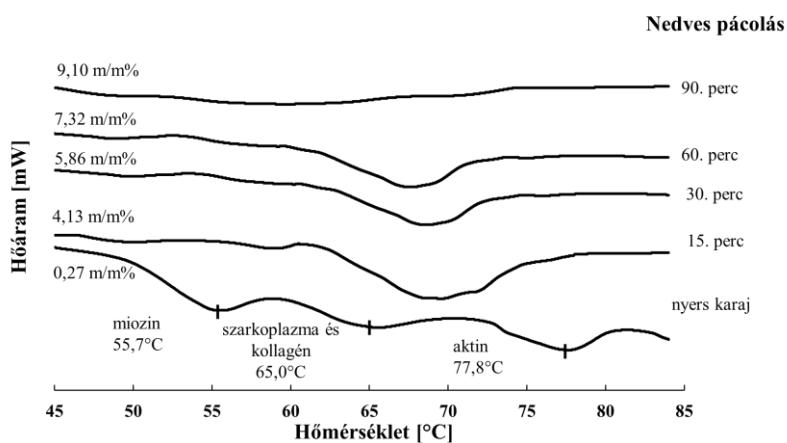
5.1.7. A fehérjedenaturáció vizsgálatának eredményei

A húsfeldolgozás során a fő izomfehérjék, mint a miozin, a szarkoplazmafehérjék és a kollagén, valamint az aktin termikus denaturációja különböző hőmérsékleten történik. A nyers sertés-hús esetében a hőáramgörbe 3 csúcsa a szakirodalom alapján a következő értékeknél található: miozin: 54-58 °C; szarkoplazma és kollagén: 67 °C, aktin: 71-83 °C (Pighin et al., 2008). Méréseim során a nyers sertéskaraj három fő fehérjecsoportjának csúcshőmérsékletei ettől alacsonyabbak voltak: a miozin csúcsa 55,7 °C-nál, a szarkoplazma és kollagéné 65,0 °C-nál, míg az aktin denaturációs csúcsa 77,8 °C-nál jelent meg (32. ábra - 34. ábra).

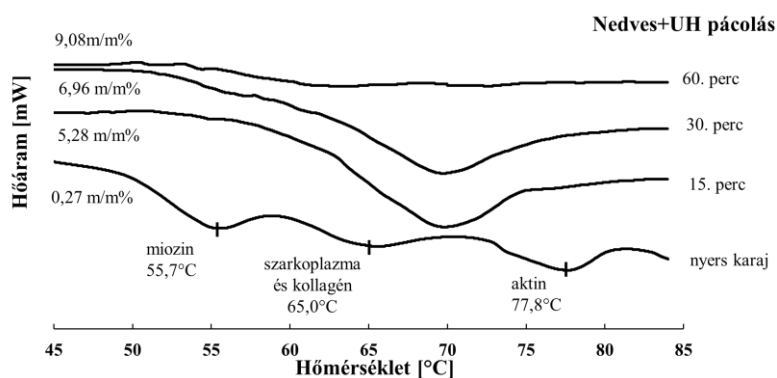
Mindhárom pácolási móddal készített húsminták esetében látható, hogy már a 15 perces min-tavételnél a miozin csúcsa nem azonosítható, ami arra utal, hogy denaturálódott. Ennek oka, hogy a só hatására a miozin monomolekuláris szintig bomlik. Ennek a szerkezeti változásnak a hatására a fehérje hőstabilitása megszűnik, ezáltal a hőáramgörbén eltűnik a csúcsa. Ilyenkor az úgynevezett kisózás jelensége megy végbe. A telített sóoldatból a húsba bediffundáló nagy mennyiségű só ion hatására a fehérjéket körülvevő hidrátburok elvékonyodik, és a fehérjék hidrofób kapcsolatot képezve kötődnek egymáshoz. Ennek eredményeként eredeti szerkezetüket elvesztik, denaturálódnak. Eredményeim alapján ez 3,58% sótartalom értékénél következik be. A pácolások során a szarkoplazma és kollagén, valamint az aktin esetében is átalakulás következett be, ugyanis a 15 perces minta esetén már csak egy csúcs volt azonosítható. Ez a csúcs feltehetően az aktin denaturációs csúcsát jelenti. Az egyetlen azonosítható csúcs hőmérséklete a sótartalom növekedésével jelentősen csökkent. Az ábrázolt hőáramgörbéken látható, hogy a száraz pácolás esetén a 90. percig volt azonosítható az aktin csúcsa, ezt követően eltűnt. A nedves pácolásnál a 90. percben, az ultrahangos pácolásnál pedig már a 60. percben sem volt egyetlen csúcs sem detektálható. A sótartalom eredményeket nézve körülbelül 8% sókoncentráció volt az a határ, ami felett nem volt azonosítható fehérje a DSC mérések során kapott hőáram görbéken. A 90. percre a száraz pácolás esetén 69,3 °C csúcshőmérsékletet ért el az aktin denaturációs csúcsa. A nedves pácolásnál a 60. percre a csúcshőmérséklet 68,1 °C, az ultrahangos nedves pácolásnál 69,9 °C volt. Látható tehát, hogy az ultrahang alkalmazása esetén a csúcshőmérséklet csökkenése kisebb mértékű volt, mint a hagyományos nedves pácolás esetén. Ez összefüggésben lehet a nagy sókoncentrációval, ezáltal a nagyobb mértékű vízvesztéssel.



32. ábra: Száraz pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram-görbéi a pácolás során



33. ábra: Nedves pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram-görbéi a pácolás során



34. ábra: Ultrahanggal kombinált nedves pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram-görbéi a pácolás során

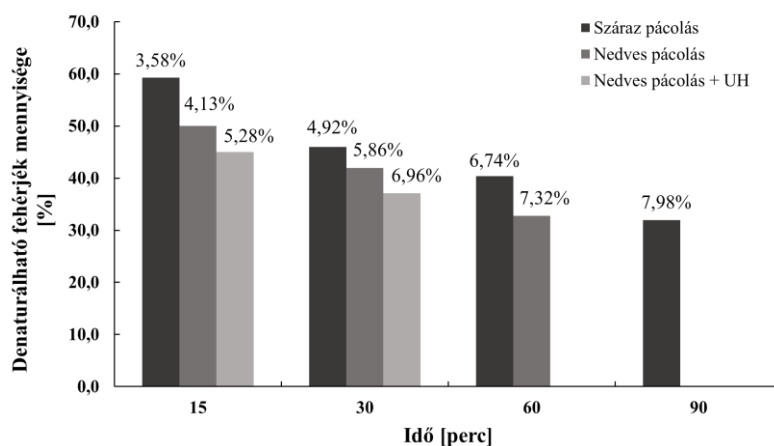
Különböző húsfélék sótartalmának növelése bizonyítottan csökkenti a húsfehérjék termikus stabilitását. Graiver et al. (2006) hasonló változásokat tapasztaltak sertéskaraj pácolása során. Kísérletükben a sótartalom növelésével az aktin denaturációs csúcsa 67,7 °C-ra csökkent. Thorarindottir et al. (2002) arról számoltak be, hogy a tőkehal sózása csökkentette a csúcshőmérséklet értékeket, és a csúcsok nehezebben voltak elkülöníthetők, mint a nyers minta esetében. Pighin et al. (2008) argentin marhahús sózása során vizsgálták a fehérjék változását, ahol már 0,7 m/m% sótartalom érték esetén az aktin csúcshőmérséklete 80,3 °C-ról 77,2 °C-ra csökkent. Siró et al. (2009) kísérletük során azt figyelték meg, hogy az aktin denaturációs hőmérséklete az ultrahang intenzitásának 3 W/cm²-ig történő növelésével csökkent, míg nagyobb intenzitások (3,5 és 4,0 W/cm²) esetén ellentétes tendencia volt tapasztalható. Szakirodalom alapján önmagában az ultrahang alkalmazása is befolyásolhatja a fehérjék szerkezetét. 19 W/cm² teljesítményű, 40 perces ultrahangos kezelés sertéshúsban a miozin csúcs eltűnését, valamint az aktin csúcshőmérsékletének csökkenését (73 °C-ról 71,1 °C-ra) okozta (McDonnell et al., 2014).

Annak megállapítására, hogy a pácolások során végbement denaturáció milyen mértékű, a denaturációs entalpia értékek is meghatározásra kerültek (7. táblázat). Az eredményekből látható, hogy a pácolási idő előrehaladtával és a sótartalom növekedésével a denaturációs entalpia értékek csökkentek. A nyers hús esetén mért $1,963 \pm 0,219$ J/g érték a 90. percre száraz pácolás esetén $0,627 \pm 0,331$ J/g, nedves pácolás esetén a 60. percre $0,643 \pm 0,247$ J/g, ultrahangos nedves pácolás esetén a 30. percre $0,728 \pm 0,441$ J/g értékre csökkent.

Az ultrahangos pácolás alkalmazásával a denaturálható fehérjék mennyisége nagyobb mértékben csökkent, mint a nedves, vagy a száraz pácolás esetén (35. ábra). Az egyes mintákhoz tartozó sótartalom értékeket az oszlopok tetején tüntettem fel. A nyers húshoz viszonyított entalpia %-os értékét tekintve már a 15. percben jelentős különbség mutatkozott a minták között. A száraz pácolás esetén még a 90. percben is 31,9% volt a denaturálható fehérjék nyers húshoz viszonyított mennyisége, míg az ultrahanggal pácolt mintáknál már a 60. percben sem volt jelen denaturálható fehérje. Kísérletemben a denaturációs entalpia értékek között szignifikáns különbség mutatkozott ($p < 0,005$). A fehérjedenaturáció közvetlenül a só destabilizáló hatásának, közvetve az ultrahangnak köszönhető. Az ultrahang közvetett hatása, hogy gyorsabban, vagyis rövidebb idő alatt érhető el magasabb sótartalom a húsban (5.1.1 és 5.1.2 fejezet), tehát használata közvetve gyorsíthatja a fehérjék denaturációját.

7. táblázat: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{mm}$) húsminták fehérjefrakcióinak denaturációs csúcshőmérsékletei és denaturációs entalpia értékei

Pácolás módja	Pácolási idő	Sótartalom [m/m%]	Denaturációs csúcshőmérséklet [°C]			Denaturációs entalpia [J/g]
			Miozin	Szarkoplazma fehérjék és kollagén	Aktin	
	Nyers karaj	0,27	55,7±0,3	65,0±0,6	77,8±0,4	1,963±0,219
Száraz pácolás	15. perc	3,58	-	-	71,6±0,4	1,164±0,406
	30. perc	4,92	-	-	71,0±0,3	0,903±0,313
	60. perc	6,74	-	-	69,4±0,4	0,792±0,287
	90. perc	7,98	-	-	69,3±0,3	0,627±0,331
Nedves pácolás	15. perc	4,13	-	-	69,7±0,4	0,982±0,364
	30. perc	5,86	-	-	69,1±0,5	0,824±0,428
	60. perc	7,32	-	-	68,1±0,4	0,643±0,247
Nedves pácolás+UH	15. perc	5,28	-	-	70,3±0,6	0,884±0,319
	30. perc	6,96	-	-	69,9±0,5	0,728±0,441

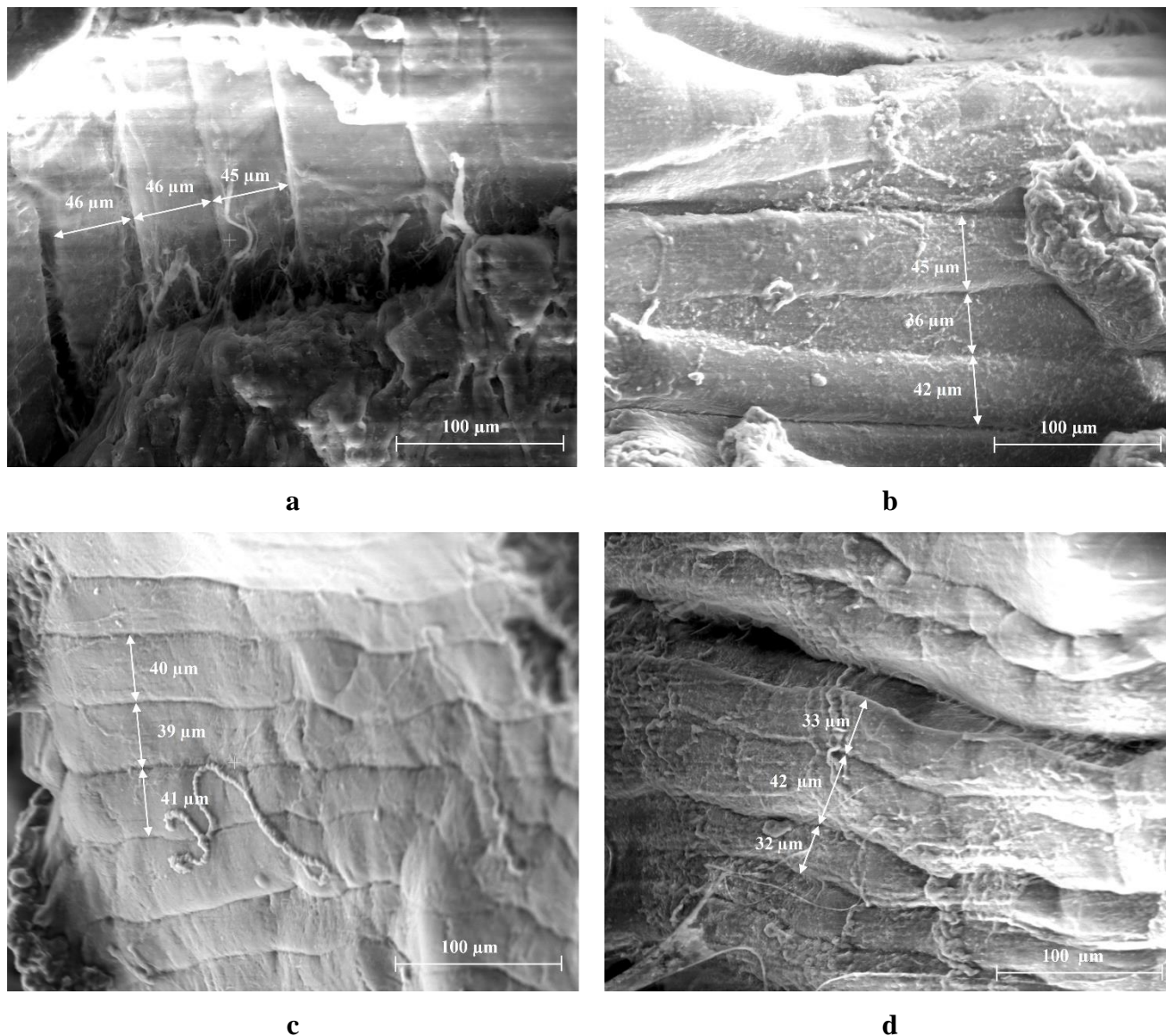


35. ábra: Denaturálható fehérjék mennyiségének alakulása nyers húshoz viszonyítva henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) száraz-, nedves-, és ultrahanggal kombinált nedves pácolása (nedves+UH) során, és a só tartalom változása

5.1.8. A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálat eredményei

A mikroszkópos felvételeken (36. ábra) látható, hogy a rostok átmérője a nyers húshoz képest a 180 percig pácolt minták esetén csökkent. A nyers sertéshús esetén az izomrostok keresztmetszete azonos volt, azok rendezettek és párhuzamosan rendeződnek egymással. A pácolás, valamint

az ultrahang alkalmazása a miofibrillumok bizonyos fokú deformációjához vezetett, a rostok vastagsága csökkent, és eltérő méretet mutattak. A szárazon pácolt minta esetén a rostvastagságok átlagértéke 10%-kal csökkent a nyers mintához képest. A nedves pácolással kezelt húsok esetén ez a csökkenés 13%-os, az ultrahangos minták esetén már jóval jelentősebb, 22% különbség volt meghatározható.



36. ábra: Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) képei 180 perces pácolást követően, 1000×-es nagyítás mellett.

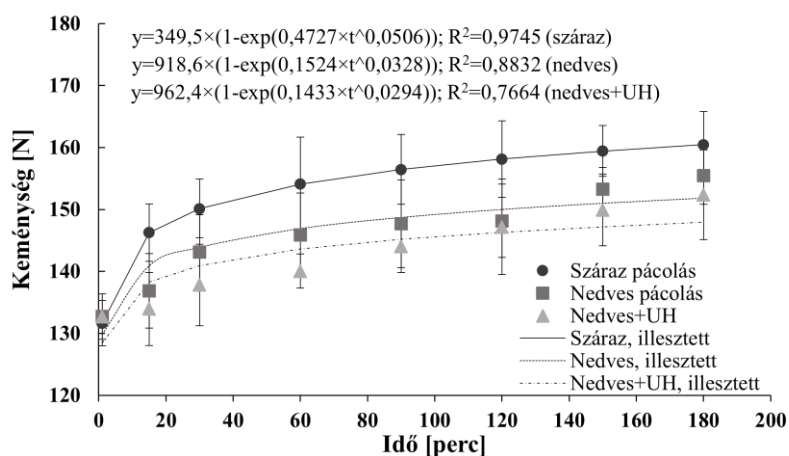
a: nyers karaj; b: száraz pácolás; c: nedves pácolás; d: ultrahangos nedves pácolás.

A nedvesen pácolt minták felülete a szárazon sózott, valamint az ultrahanggal kezelt mintával összehasonlítva sima, egyenletes. Az ultrahang használata szemcsés megjelenésű rostokat eredményezett, a felület egyenetlen, mely a kavitáció jelenségével, annak hatásával hozható összefüggésbe. A húrostok szerkezetének ilyenfajta roncsolódása eredményezi a só gyorsabb behatolását.

A felületi változás mellett a rostszálak eltávolodása is megfigyelhető, közöttük „hasadék” jött létre. Hasonlót tapasztaltak sertéshús ultrahangos pácolási kísérlete során Pan et al. is (2022). Megfigyelésük alapján az ultrahang hatására a miofibrillumok szétestek, közöttük mikrohasadékok alakultak ki. Du et al. (2021) csirkeúza ultrahangos kezelését végezték különböző paraméterek mellett (500 W/20 és 30 perc; 600 W/20 és 30 perc), mely során megállapították, hogy az ultrahang alkalmazásával a miofibrillumok mechanikailag sérültek, azok teljesen feltáruultak.

5.1.9. Az állománymérés eredményei

Az élelmiszerek kiválasztásánál és fogyasztásánál az egyik legfontosabb érzékszervi tulajdonság az állomány.



37. ábra Száraz pácolással, nedves pácolással és ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18$ mm, $h=80$ mm) keménységének alakulása a pácolás során

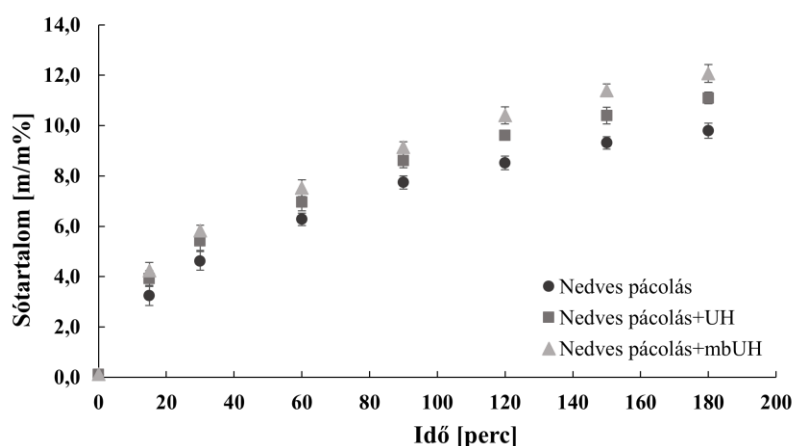
A pácolási idő előre haladtával a húsminták keménység értékeiben növekedés látható mindhárom pácolási mód esetén (37. ábra). A mért értékekre illesztett exponenciális függvény a száraz pácolt minták esetén szoros illeszkedést mutatott ($R^2=0,9745$), a nedves-, valamint az ultrahanggal kiegészített nedves pácolás esetén a kapcsolat a mért és a számított értékek között kevésbé szoros ($R^2=0,7664-0,8832$). Az ultrahangos nedves pácolással készített húsminták keménysége bizonyult a legkisebbnek, vagyis ezek a húsok voltak a legpuhábbak. Ez az ultrahang állománypuhító hatásával magyarázható. Az ultrahangos kavitáció „szerkezetromboló” hatása, és maguknak az ultrahanghullámoknak a rezgése a hús szerkezetének fizikai gyengüléséhez vezet (Yeung and Huang, 2017). A szárazon pácolt minták szignifikánsan keményebbek voltak ($p<0,05$), mint az ultrahangos nedves pácolt minták. A szárazon és a nedvesen pácolt minták keménység értékei között nem mutatkozott szignifikáns különbség ($p>0,05$).

5.2. A nedves pácolás, ultrahanggal kombinált nedves pácolás és mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolási kísérletek eredményei

A II. kísérleti sorozatomban sertéskarajból kialakított húshengerek ($d=15$ mm; $h=80$ mm) nedves pácolását, ultrahanggal (UH) kombinált nedves pácolását, valamint mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos (mbUH) pácolását végeztem 20 m/m% sótartalmú páclében, 180 perc időtartamban.

5.2.1. A húsminták sótartalmának változása a pácolások során

A húshengerek sótartalmának alakulását a pácolások során a 38. ábra mutatja.

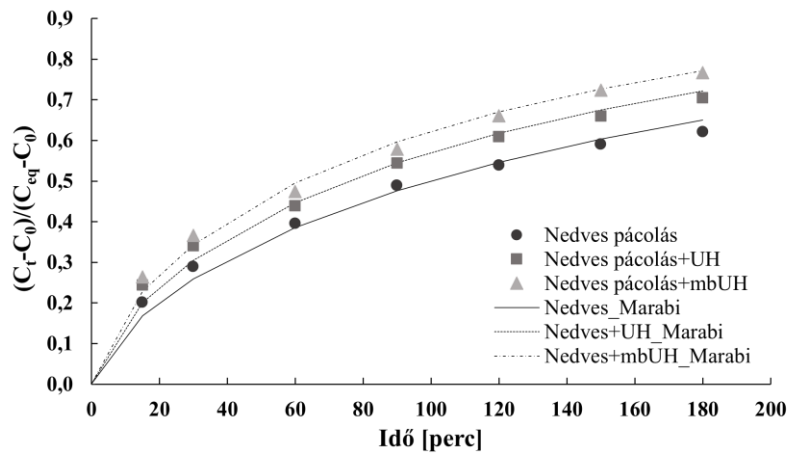


38. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) sótartalmának alakulása a pácolás során

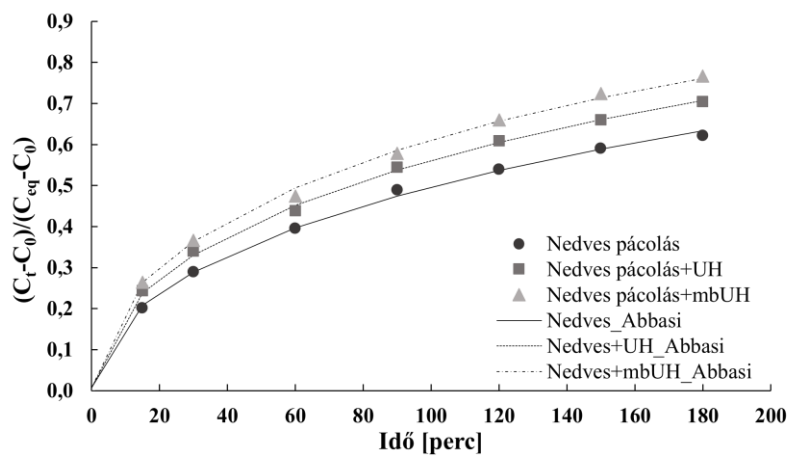
A sótartalom alakulását tekintve már a pácolások 15. percétől kezdődően az ultrahangos pácolású és a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású minták nagyobb sótartalmat mutattak az ultrahang és mikrobuborékolattal pácolt mintákhoz képest. A pácolások 90. percétől kezdődően a különbség szignifikánsnak ($p<0,05$) is bizonyult. Ezt követően a pácolások 120. percétől kezdődően az ultrahangos pácolású és a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású minták sótartalma között is különbség mutatkozott. Utóbbiak szignifikánsan ($p<0,05$) nagyobb sótartalmat mutattak a csak ultrahangos pácolású mintákhoz képest. Több tanulmányban is beszámoltak arról, hogy az ultrahang képes fokozni a só hússzövetbe való behatolását (Cárcel et al., 2007; Gómez-Salazar et al., 2018; Ozuna et al., 2013; Siró et al., 2009), és található tanulmányok, amelyek azt mutatják, hogy a mikrobuborékok és az ultrahang együttes alkalmazása fokozza a kis molekulatömegű gyógyszer hatóanyagok sejtekbe történő bejutását (Hernot and Klivanov, 2008; Karshafian et al., 2010; Keyhani et al., 2001). Az ultrahang és a mikrobuborékok sóbehatolást gyorsító hatását a sótartalom mérési eredményeim is alátámasztják.

5.2.2. A sódiffúzió számításának (D_s) eredményei

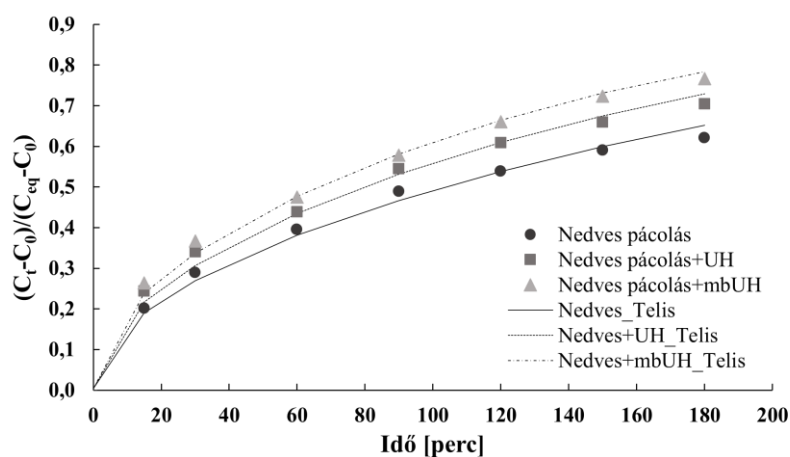
A pácolt húsminták relatív sómennyiségeire illesztett diffúziós modelleket a 39. ábra mutatja. A modellek illesztését a mérési adatokra a négyzetes eltérések összegének gyökének (RMSE, Root Mean Square Error) minimalizálásával végeztem a diffúziós tényező (D) értékének változtatásával. A modell és a mért értékek illeszkedésének „szorosságát” a determinációs együtthatóval (R^2) jellemeztem, az eredményeket (8. táblázat). Az $R^2=0,9910-0,9989$ értékek a modellek mérési adatokra való szoros illeszkedését mutatják. A legjobb korrelációt ($R^2=0,9985-0,9989$) Abbasi modellje mutatta, ami azt jelzi, hogy a modell nagy pontossággal írja le a sódiffúzió kinetikáját a pácolás során. Erre való tekintettel a só diffúzióját (D_s) e modell alapján értékeltem.



a



b



c

39. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15\text{ mm}$; $h=80\text{ mm}$) relatív sómennyiség $(C_t-C_0)/(C_{eq}-C_0)$ változásaira illesztett diffúziós modellek

a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

8. táblázat: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15\text{ mm}$; $h=80\text{ mm}$) számított só diffúziós együttható (D_s) és a determinációs együttható (R^2) értékei

		Nedves pácolás	Nedves pácolás+UH	Nedves pácolás+mbUH
$D_s \times 10^{-10}$ (m^2/s)	Marabi	5,87	7,78	9,55
	Abbasi	5,82	7,78	9,58
	Telis	4,46	5,79	6,98
R^2	Marabi	0,9910	0,9917	0,9947
	Abbasi	0,9985	0,9989	0,9986
	Telis	0,9936	0,9934	0,9962

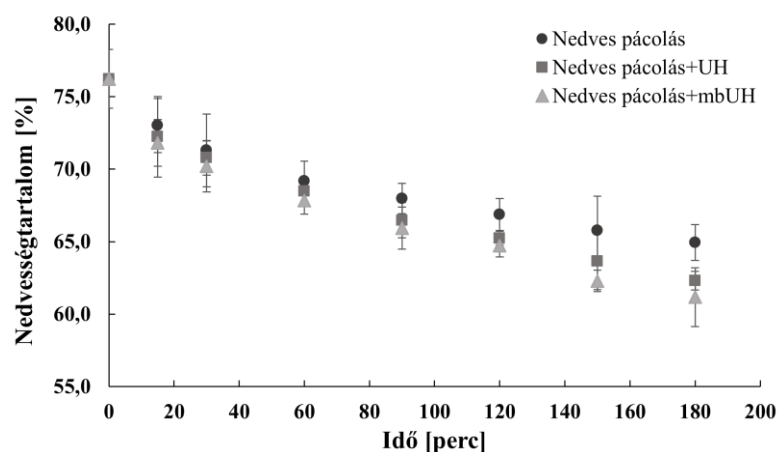
A számolt só diffúziós tényezők alapján (8. táblázat) önmagában az ultrahang alkalmazásával 1,3-szor ($D_{s,UH}=7,78 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), míg a mikrobuborékkal kiegészített ultrahangos kezeléssel 1,6-szer ($D_{s,mbUH}=9,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) gyorsabb diffúzió érhető el a nedves pácoláshoz ($D_{s,N}=5,82 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) képest. Összehasonlítva eredményeimet az I. kísérletben kapott értékekkel látható, hogy a telített sóoldat alkalmazásával a sódiffúzió gyorsabbnak mutatkozott (5.1.2 fejezet), mint az ebben a kísérletben használt 20 m/m% sókoncentrációjú páclében történő pácolásnál, ami a páclé sótartalmának só diffúzióra gyakorolt hatását mutatja. A nedves pácolás értékei között csekély, 1,5% a különbség, míg a telített sóoldatban történő ultrahangos pácolás 11%-kal gyorsabb sódiffúziót eredményezett, ami a páclé sókoncentrációjának diffúzióra gyakorolt hatását is mutatja.

Az ultrahangos kezelés során kapott diffúziós tényező értékek nagyságrendileg összhangban vannak a szakirodalomban fellelhető eredményekkel. Fox (1980) 180 g/l koncentrációjú páclében

pácolt sertéskaraj esetén a só diffúziós együtthatójára $2,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ értéket kapott. Graiver et al. (2006) 5-200 g/l közötti sókoncentráció hatását vizsgálták sertéskaraj diffúziós együtthatójára, és a legmagasabb koncentrációnál $D_s=5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ értéket kaptak. Siró et al. (2009) sertéshús pácolása során $D_s=2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ diffúziós együttható értéket publikáltak, míg 40 g/l koncentrációjú páclében 2 – 4 W/m^2 intenzitás tartományban ultrahanggal kezelt minták esetén az eredmény $D_s=4,7 \times 10^{-10} - 3,1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ volt, ami 1,3-1,9-szer gyorsabb sódiffúziót jelent az ultrahang nélkül végzett pácoláshoz képest. Látható, hogy több tanulmány is fellelhető, amelyben a szerzők a só diffúzióját vizsgálták az ultrahangos pácolás során, azonban jelenleg nem állnak rendelkezésre információk a mikrobuborékkal kombinált ultrahang só diffúzióra gyakorolt hatásáról.

5.2.3. A húsminták nedvességtartalmának változása a pácolások során

A pácolás során a só húsba való behatolásával egyidőben a nedvesség távozása megy végbe (40. ábra), amire a kísérletben használt 20 m/m% sótartalmú páclé adhat magyarázatot, hasonlóan az 5.1.3 fejezetben bemutatott telített (26,3 m/m%) pácléhez.

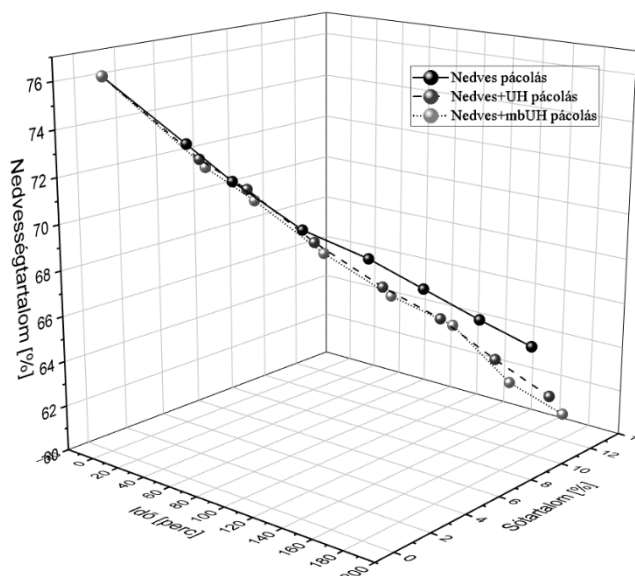


40. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15 \text{ mm}$; $h=80 \text{ mm}$) nedvességtartalmának alakulása a pácolás során

A nyers húsminták (0. perc) átlagos nedvességtartalma $76,23 \pm 2,04\%$ volt. A pácolások végére a nedvességtartalom nedves pácolás esetén $64,93 \pm 1,23\%$ -ra, ultrahanggal kombinált nedves pácolás esetén $62,30 \pm 0,65\%$ -ra, a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolás esetén pedig $61,17 \pm 2,02\%$ -ra csökkent. A pácolás során a hús sótartalmának növekedése megnövekedett elektrosztatikus taszítást eredményez, ami a miofibrillumok között, ennek következtében oldalirányban megduzzadnak, vizet tartanak vissza, miközben a hús és a páclé közötti ozmotikus nyomáskülönbség miatt víz távozik a húsból. A pácolási módok között csak csekély különbség látható

a nedvességtartalom tekintetében. A statisztikai értékelés alapján pácolási módoknak nem volt szignifikáns hatása a húsminták nedvességtartalmára ($p>0,05$) nézve.

A sótartalom és nedvességtartalom értékek együttes ábrázolása (41. ábra) esetén megfigyelhető, hogy az mbUH és az UH pácolással kapott eredmények lefutása nagyon hasonló a 150. perctől kezdve. Ezt követően a mikrobuborékos kezelés hatására a sófelvétel, valamint a vízleadás mértéke szinte ugrásszerűen nő. Az ultrahanggal pácolt mintáknál az anyagtranszport folyamatok teljesen együtt zajlanak, míg a nedves pácolás során 60 perces kezelést követően a sófelvétel és a vízleadás kisebb mértékű, mint a másik két pácolási mód esetén.



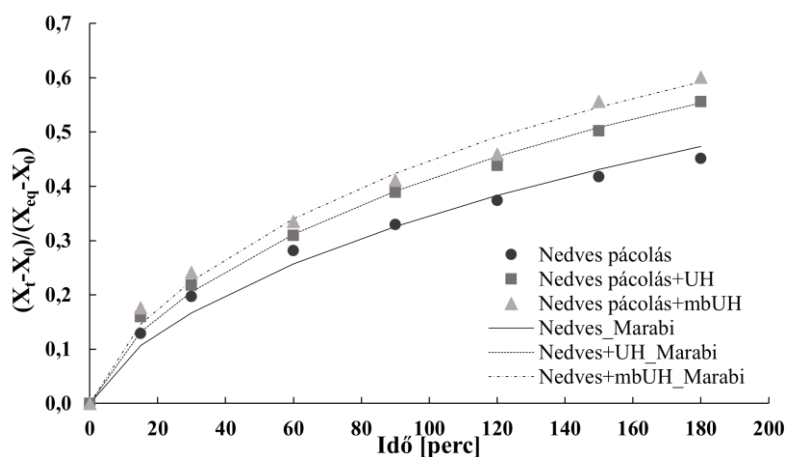
41. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15\text{ mm}$; $h=80\text{ mm}$) só – és nedvességtartalmának alakulása a pácolás során

5.2.4. A vízdifúzió számításának (D_V) eredményei

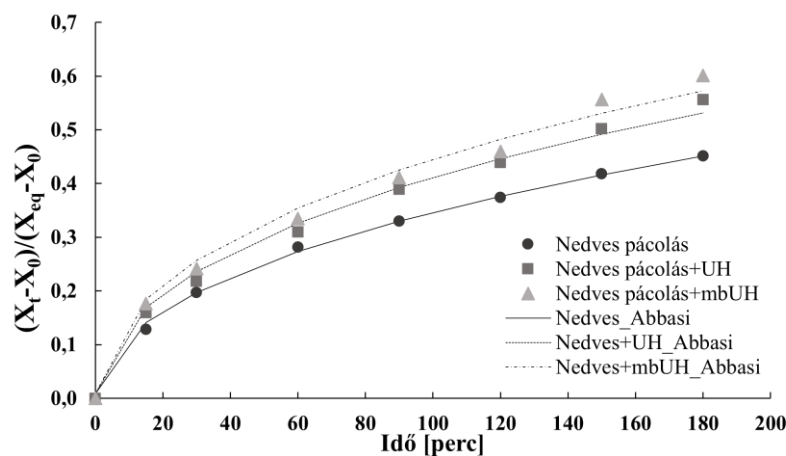
A mért értékekre illesztett modelleket a 42. ábra, a víz diffúziós tényezőket (D_V) és a determinációs együttható (R^2) értékeket pedig a 9. táblázat mutatja. A számolt determinációs együttható értékek ($R^2=0,9860-0,9989$) alapján mindhárom modell esetében szoros illeszkedést tapasztaltam a mért, valamint a modellek által előre jelzett értékek között. A legerősebb kapcsolatot Telis modellje mutatta ($R^2=0,9959-0,9989$), így a továbbiakban a víz diffúziós tényező értékeket e modell alapján értékeltem.

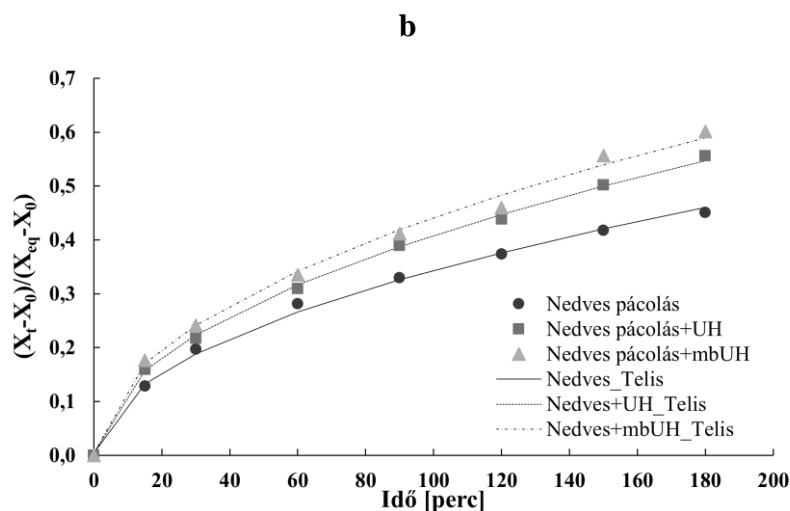
A legnagyobb vízdifúziós sebességet a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos pácolással kezelt ($D_V=3,59 \times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$) húsminták mutatták, ami a nedves pácolással ($D_V=2,17 \times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$)

összehasonlítva 1,7-szer, míg az ultrahanggal kombinált nedves pácolással ($D_v=3,07 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) összehasonlítva pedig 1,2-szer gyorsabb víz diffúziót jelent. Ennek magyarázata lehet, hogy amikor az ultrahanghullám szilárd anyagon (pl. húson) halad át, váltakozó tágulást és összenyomódást okoz, amit „szivacshatásnak” nevezünk. A „szivacshatás” által keltett erő mikroszkópikus csatornákat hoz létre, melyek a vízmolekulák kifelé irányuló diffúziójának előnyösek. A páclében létrehozott mikrobuborékok még több csatorna létrehozását eredményezhetik, aminek köszönhetően a diffúzió gyorsabb lesz. Ha a vízdifúzió eredményeit összevetjük a sódifúzióval, az látható, hogy az ultrahang alkalmazásával önmagában és a mikrobuborékos ultrahang alkalmazásával 3,9-szer gyorsabb a sóbevitel, mint a vízleadás. Nedves pácolásnál 3,3-szer gyorsabb sóbevitelt tapasztaltam. Ez azzal magyarázható, hogy az ultrahang hatására kialakuló mikrocatornákon a vízben feloldott só könnyebben bejut a húsba, melyhez hozzájárul a kavitációs buborékok összeomlása következtében a só belövellése a hús belsőbb rétegeibe. A telített sóoldatban való pácolással 2,6-3,1-szer gyorsabb vízdifúzió érhető el a nedves – és az ultrahangos nedves pácolást összehasonlítva, mint 20%-os páclében történő pácolásnál. Minél nagyobb sókoncentráció különbség a hús és a páclé között, a víz távozása annál gyorsabb ütemben történik.



a





c

42. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) relatív nedvességtartalom $((X_t - X_0) / (X_{eq} - X_0))$ változásaira illesztett diffúziós modellek

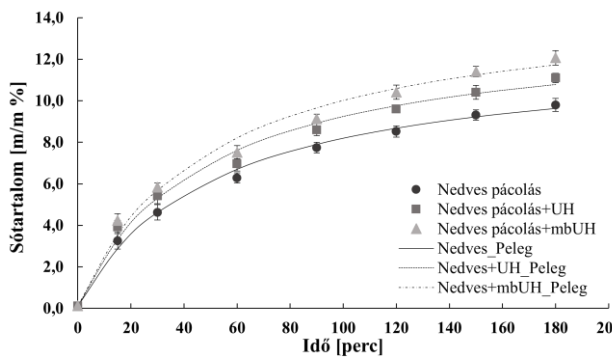
a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

9. táblázat: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) számított víz diffúziós együttható (D_v) és a determinációs együttható (R^2) értékei

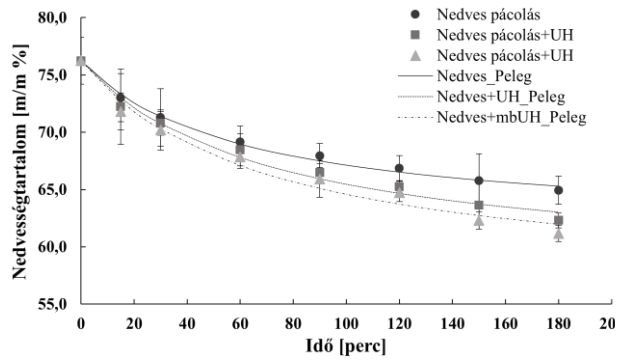
		Nedves pácolás	Nedves pácolás+UH	Nedves pácolás+mbUH
$D_v \times 10^{-10}$ (m ² /s)	Marabi	2,91	4,03	4,69
	Abbasi	2,59	3,79	4,53
	Telis	2,17	3,07	3,59
R^2	Marabi	0,9860	0,9954	0,9916
	Abbasi	0,9981	0,9930	0,9886
	Telis	0,9972	0,9989	0,9959

5.2.5. Az anyagtranszport modellek eredményei

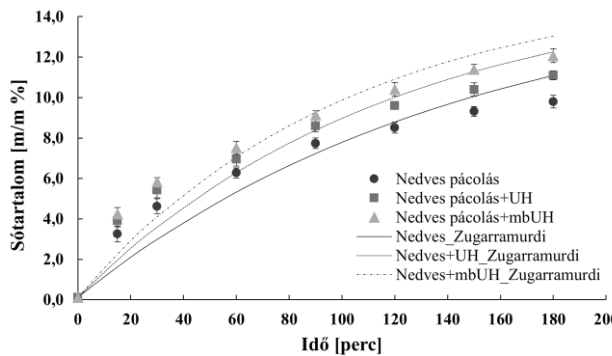
A tömegátadás kinetikájának jellemzésére ebben a kísérletben is geometriai megkötések nélkül alkalmazható empirikus modelleket (Peleg, Zugarramurdi és Lupín modell) használtam. A mért értékekre illesztett modellek a 43. ábra - 46. ábra, a modellek paraméterei pedig 10. táblázatban láthatók.



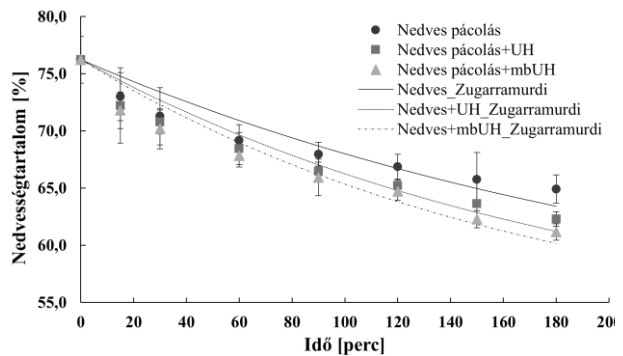
43. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) sótartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



44. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) nedvességtartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



45. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) sótartalmának változása és Zugarramurdi és Lupin modell illesztése a mért adatokra



46. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) nedvességtartalmának változása és Zugarramurdi és Lupin modell illesztése a mért adatokra

A Peleg modell szoros illeszkedést ($R^2=0,9882-0,9950$ és $R^2=0,9792-0,9941$) mutatott a mért só- és nedvességtartalom értékekre. A Peleg modell alkalmazásánál a sebességi állandók (k_{s1} , k_{v1}), valamint a kapacitás állandók (k_{s2} , k_{v2}) alapján jellemezhetők az anyagtranszport folyamatok. A

kisebb k_1 érték a só- és nedvességtartalom gyorsabb kezdeti sebességét jelenti. Ez alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás mutatta a leggyorsabb a sófelvételt ($k_{s1}=3,37$). Önmagában az ultrahang pácolás során való alkalmazása is gyorsabb sófelvételt eredményez ($k_{s1}=3,56$), az ultrahang és mikrobuborékolatás nélkül végzett nedves pácoláshoz ($k_{s1}=4,21$) képest.

A nedvesség távozásának kezdeti sebességénél hasonló reláció látható. A nedvességtartalom változásának sebessége esetén az ultrahangos és a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolások között nagyobb különbség mutatkozik, mint a sótartalom változásánál. Ez alapján a mikrobuborékok használata nagyobb mértékben befolyásolja a nedvesség távozásának kezdeti sebességét, mint a sófelvételt.

10. táblázat: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) sótartalom és nedvességtartalom értékeire illesztett Peleg, és Zugarramurdi és Lupin modellek

Modell	Paraméter	Nedves pácolás	Nedves pácolás+UH	Nedves pácolás+mbUH
Peleg	k_{s1}	4,212	3,567	3,366
	k_{s2}	0,082	0,074	0,067
	St_{eq} [%]	12,357	13,648	14,953
	R^2	0,9950	0,9899	0,9882
	k_{v1}	4,158	3,861	3,553
	k_{v2}	0,068	0,054	0,050
	Nt_{eq} [%]	61,610	57,780	56,389
	R^2	0,9941	0,9861	0,9792
Zugarramurdi	k_s	$6,78 \times 10^{-3}$	$8,40 \times 10^{-3}$	$9,84 \times 10^{-3}$
	R^2	0,9287	0,9340	0,9474
	k_v	$3,98 \times 10^{-3}$	$5,08 \times 10^{-3}$	$5,70 \times 10^{-3}$
	R^2	0,9168	0,9469	0,9482

A k_{s2} és k_{v2} értékek lehetővé teszik az egyensúlyi sótartalom (St_{eq}), illetve az egyensúlyi nedvességtartalom (Nt_{eq}) meghatározását $t \rightarrow \infty$ időpontban. A legnagyobb egyensúlyi sótartalom értéket a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás esetén kaptam ($St_{eq} = 14,95\%$). Az ultrahangos pácolással 1,3%-kal ($St_{eq} = 13,65\%$), míg a nedves pácolással 2,59%-kal ($St_{eq} = 12,36\%$) alacsonyabb kiegyenlítődési sótartalom érhető el. A modell alapján az ipari gyártástechnológiában maximálisan elérhető 5%-os sótartalom a nedves pácolással az alkalmazott paraméterek mellett a 34. percre, az ultrahangos nedves pácolással a 27. percre, míg a mikrobuborékkal kombinált nedves pácolással már a 24. percre elérhető. Ez alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahang alkalmazásával a pácolási idő 30%-kal volt csökkenthető a nedves pácolással

szemben, és 11%-kal az ultrahangos pácolással szemben 15×80 mm-es sertéskaraj húshengerek esetén.

Az egyensúlyi nedvességtartalomnál a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos pácolással érhető el a legalacsonyabb nedvességtartalom ($N_{teq}=56,39\%$) végtelen ideig tartó pácolás után a Peleg modell alapján. Ez 2,41%-kal kisebb, mint az ultrahangos pácolás ($N_{teq}=57,78\%$), és 8,48%-kal kevesebb, mint a nedves pácolással ($N_{teq}=61,61\%$) elérhető végső nedvességtartalom.

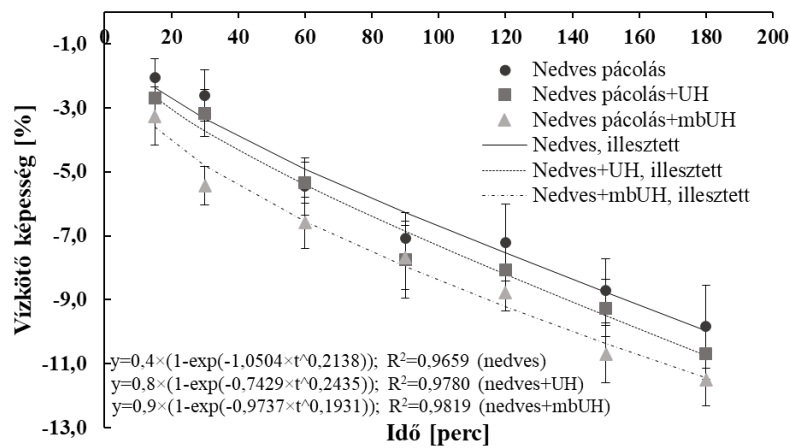
A Zugarramurdi és Lupín (Z+L) modell is jó illeszkedést mutatott a mért sótartalom ($R^2=0,9287-0,9474$) és nedvességtartalom ($R^2=0,9168-0,9482$) eredményekre (10. táblázat). A Z+L modellnél két paraméter ($k_s; k_v$) meghatározásával tájékozódhatunk a kezdeti tömegátadási arányokról. Minél magasabb a k_s és k_v érték, annál nagyobb a sótartalom növekedésének és a nedvességtartalom csökkenésének üteme. E szerint is a mikrobuborékoltatással kombinált nedves pácolással érhető el a leggyorsabb sódiffúzió ($k_s=9,84 \times 10^{-3}$), ami 1,2-szer gyorsabb, mint az ultrahangos nedves ($k_s=8,40 \times 10^{-3}$), és 1,5-szer gyorsabb, mint a hagyományos nedves pácolás ($k_s=6,48 \times 10^{-3}$) alkalmazásával elérhető sódiffúzió.

A nedvességtartalom változását mutató k_v értékek a diffúziós modellek eredményeihez (5.2.4 fejezet) hasonlóan azt mutatták, hogy a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos nedves pácolás során volt a leggyorsabb a nedvesség távozása ($k_v=5,70 \times 10^{-3}$). A Z+L modellnél ez 1,1-szer gyorsabb nedvességtartalom csökkenést jelent az ultrahangos nedves pácolással ($k_v=5,08 \times 10^{-3}$), és 1,4-szer gyorsabbat a nedves pácolással ($k_v=3,98 \times 10^{-3}$) összehasonlítva.

Az empirikus modellek alkalmazásával kapcsolatban összeségében megállapítható, hogy jól alkalmazhatók a só -, és nedvességtartalom kinetikájának, valamint a pácolási folyamat egyensúlyi állapotának előrejelzésére.

5.2.6. A vízkötő képesség eredményei

A húsminták vízkötő képességének alakulását mutatja a 47. ábra a pácolási idő függvényében a különböző pácolási módok esetén. Az illesztett exponenciális függvény szoros illeszkedést mutatott a mért értékekre ($R^2=0,9659-0,9819$). Mindhárom pácolási mód esetén a húsminták csökkenő vízkötő képességet mutattak. A negatív értékek a minták dehidratálódására utalnak, ami a húsfehérjék só hatására bekövetkező depolimerizációjának, a kisózásnak az eredménye (Offer and Trinick, 1983). Az eredmények alapján a kisózás jelensége már 15 percnyi pácolásnál is tapasztalható, mivel a vízkötő képesség értékek már ekkor negatív értéket mutattak. Szakirodalmi eredmények alapján a 20%-nál kisebb sókoncentrációjú páclé esetén a hús vízkötő képessége nő, e fölötti koncentráció esetén pedig csökken (Schmidt et al., 2008).



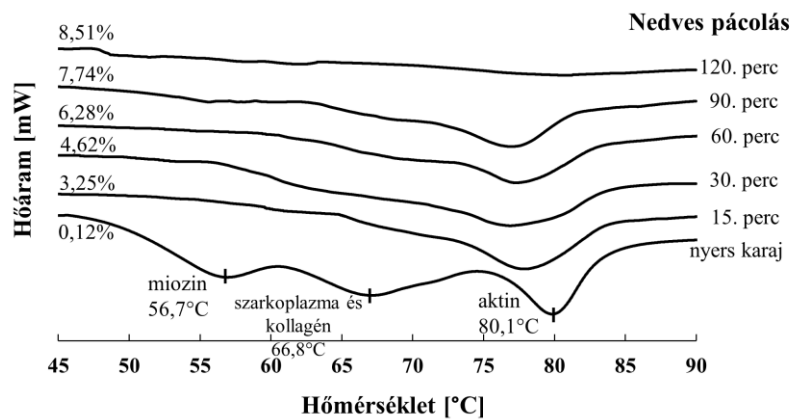
47. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=15$ mm; $h=80$ mm) vízkötő képességének alakulása a pácolás során

Az eredmények alapján a mikrobuborékolatással kombinált pácolás esetén a húsminták vízkötő képessége gyorsabban csökkent, mint az ultrahangos pácolás és a normál, nedves pácolás esetén. A mikrobuborékolatás esetén látható gyorsabb sódiffúzió miatt (8. táblázat) gyorsabb a húsminták sótartalmának növekedése, ami a kisózási kezdeti sótartalom korábbi elérését jelenti. Azonban szignifikáns különbség nem mutatkozott a pácolási módok között ($p>0,05$) a húsminták víztartó képességére nézve. Szakmai publikációk is beszámoltak arról, hogy önmagában az ultrahang csökkent vízkötő képességet eredményez nyúlhúsban és marhahúsban (Chang et al., 2015; Gómez-Salazar et al., 2018). A húsok vízkötő képességének csökkenése előnyös lehet a száraz sonkák gyártása során, mivel így a szárítási folyamat időtartama rövidíthető. A kísérletben használt henger alakú (15×80 mm) sertéskaraj húsminták 11-15% közötti nedvességtartalom csökkentek a kísérlet 180 perces időtartama alatt.

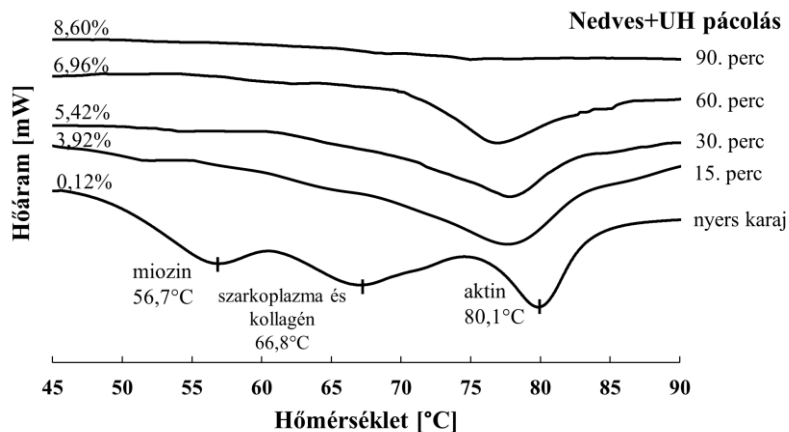
Az I. és a II. kísérlet relatív nedvességtartalom-, valamint vízkötő képesség meghatározása során kapott értékekben kismértékű hullámlás figyelhető meg az időben. A tapasztalt hullámlás egyik oka feltehetően az úgynevezett pulzáló diffúzió jelensége lehet. Az ilyen jellegű pulzáló hatások számos tényezőtől függenek, például a páclé tulajdonságaitól, a pácolandó anyag tulajdonságaitól és a pácolás időbeli paramétereitől. A hús szerkezete szintén szerepet játszhat a pulzáló diffúzióban. Például a hús szövetének sűrűsége, pórusmérete és egyéb fizikai tulajdonságai befolyásolhatják, hogy a pácanyagok mennyire hatékonyan jutnak be a hús belsejébe, melynek következtében változik a nedvességtartalom és a vízkötő képesség is. Ennek a folyamatnak pontos megértéséhez és ismeretéhez további vizsgálatok és kísérletek elvégzésére van szükség.

5.2.7. A fehérjedenaturáció vizsgálatának eredményei

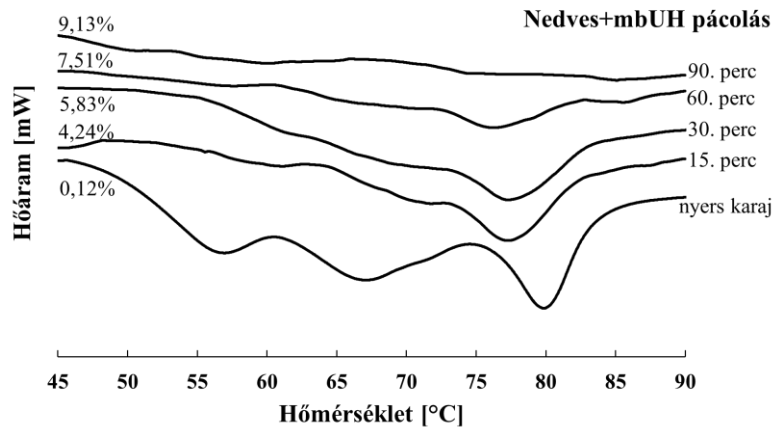
A kísérletben alapanyagként használt nyers, pácolás nélküli sertéskaraj esetében a három fő fehérjecsoport denaturációs csúcshőmérsékletei 56,7 °C (miozin), 66,8 °C (szarkoplazma fehérjék és kollagén) és 80,1 °C (aktin) értékeknél mutatkoztak (48. ábra - 50. ábra). A miozin és a szarkoplazma fehérjéket képviselő csúcsok már 15 perces pácolások után (3,25% ≤ sótartalom) nem voltak azonosíthatók, ami azt jelzi, hogy ezek a fehérjék érzékenyebbek, mint az aktin. A denaturációs csúcsok eltűnése arra utal, hogy a miozin, valamint a szarkoplazma fehérjék és kollagén denaturációja megtörtént, mind a nedves pácolás, mind az ultrahanggal kombinált nedves pácolás, mind a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolás esetén.



48. ábra: Nedves pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram-görbéi a pácolás során



49. ábra: Ultrahanggal kombinált nedves pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram görbéi a pácolás során



50. ábra: Mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással készített henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{ mm}$) hőáram görbéi a pácolás során

Quinn et al. (1980) kimutatták, hogy a miozin és az aktin denaturációs csúcsa $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról $57,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra, illetve $81\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról $74,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra csökken $0,23\text{ M}$ ($1,33\text{ m/m}\%$) só (NaCl) sertéshúshoz való hozzáadása következtében. Az ennél magasabb NaCl koncentrációnál a csúcsok már nem voltak kimutathatók. Már ez az alacsony sókoncentráció is a fehérje filamentumok kitágulását okozza. Ez gyengíti a miozin és az F-aktin közötti kötést, ami a csökkenő (vagy nem is azonosítható) denaturációs csúcshőmérsékletben érhető tetten (Graiver et al., 2006; Quinn et al., 1980). A 48. ábra - 50. ábra bemutatott hőáramgörbék alapján az aktin denaturációs csúcsa a nedves pácolású húsminta esetében 90 percig ($7,74\%$ sótartalom), az ultrahangos és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású húsminták esetében pedig 60 percig ($6,96\%$ és $7,51\%$ sótartalom) tartó pácolásokig voltak azonosíthatók.

A pácolt húsmintákban az aktin denaturációs hőmérséklete a pácolási idő növekedésével enyhén csökkenő tendenciát mutatott, mindhárom pácolási mód esetében. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású húsminta csúcshőmérséklete szignifikánsan ($p<0,05$) alacsonyabbnak bizonyult a nedves pácolású húsmintákéhoz képest. Ez valószínűleg az ultrahang és mikrobuborékok együttes hatása általi fokozott só bejutás, valamint a vízmolekulák és a miofibrillumok között lezajló reakciók eredményével magyarázható. Néhány szerző hasonló eredményekről számolt be az ultrahang aktin denaturációs csúcshőmérséklet csökkenésére gyakorolt hatásáról (McDonnell et al., 2014; Siró et al., 2009).

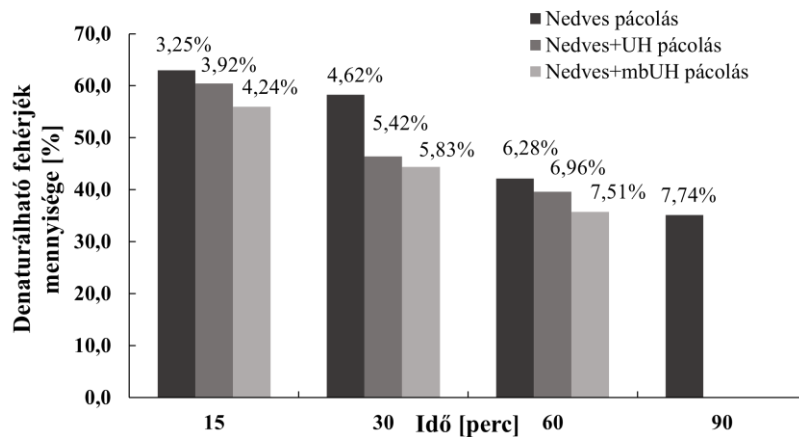
A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés olyan húsmintákat eredményezett, amelyeknél az aktin denaturációs csúcshőmérséklet értékei átlagosan $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal – nem szignifikánsan ugyan ($p>0,05$), de – alacsonyabbak voltak, mint a csak ultrahanggal pácolt húsmintáké.

Az ultrahang által okozott kavitáció a mikrobuborékokkal intenzifikálva fokozottabb sóbehatolást eredményez, ami az aktin denaturációs csúcshőmérsékletének csökkenéséhez vezet.

A pácolások során a húsminták sótartalmának növekedésével a denaturációs entalpia értékek [J/g] csökkentek (11. táblázat). A pácolás időtartamának előrehaladtával szignifikánsan kisebb ($p < 0,05$) denaturációs entalpia értékek mutatkoztak. Amennyiben a 60. percben meghatározott entalpia értékeket tekintjük, amikor még mindegyik pácolási mód esetén volt denaturálható fehérje, a nyers hús entalpia ($1,996 \pm 0,197$ J/g) értékeihez viszonyítva a nedves pácolású húsminta esetén ($0,841 \pm 0,407$ J/g) 57,9%-os csökkenést tapasztaltam, az ultrahangos minták ($0,791 \pm 0,213$ J/g) esetén 60,4%-kal, a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású minta ($0,713 \pm 0,274$ J/g) esetén pedig 64,3%-kal kisebb értékeket kaptam. A denaturációs entalpia értékek csökkenésére hatással van a pácolás módja és a sótartalom értéke is (51. ábra). Az egyes mintákhoz tartozó sótartalom értékeket az oszlopok tetején tüntettem fel.

11. táblázat: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással, és mikrobuborékolattal kombinált nedves pácolással készített ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{mm}$) húsminták fehérjefrakcióinak denaturációs csúcshőmérsékletei és denaturációs entalpia értékei

Pácolás módja	Pácolási idő	Só tartalom [m/m%]	Denaturációs csúcshőmérséklet [°C]			Denaturációs entalpia [J/g]
			Miozin	Szarkoplazma fehérjék és kollagén	Aktin	
	Nyers karaj	0,12	$56,7 \pm 0,2$	$66,8 \pm 0,4$	$80,1 \pm 0,4$	$1,996 \pm 0,197$
Nedves pácolás	15. perc	3,25	-	-	$78,9 \pm 0,4$	$1,257 \pm 0,377$
	30. perc	4,62	-	-	$78,4 \pm 0,5$	$1,164 \pm 0,361$
	60. perc	6,28	-	-	$77,9 \pm 0,4$	$0,841 \pm 0,407$
	90. perc	7,74	-	-	$77,2 \pm 0,6$	$0,701 \pm 0,285$
Nedves pácolás+UH	15. perc	3,92	-	-	$77,8 \pm 0,3$	$1,206 \pm 0,321$
	30. perc	5,42	-	-	$77,5 \pm 0,5$	$0,926 \pm 0,375$
	60. perc	6,96	-	-	$76,6 \pm 0,5$	$0,791 \pm 0,213$
Nedves pácolás+mbUH	15. perc	4,24	-	-	$77,6 \pm 0,7$	$1,117 \pm 0,314$
	30. perc	5,83	-	-	$77,0 \pm 0,4$	$0,886 \pm 0,357$
	60. perc	7,51	-	-	$75,8 \pm 0,6$	$0,713 \pm 0,274$



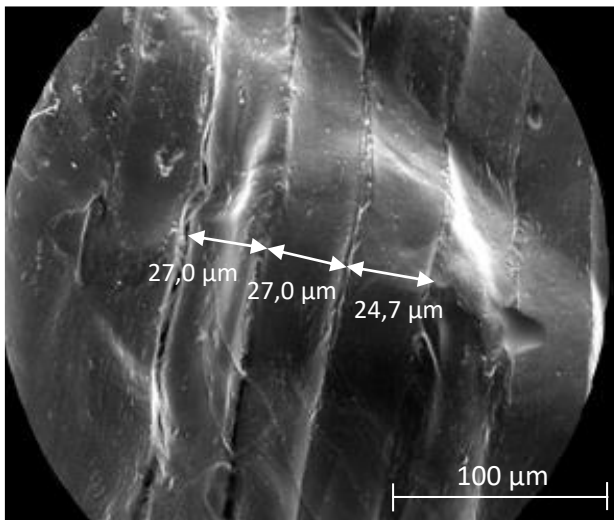
51. ábra: Denaturálható fehérjék mennyiségének alakulása nyers húshoz viszonyítva henger alakú húsminták ($d=15\text{mm}$; $h=80\text{mm}$) nedves-, ultrahanggal kombinált nedves-, és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolása során, és a sótartalom változása

A pácolási idő 90. percére csak a nedves (ultrahang és mikrobuborék nélkül) pácolt mintáknál maradt denaturálható fehérje, ami a nyers, pácolás nélküli húshoz viszonyítva 35,72% denaturálható fehérjemennyiséget jelent. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás alkalmazásával nagyobb mértékben csökkent a denaturációs entalpia értéke, ezáltal a denaturálható fehérjék mennyisége, ami kapcsolatba hozható a kavitáció okozta gyorsabb sódiffúzió eredményeként kialakult magasabb sótartalmával. A húsfhérjék nagyobb mértékű denaturációja könnyebben emészthető fehérjeforrást jelenthet.

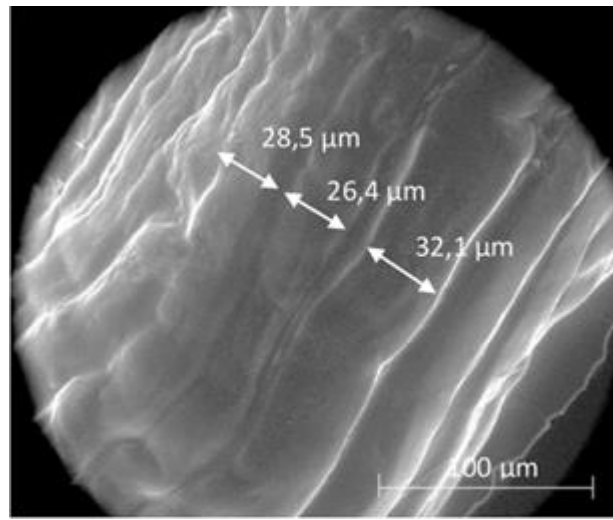
Az I. és a II. kísérlet fehérjedenaturációs eredményei alapján összeségében az állapítható meg, hogy az ultrahang és a kavitáció jelenségének hatására a magasabb sótartalom nagyobb mértékű denaturációt eredményez. Azonban részletesen vizsgálva az eredményeket az látható, hogy az egyes kísérletek eredményei adott sótartalmak mellett eltérőek. Ez alapján az a következtetés vonható le, hogy lehet más, feltehetőleg akusztikai jelenség is, ami befolyásolhatja a húsból a fehérjék denaturációját. Ilyen hatás lehet például az abszorpcióból származó hődenaturáció, a sugárnyomás vagy az akusztikai áramlás, melyekkel tovább növelhető az alkalmazott UH kezelés hatékonysága. Ezek a hatások konkrétan még nem ismertek, további vizsgálatok szükségesek ezek pontos megállapítására.

5.2.8. A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálat eredményei

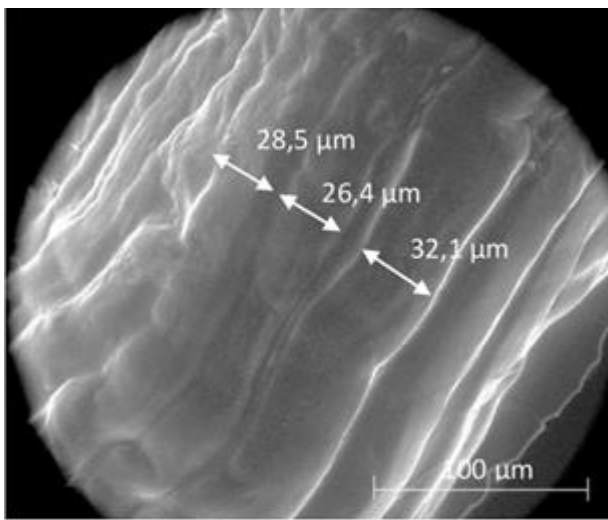
A húsminták mikroszerkezetének feltérképezésére pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatot végeztem. A képképzőhöz a 180 percig pácolt húsmintákat használtam. Amint az a 52. ábra látható, az ultrahangos, valamint a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos kezelés mikroszerkezeti változásokat okozott a hússzövetben.



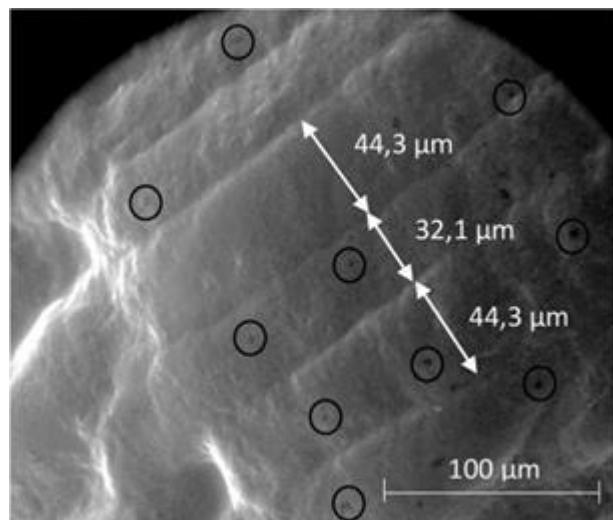
a



b



c



d

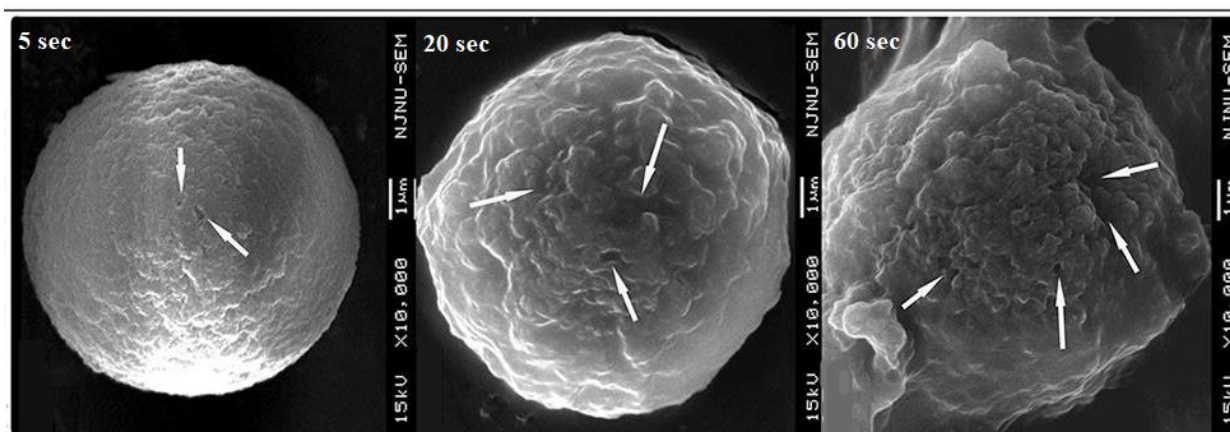
52. ábra: Nedves pácolással, ultrahanggal kombinált nedves pácolással (nedves pácolás+UH) és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (nedves pácolás+mbUH) pácolt henger alakú húsminták ($d=18\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$) pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) képei 180 perces pácolást követően, $1000\times$ -es nagyítás mellett. A fekete körök a pórusokat mutatják az mbUH kezelt mintákon.

a: nyers karaj; b: nedves pácolás; c: ultrahanggal kombinált nedves pácolás; d: mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolás.

Az ultrahangos kezelések hatására a rostvastagságok nőttek a nedves pácolású húsmintákhoz képest. A nedves pácolású húsok átlag $29,0 \pm 2,9\ \mu\text{m}$ rostvastagságot mutattak, amihez képest mind az ultrahanggal kombinált, mind a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású húsminták duzzadtabb rostvastagságot mutattak. A legnagyobb rostvastagság $40,2 \pm 7,0\ \mu\text{m}$ a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású húsmintánál látható. Az önmagában alkalmazott ultrahangos kezelés esetén is nagyobb húsrost vastagság látható ($38,1 \pm 2,1\ \mu\text{m}$) a nedves

pácolású húsmintához képest. A húrostok duzzadása az ultrahang által előidézett kavitáció jelenlétére vezethető vissza, amely a gyorsabb és ezáltal nagyobb mennyiségű só húsba való bejutásával a húrostokat alkotó miofilamentumok Na^+ és Cl^- ionokkal való gyorsabb feltöltődését, a közöttük lévő taszítóerő okán pedig a nagyobb mértékű duzzadást eredményezik.

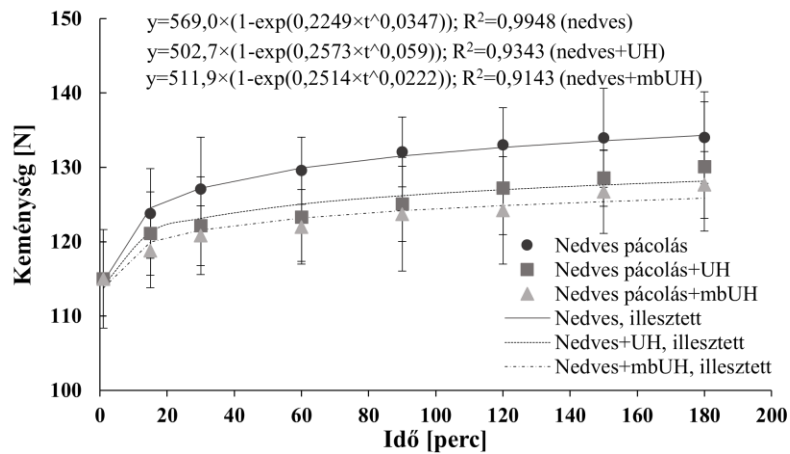
A mikrobuborékkal kombinált ultrahangos pácolású húsmintát ábrázoló felvételen a húrostok felületén apró, körülbelül 2-3 μm átmérőjű pórusok figyelhetők meg. A hagyományosan és az ultrahanggal pácolt minták felületén nem láthatók hasonló pórusok, így azok feltehetően a mikrobuborékok összeomlása által okozott sérülések következményei lehetnek. Meijering et al. (2009) hasonló eredményekre jutottak makromolekulák sejtekbe történő ultrahangos, és mikrobuborékos célzott bejuttatása terén. Elektronmikroszkópos eredményeik ún. szonoporációs pórusok kialakulását mutatták a sejtek felületén az ultrahangos kezeléseket követően, anélkül, hogy a sejt morfológiája jelentősen megváltozott volna. Hasonló pórusok megjelenéséről és azok növekedéséről számolt be Yang et al. (2020) az oszcilláló mikrobuborékok hatásának tanulmányozásának eredményeként (53. ábra).



53. ábra: Sejtpórus növekedése mikrobuborékos kezelés esetén (Yang et al., 2020)

5.2.9. Az állománymérés eredményei

A nedves pácolású, az ultrahanggal kombinált nedves pácolású és a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású húsminták keménységének alakulását az 54. ábra mutatja. A mért értékekre illesztett függvény az mbUH pácolás esetén gyengébb kapcsolatot mutatott ($R^2=0,9143$), mint a nedves- ($R^2=0,9948$), és az UH pácolás ($R^2=0,9343$) során.



54. ábra: Nedves pácolással, ultrahangos nedves pácolással és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos nedves pácolással készített húsminták ($d=15\text{ mm}$; $h=80\text{ mm}$) keménységének alakulása a pácolás során

A nyers húshoz ($114,99 \pm 6,64\text{ N}$) viszonyítva mindegyik pácolási mód húsmintáinak állománya szignifikánsan ($p < 0,001$) keményebb lett. A nedvesség, mint a húscukorok oldószerének húsból való távozásával a húsminták állományának keményedése figyelhető meg mindhárom pácolási móddal készült húsminta esetében. A nyers húshoz ($114,99 \pm 6,64\text{ N}$) viszonyítva a nedves pácolással készült minta állománya $133,99 \pm 6,16\text{ N}$ lett, az ultrahangos nedves pácolással készülté $130,09 \pm 8,69\text{ N}$, míg a mikrobuborékoltatással kombinált nedves pácolással kezelt mintáé $127,63 \pm 4,50\text{ N}$. Az ultrahang húspuhító hatását az előző kísérlethez (5.1.9. fejezet) hasonlóan ennél a kísérletnél is tapasztaltam: a nedves pácolással készült húsminták szignifikánsan ($p < 0,001$) keményebbnek bizonyultak az ultrahangos pácolású húsmintákhoz képest. Siró et al. (2009) kísérlete alapján 3 W/cm^2 intenzitás felett az ultrahang állománypuhító hatása kisebb mértékű, mint alacsonyabb intenzitás esetén. Az általam alkalmazott $5,09\text{ W/cm}^2$ intenzitás mellett a száraz és a nedves pácolással összehasonlítva azonban még érvényesül az ultrahang húspuhító hatása. A mikrobuborékoltatással kiegészített pácolás még puhább állományt eredményezett a csak ultrahang alkalmazásával előállított mintákhoz képest.

Összehasonlítva az I. és a II. kísérlet állománymérési adatait, elmondható, hogy a telített páclé/pácsó alkalmazása mellett mindegyik pácolási mód esetén nagyobb mértékű vízvesztés, ezáltal nagyobb mértékű keményedés tapasztalható. Míg a 20%-os páclé alkalmazásával a 15. percre a maximális vízvesztés (mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolás) 2,42% volt, addig a 26,3% alkalmazott koncentráció majdnem háromszor akkora, 6,6%-os (ultrahanggal kombinált pácolás) csökkenést eredményezett. A telített sókoncentráció alkalmazása esetén ezzel összefüggően a keménység változása is nagyobb mértékű volt.

5.3. A kisüzemi, pilot méretű mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kísérlet eredményei

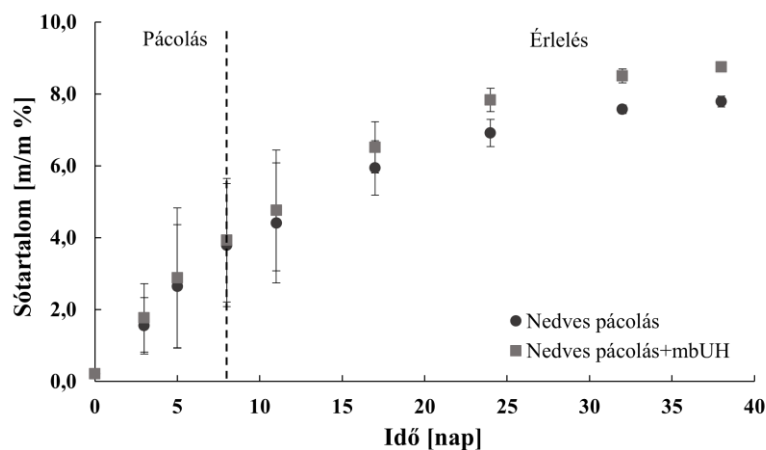
A III. kísérletben csont nélküli, bőrös sertéskaraj mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolását és érlelését végeztem el kisüzemi körülmények között. A húsok nedves pácolása 8 napig (20 m/m% páclé sókoncentráció), az azt követő érlelés pedig 30 napig tartott. Kontroll mintaként a mikrobuborékolatás és ultrahangozás nélkül nedves pácolt karaj minták szolgáltak.

5.3.1. A bőrös karaj sótartalmának változása a pácolás és érlelés során

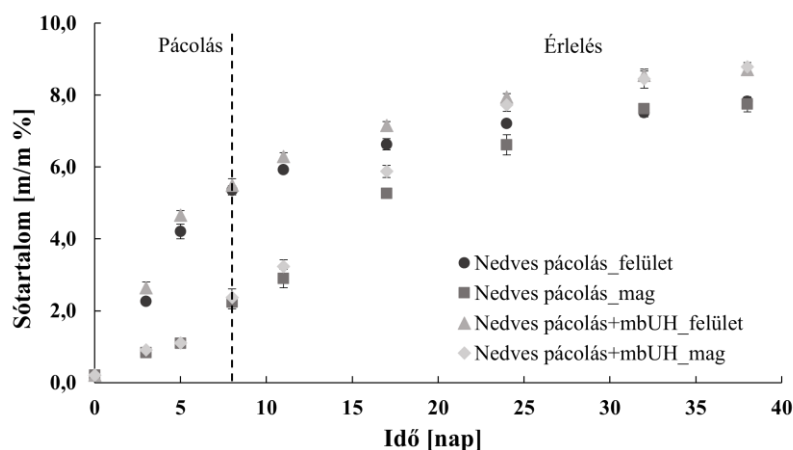
A karaj minták átlag sótartalmának alakulását a pácolás és érlelés során az 55. ábra mutatja. Függőleges vonal jelöli a pácolási művelet végét. Az eredményekből látható, hogy mind a nedves pácolású, mind a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karajok esetén jelentősen nőtt a sótartalom az idő függvényében. A pácolási időszakban (8. napig) a két módon pácolt minták sótartalom értékeinek felfutása nagyon hasonló, közöttük szignifikáns különbség nem mutatkozott ($p > 0,05$). Az 55. ábra látható átlag sótartalom körüli nagy szórások a pácolási időszakban a mag és a felület közötti nagy sótartalom különbségből adódnak (56. ábra). A nedves pácolású karaj minták esetén a végső sótartalom $7,79 \pm 0,15$ m/m%, míg a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karaj minták sótartalma $8,75 \pm 0,13$ m/m% lett az érlelési idő végére (38. nap). Az eredmények mutatják az ultrahang sóbehatolásra kifejtett hatását. A mikrobuborékok összeomlásának következtében kialakult microjetek átszakítják a húst alkotó izomrosthátyákat és a sejtek falát, ami azok átteresztőképességét növelve, könnyítik a só azokba való behatolását.

Az érlelés során a felület és a mag sótartalma mindkét pácolási mód esetén kiegyenlítődött. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás alkalmazásával a kiegyenlítődés a 24. napon következett be, a nedves pácolás esetén ez csak a 32. napon figyelhető meg (56. ábra). Így az ultrahang és a mikrobuborékok generálása a páclében kedvezően befolyásolta a sódiffúzió kinetikáját, és a sótartalom termékben történő kiegyenlítődését.

Az ultrahang hatásával kapcsolatban González-González et al. (2017) marhahús pácolási kísérletünkben arra a megállapításra jutottak, hogy az ultrahang pácolás során történő alkalmazása egyenletesebb sóeloszlást eredményez, mint az ultrahang nélkül végzett pácolás. Hasonló eredményről számoltak be Zhao and Eun (2018) is pácolt kínai kel esetében.



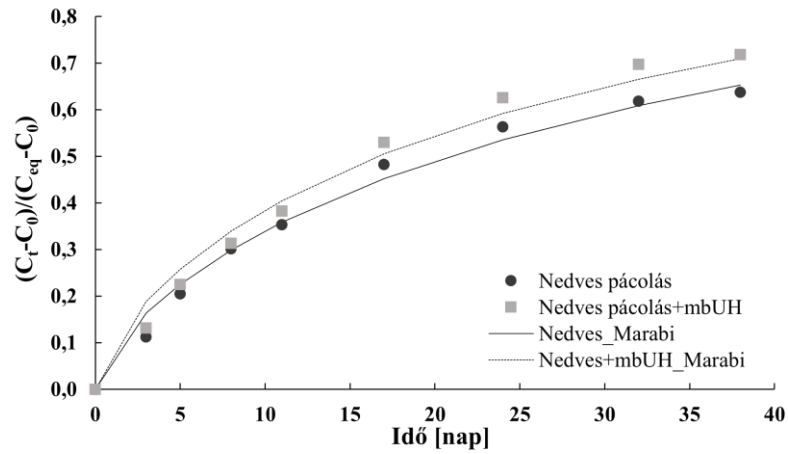
55. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (mbUH) pácolt sertéskaraj minták átlag sótartalmának alakulása a pácolás és érlelés során



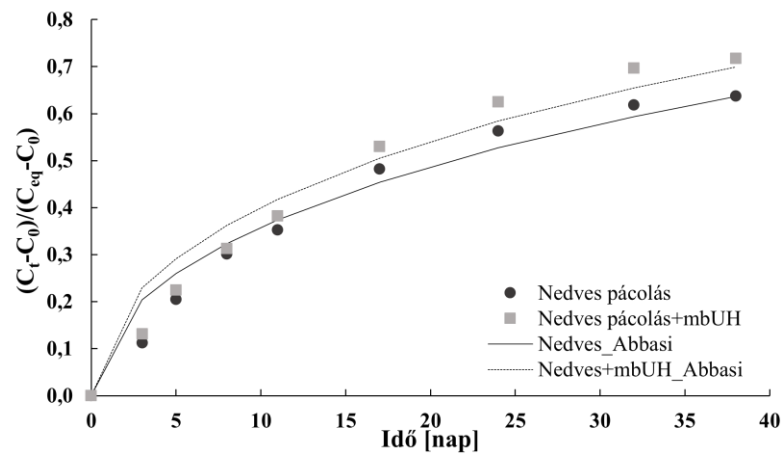
56. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (mbUH) pácolt sertéskaraj minták felületen és magközepén mért sótartalmának alakulása a pácolás és érlelés során

5.3.2. A sódiffúzió számításának (D_s) eredményei

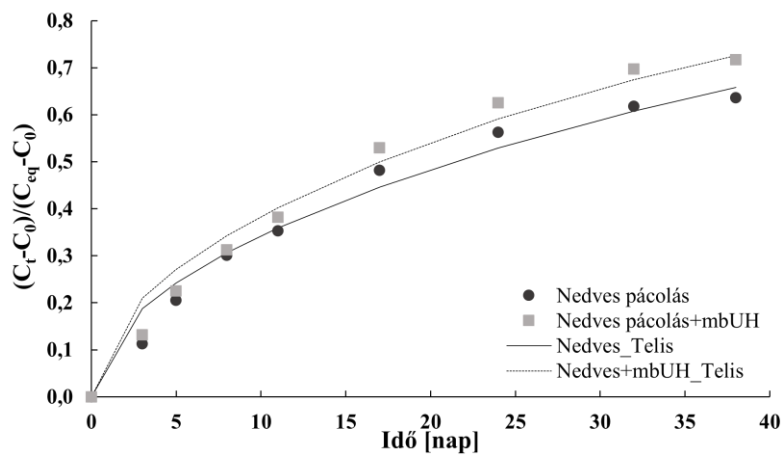
A kisüzemi körülmények között elvégzett kísérlet esetében is célom volt a pácolás során végbemenő anyagtranszport és diffúziós folyamatok modellezése, ezáltal a diffúziós tényezők meghatározása a diffúzió sebességének jellemzésére. Ehhez az előzőekben is alkalmazott diffúziós-, és anyagtranszport modelleket használtam. A nedves pácolású és a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású bőrös karajok relatív sómennyiségeire illesztett sódiffúziós modellek az 57. ábra láthatók. A modell és a mért értékek közötti korrelációt és a sódiffúziós tényező értékeket a 12. táblázat tartalmazza.



a



b



c

57. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással (mbUH) pácolt bőrös karaj relatív sótartalom $((C_t - C_0) / (C_{eq} - C_0))$ változásaira illesztett diffúziós modellek

a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

12. táblázat: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt bőrös karaj számított só diffúziós együttható (D_s) és a determinációs együttható (R^2) értékei

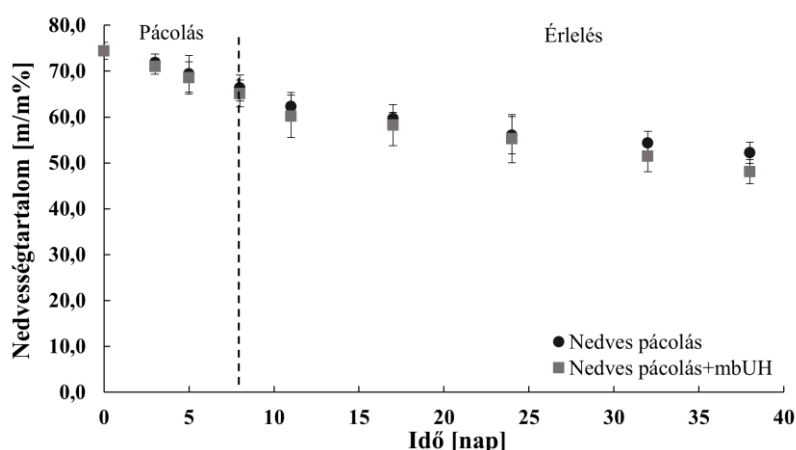
		Nedves pácolás	Nedves pácolás+mbUH
$D_s \times 10^{-11}$ (m ² /s)	Marabi	7,03	8,79
	Abbasi	6,97	8,92
	Telis	5,39	6,77
R^2	Marabi	0,9867	0,9814
	Abbasi	0,9567	0,9472
	Telis	0,9730	0,9729

A modellek és a mért értékek között mindhárom modell esetben szoros illeszkedést tapasztaltam ($R^2=0,9472-0,9867$). Az R^2 érték alapján legjobb illeszkedést a Marabi modell mutatta, így a só diffúzióját (D_s) e modell alapján értékeltem.

A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás alkalmazása során $D_s=8,79 \times 10^{-11}$ m²/s, a hagyományos nedves pácolás esetén $D_s=7,03 \times 10^{-11}$ m²/s diffúziós tényező értékek mutatkoztak. A kavitáció hatásának mikrobuborékok bevezetésével történő intenzívebbé tétele 1,25-szer gyorsabb sódiffúziót eredményez a nedves (kontroll) pácoláshoz képest. A diffúziós folyamatok ilyen mértékű növelése ipari szempontból nagy előnyt jelenthet, hiszen ez rövidebb pácolási és érlelési időtartamot tehet lehetővé.

5.3.3. A bőrös karaj nedvességtartalmának változása a pácolás és érlelés során

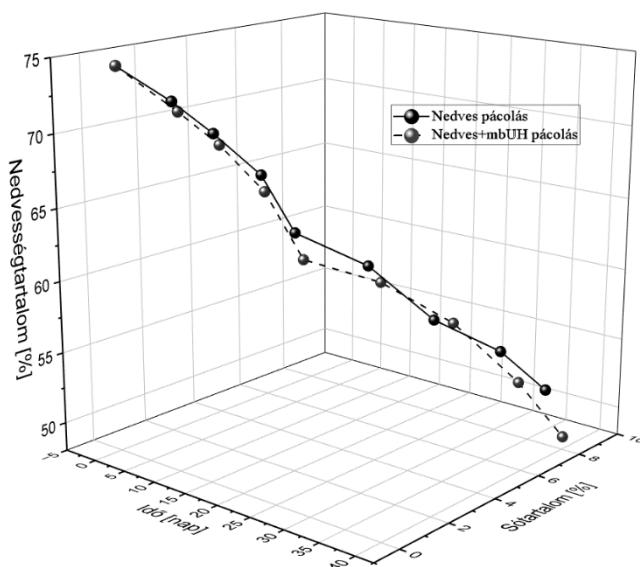
A pácolást 20 m/m%-os sókoncentrációjú páclében végeztem, aminek hatására a karaj minták nedvességtartalma már a pácolás műveletében is csökkenő tendenciát mutatott (58. ábra).



58. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt sertéskaraj minták nedvességtartalmának alakulása a pácolás és érlelés során az idő függvényében

A páclé sótartalmának nedvesség vándorlás irányára gyakorolt hatására irodalmi eredmények alapján az 5.1.3. fejezetben rámutattam. A pácolás időtartama alatt (8 nap) a két pácolási mód esetén nem mutatkozott jelentős különbség a nedvességtartalom értékek alakulásában ($p>0,05$). A kiindulási nedvességtartalomhoz képest az érlelés végére (38. nap) a karaj minták mindkét pácolási mód esetén (nedves pácolás: $60,25 \pm 2,33\%$; mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás: $58,15 \pm 2,64\%$) szignifikánsan kisebb értékeket mutattak ($p<0,001$). A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karajok esetében a nagyobb nedvességtartalom csökkenés az ultrahangos kezelés hatására a sejtfalakon kialakult perforációk által lehetővé tett könnyebb nedvesség távozásra vezethető vissza. Ez a technológiában előnyösnek tekinthető, mivel hagyományos pácolt termékek érlelése során – a proteo- és lipolitikus folyamatokon kívül – a húsok nedvességtartalmának eltávolítása, szárítása is műveleti cél.

A pácolási szakaszban a minták sófelvétele és vízleadása együtt megy végbe és a különböző módon pácolt minták esetén azok mértéke és sebessége hasonló (59. ábra). Az érlelési szakaszban a nedvességtartalom csökkenés a szárítási körülményeknek köszönhetően gyorsabb, mint a sófelvétel. Itt ugyanis már csak a sókoncentráció kiegyenlítődése megy végbe, a száradásnak köszönhetően a só koncentrációdik, további sófelvétel nem történik. Az mbUH pácolás hatására az anyagtranszport folyamatok gyorsabban mennek végbe, mint a nedves pácolás esetén, ami a kavitációs buborékok szerkezetromboló hatásával hozható összefüggésbe.

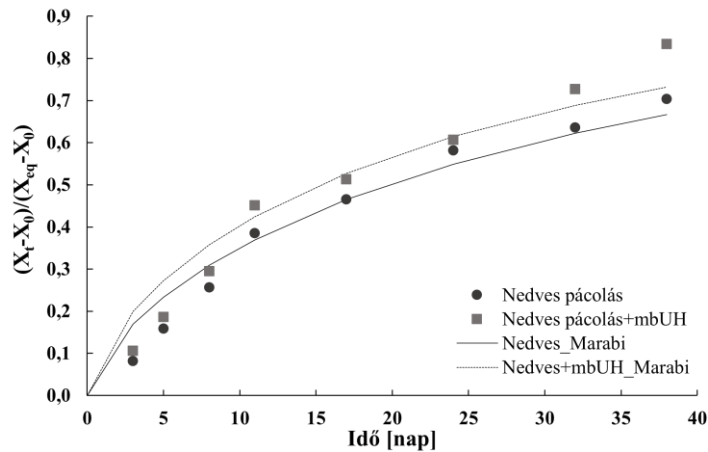


59. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt sertéskaraj minták só- és nedvességtartalmának alakulása a pácolás és érlelés során az idő függvényében

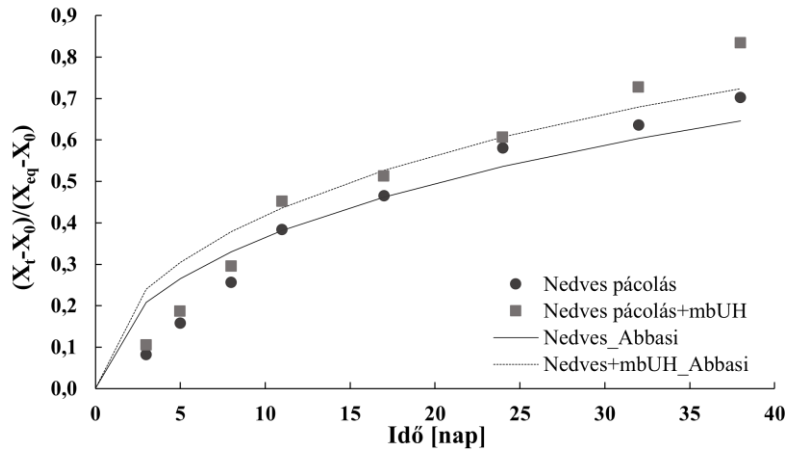
5.3.4. A vízdifúzió számításának (D_v) eredményei

A nedves pácolású és a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású bőrös karajok relatív nedvességtartalmára illesztett diffúziós modellek az 60. ábra láthatók. A modell és a mért értékek közötti korrelációt és a vízdifúziós tényező értékeit a 13. táblázat tartalmazza.

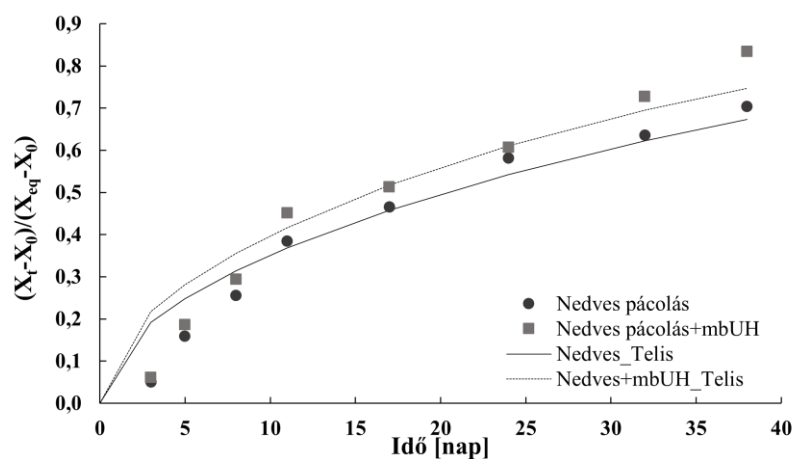
A modellek és a mért értékek között mindhárom modell esetben jó illeszkedést tapasztaltam ($R^2=0,8881-0,9542$). Az R^2 érték alapján legjobb illeszkedést a Marabi modell mutatta, így a víz difúzióját (D_v) e modell alapján értékeltem.



a



b



c

60. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt bőrös karaj relatív nedvességtartalom $((X_t - X_0) / (X_{eq} - X_0))$ változásaira illesztett diffúziós modellek

a) Marabi modell b) Abbasi modell c) Telis modell

13. táblázat: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt bőrös karaj számított víz diffúziós együttható (D_v) és a determinációs együttható (R^2) értékei

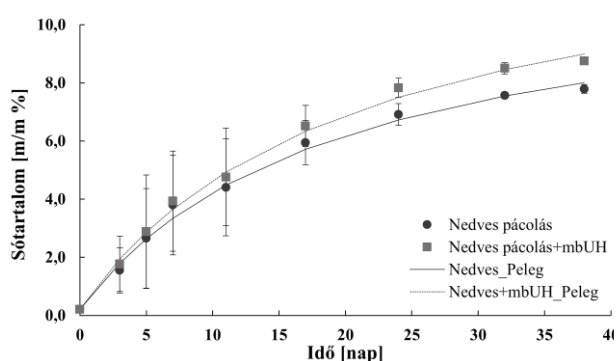
		Nedves pácolás	Nedves pácolás+mbUH
$D_v \times 10^{-11}$ (m ² /s)	Marabi	7,42	9,60
	Abbasi	7,26	9,82
	Telis	5,67	7,26
R^2	Marabi	0,9542	0,9343
	Abbasi	0,8976	0,8881
	Telis	0,8970	0,9089

A nedves pácolás esetén a vízdifúzió $D_v = 7,42 \times 10^{-11}$ m²/s, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás esetén pedig $D_v = 9,60 \times 10^{-11}$ m²/s értéket mutatott. Utóbbival gyorsabb vízdifúzió érhető el, ahogy az a nedvességtartalom változásában is látható. Ez 1,3-szor gyorsabb vízdifúziót jelent a mikrobuborék és ultrahang nélkül végzett pácoláshoz képest. Ahogy arra az előző fejezetben utaltam, a hagyományosan pácolt termékeknél az egyik fő cél a nedvesség eltávolítása a termékből, így a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés hatása előnyös a nedvesség távozásának sebességére nézve. Fontos azonban megjegyezni, hogy önmagában a nedvesség gyors távoztása termékhibához vezethet a túl gyors száradás miatt, ezért a légsebesség, hőmérséklet, relatív páratartalom folyamatos szabályozása elengedhetetlen. Amennyiben a hús felülete túl gyorsan szárad, kéreg képződhet, melynek következtében a belső rétegekből a nedvesség

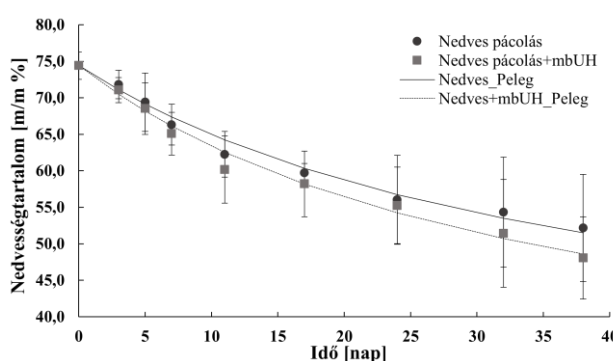
nem, vagy csak nagyon lassan tud távozni. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás alkalmazásával azonban ennek a hibának a lehetősége csökkenthető, mivel a kavitáció következtében kialakult mikroperforációkon keresztül a víz távozása a belsőbb húsrétegekből is biztosítható.

5.3.1. Az anyagtranszport modellek eredményei

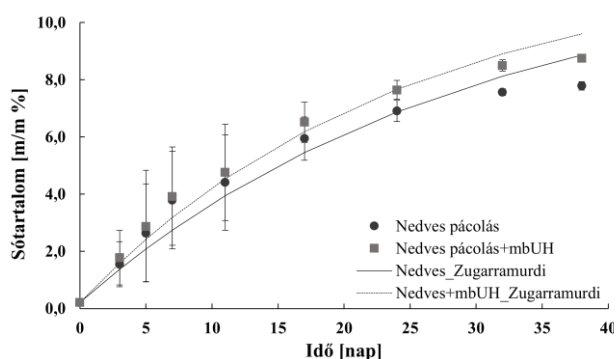
A tömegátadás kinetikájának jellemzésére ebben a kísérletben is geometriai megkötések nélkül alkalmazható empirikus modelleket (Peleg, Zugarramurdi és Lupín modell) használtam. A mért értékekre illesztett modellek az 61. ábra - 64. ábra, a modellek paraméterei pedig 14. táblázatban láthatók.



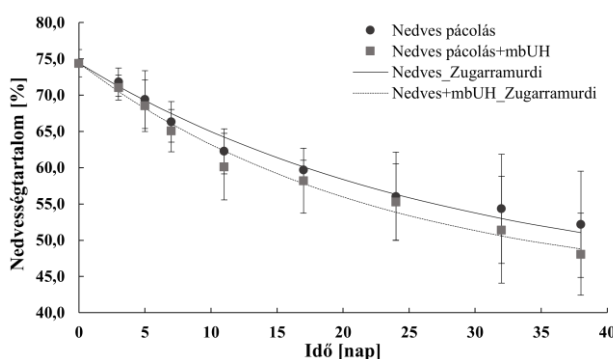
61. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással készített bőrös karaj sótartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



62. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált nedves pácolással készített bőrös karaj nedvességtartalmának változása és Peleg modell illesztése a mért adatokra



63. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással készített bőrös karaj sótartalmának változása és Zugarramurdi és Lupín modell illesztése a mért adatokra



64. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással készített bőrös karaj nedvességtartalmának változása és Zugarramurdi és Lupín modell illesztése a mért adatokra

14. táblázat: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (UH) készített bőrös karaj sótartalom és nedvességtartalom értékeire illesztett Peleg, és Zugarramurdi és Lupin modellek számított paraméterei (k_s , k_v , St_{eq} , Nt_{eq}) és a determinációs együttható (R^2) értékek

Modell	Paraméter	Nedves pácolás	Nedves pácolás+mbUH
Peleg	k_{s1}	1,639	1,515
	k_{s2}	0,085	0,074
	St_{eq} [%]	11,961	13,742
	R^2	0,9932	0,9956
	k_{v1}	0,845	0,705
	k_{v2}	0,021	0,020
	Nt_{eq} [%]	27,674	24,898
	R^2	0,9856	0,9865
Zugarramurdi	k_s	0,034	0,041
	R^2	0,9574	0,9796
	k_v	0,035	0,044
	R^2	0,9842	0,9861

Az R^2 értékek alapján a Peleg modell szoros illeszkedést mutatott a mért sótartalom ($R^2=0,9932-0,9956$) és nedvességtartalom értékekre ($R^2=0,9856-0,9865$).

A sebességi (k_{s1} , k_{v1}) állandók alapján – laboratóriumi kísérletek eredményéhez hasonlóan – a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás gyorsabb sófelvételt eredményezett ($k_{s1}=1,515$), mint a nedves pácolás ($k_{s1}=1,639$). Hasonló reláció mutatkozott a nedvességtartalom távozásának sebességében is ($k_{v1}=0,705$; $k_{v1}=0,845$). A sebességi állandók alapján a nedvesség távozásának kezdeti sebességére nagyobb hatása van a mikrobuborékok használatának, mint a sófelvételre.

A k_{s2} értékekből számolt egyensúlyi sótartalom (St_{eq}) a nedves pácolás alkalmazásával $St_{eq}=11,96\%$, míg a mikrobuborékos ultrahangos pácolásnál $St_{eq}=13,74\%$ értéket mutatott. Ez 13%-kal magasabb egyensúlyi sótartalmat jelent. Az MÉ 1-3/13-1 számú előírása szerinti maximális 5% sótartalom érték a modell alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással 2 nappal korábban elérhető a nedves pácoláshoz képest kb. 2,3-2,5 kg tömegű csont nélküli bőrös karaj esetén.

A Peleg modell alapján a nedves pácolással $Nt_{eq}=27,67\%$, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással pedig $Nt_{eq}=24,90\%$ egyensúlyi nedvességtartalom érhető el. Ez összhangban van az egyensúlyi sótartalom (St_{eq}) eredményekkel, hiszen minél több a hús sótartalma, annál kisebb a nedvességtartalom.

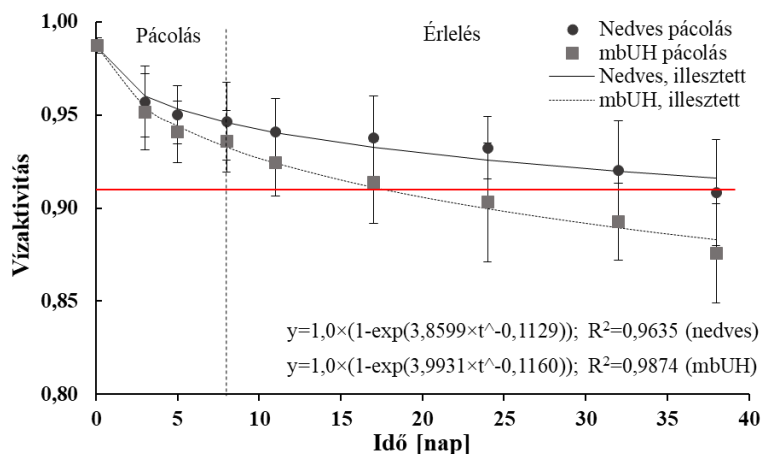
A Zugarramurdi és Lupin modell is jó illeszkedést mutatott a mért só- és nedvességtartalom értékekkel ($R^2=0,9574-0,9796$ és $R^2=0,9842-0,9861$) (14. táblázat). A k_s értékek alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás esetén ($k_s=0,041$) 1,2-szer gyorsabb sótartalom

növekedésének üteme a nedves pácoláshoz ($k_s=0,034$) képest. Hasonló reláció látható a nedves-tartalom változását mutató k_v értékek esetében is. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás ($k_v=0,044$) 1,3-szer gyorsabb nedves-tartalom csökkenést jelez előre a nedves pácoláshoz ($k_v=0,035$) képest.

A diffúziós modellekhez hasonlóan az empirikus modellek eredményei is a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés sófelvételt és vízleadást gyorsító hatását támasztják alá.

5.3.2. A vízkaktivitás (a_w) mérés eredményei

A vízkaktivitás (a_w) az élelmiszerekben lévő összes víztartalom belül annak a víznek a hányadát jelöli, amely a mikrobák számára hozzáférhető. Így ennek mértéke a termék mikrobiológiai stabilitásával és eltarthatóságával van szoros összefüggésben.



65. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt bőrös karaj vízkaktivitás értékeinek változása a pácolás és érlelés során

A kísérlet pácolási és érlelési szakaszában is az a_w érték folyamatos csökkenése látható (65. ábra). Ez egyrészt annak az eredménye, hogy már a pácolás során megkezdődik a víz távozása a húsból (5.3.3 fejezet), továbbá a húsba diffundáló só egy része kémiai kötésben tartja a húsból lévő szabad vizet, csökkentve így a hozzáférhető víz hányadát a teljes víztartalom belül (1 g NaCl kb. 0,3 g vizet tart kémiai kötésben). Másrészt az érlelés során a termék száradása is végbemegy. Ez idő alatt a víztartalom egy része fizikailag távozik a húsból. Ennek eredményeként a termékben lévő sótartalom – az oldószer mennyiségének csökkenés okán – koncentrálnodik és a maradék szabad vízzel további kémiai kötéseket alakíthat ki.

A bőrös karaj minták kiindulási a_w értéke ($0,9873 \pm 0,004$) az érlelés végére (38. nap) a nedves pácolás esetén $a_w=0,9082 \pm 0,028$, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás esetén pedig $a_w=0,8757 \pm 0,027$ értékig csökkent. Ezekhez az a_w értékekhez $7,79 \pm 0,15\%$, illetve

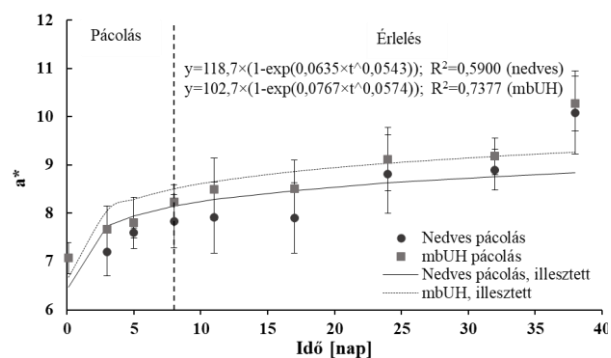
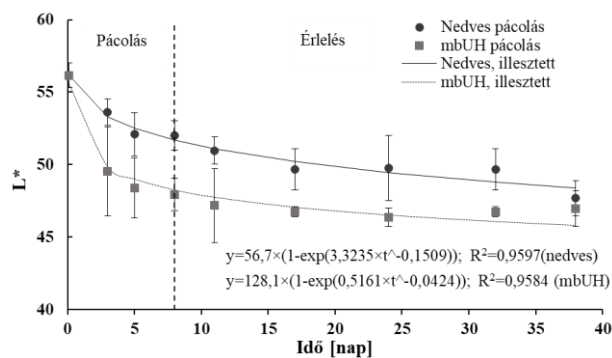
8,75±0,12% sótartalom értékek tartoznak, ami jelzi a nagyobb mennyiségű víz távozása okán a só húsban való koncentrációját is.

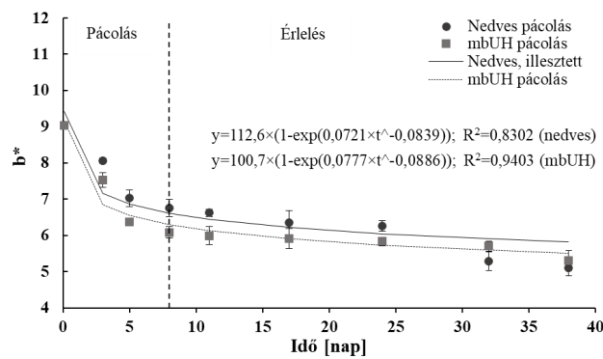
Az MÉ 1-3/13-1 előírása alapján a pácolt termékek vízaktivitás értéke maximum 0,91 lehet. Ezt a határt a 65. ábrán piros vonallal jelöltem. A mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolással készített karaj minták a_w értéke (0,9030 ±0,032) a 24. napra, míg a nedves pácolású termék a_w értéke (0,9082±0,028) a 38. napra csökkent a hivatkozott érték alá. A vízaktivitás érték alapján ez azt jelenti, hogy mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolás alkalmazásával kb. 14 nappal (kb. 36%-kal) rövidíthető a pácolási és az érlelési idő a nedves pácoláshoz képest, a kísérletben alkalmazott körülmények között.

5.3.3. A színmérés eredményei (L^* , a^* , b^* , ΔE^*)

A húsok és húskészítmények esetében a szín az egyik legfontosabb minőségi mutató, ami a vásárlói döntést alapvetően befolyásolja (Brewer and McKeith, 1999). A színmérés során kapott eredményeim a 66. ábra mutatja. Az objektív színtényezők esetén a mért értékekre illesztett exponenciális függvény nem mutatott szoros illeszkedést az a^* értékekre ($R^2=0,5900-0,7377$). A b^* esetén a nedves pácolt minták esetén kevésbé szoros illeszkedést tapasztaltam ($R^2=0,8302$), mint az mbUH pácolás esetén ($R^2=0,9403$).

A pácolás és érlelés során a húsminták világossága (L^*) csökkenő tendenciát mutatott (66. ábra). Ez a kiindulási, nyers karaj mintákhoz ($L^*=56,17 \pm 0,86$) képest mind a nedves pácolású ($L^*= 47,68 \pm 1,22$), mind a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású ($L^*= 46,95 \pm 1,24$) minták esetén szignifikáns csökkenésnek bizonyult ($p<0,001$). Az L^* érték csökkenése azt jelenti, hogy a karaj minták megjelenése az idő előre haladtával egyre sötétebb lett. A mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású minták L^* értékei a kísérlet teljes időtartama alatt alacsonyabbak voltak a nedves pácolású mintákhoz képest. A statisztikai eredmények alapján a pácolási módok hatása szignifikánsnak ($p<0,001$) is bizonyult a minták világossági tényezőjére nézve.





66. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) készített bőrös karaj világossági (L^*), vörös (a^*) és sárga (b^*) színtényezőinek változása a pácolás és érlelés során

A húsminták világosságának csökkenése háttérben egyrészt azt állhat, hogy a pácolást követően a húsok füstölésre kerültek, ami a felületük színét befolyásolja. Másrészt a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés esetén gyorsabb a nedvességtartalom csökkenése, mint a nedves pácolás esetén (5.3.3 fejezet, 58. ábra). A felületről távozó nedvesség hatására a húsfelületen lévő színyanyagok koncentrálnak, ami a világosság csökkenését eredményezheti. Továbbá a pácolás során a húsba jutó só módosítja a szövet ozmotikus egyensúlyát. Amikor só bejut a hús belső rétegeibe, megváltoztatja a miofilamentumok elektrosztatikus töltéseit, befolyásolja a fehérjék izoelektromos pontját, ezáltal növelheti a víztartó képességet. Ez mérsékeli a víz elérhetőségét a hús felületén, aminek eredményeként a fény visszaverődése – ebből adódóan a világossági tényező érték – csökken. Ezt támaszthatja alá Fernández-López et al. (2004) kutatási eredménye, akik különböző sókoncentráció hatását vizsgálták a hús színére, és megállapították, hogy a hús sótartalmának növekedésével a hús világossági tényezője (L^*) csökken. Sertés hús sózása és érlelése során bekövetkező világossági tényező (L^*) érték csökkenéséről számoltak be Poligne et al. (2002) is. Fontos megjegyezni, hogy a pácolás és érlelés körülményeinek kontrollálása nagyon lényeges a szárazsonkafélék gyártástechnológiájában, ugyanis a mioglobin oxidációja miatt felhalmozódó metmio globin és a felületi kiszáradás miatti sötétedés okozta elszíneződések a minőség nem kívánt változásán túl akár gazdasági veszteségeket is vezethet.

A húsminták vörös színtényező (a^*) értékében növekvő tendencia mutatkozott a pácolás és érlelés során (66. ábra). A kiindulási, nyers karajnál mért $a^*=7,27 \pm 0,32$ érték az érlelési szakasz végére a nedves pácolás esetén $a^*=10,08 \pm 0,86$, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás esetén pedig $a^*=10,27 \pm 0,57$ értékig emelkedett. A karaj minták a^* értékének növekedése a kiinduláshoz képest szignifikánsnak ($p<0,001$) is bizonyult. A mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású húsminták vörös színezete nem szignifikáns mértékben ($p>0,05$) ugyan, de

a pácolás és érlelés teljes időtartamában magasabbnak mutatkozott, mint a nedves pácolású hús-mintáké. A pácolt termékek vörös színezetének kialakításában elsősorban a nitrites pácsóban lévő nátrium-nitrit (NaNO_2) játszik lényeges szerepet. A nitrit, nitrogén-oxid formában reakcióba lép a mioglobinnal, kialakítva a nitrozo-mioglobin nevű stabil, vörös színű pigmentanyagot, ami a pácolt termékek jellegzetes vöröses színét adja. A nitrit a pácolás során a sóval együtt diffundál a húsba. Mivel a só diffúziója gyorsabbnak bizonyult az mbUH pácolás esetén, így feltehetőleg a nitrit húsba való diffúziója is gyorsabb volt, ami gyorsabb vörös színekialakulást eredményezett. A vörös színezet változása elsősorban a felületen figyelhető meg, ugyanis a szarkoplazma fehérjék – a mioglobint is ideérve – só általi kivonása történik a hús felszínére, ezáltal ott a hús vörös színezetének kialakulásához hozzájáruló vegyületek száma nő (Perez-Alvarez et al., 1997). A húsmin-ták vörös színezetében bekövetkező jelentősebb változás az érlelési szakaszban látható (66. ábra). Ekkor a húsokból nedvesség távozik, aminek hatására – sótartalomhoz hasonlóan – a vörös színezet adó nitrozo-mioglobin is bekoncentrálódik, vörösebb színezetet eredményezve.

A húsmin-ták sárga színezete (b^*) a pácolás és érlelés során csökkenő tendenciát mutatott (66. ábra). Az érlelési szakasz végére (38. nap) a nedves pácolású karajok sárga színtényező értéke $5,10 \pm 0,22$, a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karajoké pedig $5,30 \pm 0,28$ értékig csökkent, ami a kiindulási, nyers húshoz képest ($b^*=9,04 \pm 0,22$) szignifikáns csökkenést jelent ($p<0,001$). A pácolási módok között nem mutatkozott jelentős hatás ($p>0,05$) a karaj min-ták sárga színezetének változása tekintetében. A pácolt húsook sárga színezetének csökkenése a sónak a húsban lévő oxigén oldhatóságára és ezáltal a mioglobin átalakulására gyakorolt hatásának eredménye lehet. Posthuma et al. (2018) pácolt termékeknél szintén a sárga színezet csökkenését tapasztalták nitrites pácsó alkalmazása esetén.

A nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolással készített karaj min-ták mérésrel meghatározott objektív színtényező (L^* , a^* , b^*) értékei közötti színinger különbség (ΔE^*) Mokrzycki and Tatol (2011) alapján megfeleltethető az emberi színérzékelésnek (4.4.10 fejezet, 3. táblázat). A pácolt karaj min-ták közötti színekülönbségek, vagyis a ΔE^* értékek időbeli alakulását az itt látható táblázat tartalmazza.

15. táblázat: Nedves pácolással és mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos nedves pácolással készített bőrös karajok között vizuálisan érzékelhető színekülönbségek (ΔE^*) időbeli alakulása

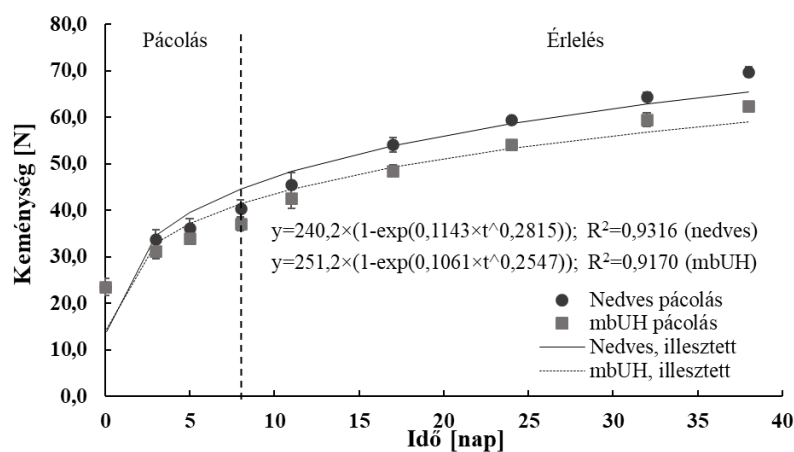
Idő [nap]	ΔE^*	Vizuálisan érzékelhető színekülönbség
3.	4,2	egyértelmű színekülönbség
5.	3,8	egyértelmű színekülönbség
8.	4,2	egyértelmű színekülönbség
11.	4,0	egyértelmű színekülönbség
17.	3,0	standard megfigyelő számára is érzékelhető különbség
24.	3,4	standard megfigyelő számára is érzékelhető különbség
32.	3,0	standard megfigyelő számára is érzékelhető különbség
38.	0,8	nem érzékelhető különbség

A pácolás művelete során (8. napig) a karaj minták között egyértelmű színekülönbség mutatkozott a nedves és a mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolású karajminták között (15. táblázat). Ez az objektív színtényezőket figyelembe véve a húsok világossága és sárga színezete közötti különbségre vezethető vissza. A pácolást követő érlelés során az emberi szem számára vizuálisan érzékelhető különbség csökkent. A mikrobuborékolattal kombinált ultrahangos pácolás ugyan hatással volt a bőrös karajok objektív színezetére, de az érlelés során a nedves pácolású karajokhoz képest érzékelhető színekülönbség csökkent, a késztermékek (38. nap) vizuális megjelenésében pedig már nem is volt érzékelhető.

Érdemesnek tartom megemlíteni azt, hogy Leães et al. (2023) eredményei alapján az ultrahangos pácolás alkalmazásával lehetőség nyílt nitritmentes pácolt hústermék előállítására. Kísérletükben 25 kHz frekvenciájú (650 W), 12 °C és 18 °C hőmérsékletű, 10 és 20 percig tartó ultrahangos kezelések nitrozo-pigmentek keletkezését eredményezték nitrit felhasználása nélkül készített sertés húspogácsában. A 12 °C-on, 20 percig tartó ultrahangos kezelés a vörös színezet (a^*) növekedését eredményezte, emellett még antioxidáns hatást is megfigyeltek. Ezek az ultrahang alkalmazását még hasznosabbá és indokoltabbá teszik a húsiparban, így kutatása a jövőben is indokolt.

5.3.4. Az állománymérés eredményei

A bőrös karaj minták keménysége a pácolás és érlelés során növekvő tendenciát mutatott (67. ábra), vagyis a minták egyre keményebbek lettek. Az adatokra illesztett exponenciális függvény szoros illeszkedést mutatott ($R^2=0,9170-0,9316$).



67. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) készített bőrös karaj keménységének alakulása a pácolás és érlelés során

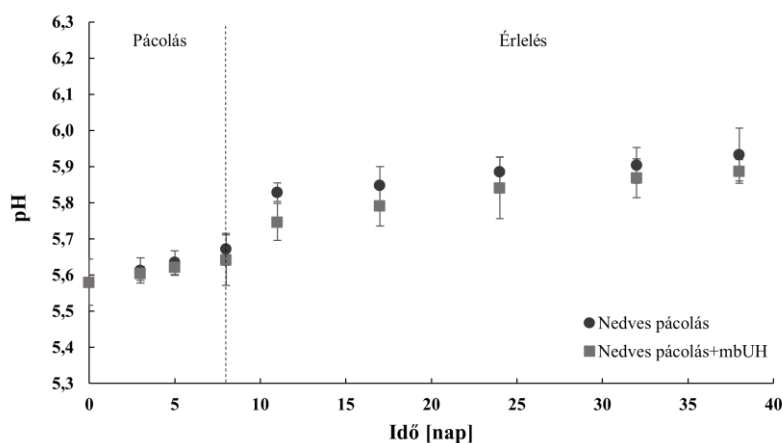
A késztermékek (38. nap) szignifikánsan ($p < 0,001$) keményebbek lettek a kiindulási, nyers karajok keménységéhez ($23,56 \pm 1,85$ N) képest. A karaj minták kiindulási keménység értéke kb. háromszorosára nőtt a nedves pácolás ($69,79 \pm 1,05$ N) és 2,7-szeresére a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolás ($62,44 \pm 0,91$ N) alkalmazása esetén. A keménység növekedése a pácolás és érlelés (szárítás) során bekövetkező nedvességtartalom csökkenésére vezethető vissza. A nedves pácolású karajok keménysége a pácolás és érlelés során végig magasabb volt, mint a mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolású karajoké. A nedvességtartalom távozása a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos pácolású karajoknál bizonyult gyorsabbnak (58. ábra), így azt várhatnánk, hogy ezek a húsok lesznek a keményebbek. A nedves pácolású karajokhoz képesti kisebb keménységük az ultrahang állománylazító hatására vezethető vissza. Az ultrahangos kezeléssel puhább, porhanyósabb húst lehet elérni a molekulák közötti gyenge kölcsönhatások megbontásával, ezáltal az izomrostok feltárásával, fellazításával. A hús zsengeségének javítása nagy jelentőséggel bír a húsipar számára, ezért az ultrahang állományra kifejtett hatását több tanulmányban is vizsgálták. Pan et al. (2022) kísérleti eredményei azt mutatták, hogy az ultrahangos kezelés (20 kHz, 350 W, 1 órán keresztül) jelentősen növeli az izomfehérjék oxidatív érzékenységet, ami javítja a pácolt húsok texturális tulajdonságait (keménység, rugalmasság és rághatóság) az ultrahang nélkül pácolt húsokhoz képest. Bao et al. (2022) kimutatták, hogy az ultrahangos előkezelés (300 W, 20 kHz) jelentősen csökkentheti a szárazon pácolt jakhús keménységét a proteolízis fokozása révén. E jelenséggel kapcsolatban korábbi tanulmányok hangsúlyozták, hogy az ultrahang pozitívan befolyásolhatja a proteáz és a lipáz aktivitását, ami hatással van a proteolízisre és a lipolízisre (Delgado-Povedano and Luque de Castro, 2015).

A mikrobuborékoltatással kombinált ultrahangos pácolású bőrös karajok keménysége ugyan kisebb volt a nedves pácolású karajokhoz képest, azonban a pácolási módok között csak az érlelés 38. napján mutatkozott szignifikáns különbség ($p < 0,001$).

5.3.5. A pH mérés eredményei

A pH a húsminőség értékelésének egyik alapvető paramétere. A vágás utáni pH érték alapján történik a nyersanyag osztályozása, mivel ez az izomfehérjék proteolízisével függ össze. Ez befolyásolja a hús víztartó képességén keresztül a hús állományát, ízletességét ezáltal a fogyasztók általi elfogadottságát. A pácolt sonkák esetén a pH érték befolyásolja az érlelési folyamat során a proteolitikus aktivitást is.

A pácolás és érlelés során a bőrös karajok pH értékének növekvő tendenciája látható mindkét pácolási mód esetén (68. ábra). A kiindulási, nyers bőrös karajok pH $5,58 \pm 0,06$ értékkel rendelkeztek, aminek pozitív hatása van az érlelés során lejátszódó proteolízisre, mivel az alacsony pH megváltoztatja a miofibrilláris szerkezetet és a fehérjéket hozzáférhetőbbé teszi a proteázok számára (Petrova et al., 2015).



68. ábra: Nedves pácolással és mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással (mbUH) pácolt bőrös sertéskarajok pH értékének változása a pácolás és érlelés során

A kiinduláshoz képest az érlelés végére (38. nap) mindkét pácolási mód esetén szignifikánsan nagyobb ($p < 0,001$) pH értékek mutatkoztak (nedves pácolás pH $5,93 \pm 0,10$; mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolás pH $5,89 \pm 0,03$). Jelentősebb pH növekedés látható a pácolás vége (8. nap) és az érlelés kezdeti (11. nap) szakasza között, ami a beinduló proteolízis eredményeként keletkező szabad aminosavak jelenlétével függhet össze. A hús pH értékének érlelés során történő növekedéséről számoltak be Seong et al. (2015) is száraz pácolású sertéskaraj esetében. Az érlelés során a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karajok nem szignifikánsan ($p > 0,05$), de alacsonyabb pH értéket mutattak a nedves pácolású karajokhoz képest.

6. 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.

Elsőként a száraz-, nedves-, valamint az ultrahanggal (20 kHz, 100W, 5,09 W/cm²) kombinált nedves pácolás hatását vizsgáltam sertéskaraj húshengerek (d=15 mm, h=80 mm) telített sóoldatban (páclében) (26,3 m/m%) való pácolása során lezajló anyagtranszport folyamatokra (só- és vízdifúzió), a fehérjék állapotára, a hús mikroszerkezetére, valamint állományára. Az eredmények alapján a 180 perces pácolás végére az ultrahangos nedves pácolás alkalmazásával 22,8%-kal, és 11,9%-kal 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 mikrocatornák alakulnak ki. Ezek a mikrocatornák gyorsabb difúziós folyamatokat tesznek lehetővé a pácolási folyamatok során. A só- és vízdifúzió sebességének összehasonlításához difúziós modellek (Abbasi Souraki et al., 2012; Marabi et al., 2003; Telis et al., 2003) alkalmazásával difúziós tényező értékeket (D, m²/s) számoltam. A difúziós tényező értékek alapján megállapítottam, hogy az ultrahangos nedves pácolással 1,5 és 2,0-szer gyorsabb sódifúzió 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 difúziója. A húsminták nedvességtartalma a kísérlet során az ultrahanggal kombinált nedves pácolás alkalmazása mellett csökkent a legnagyobb mértékben. Ennek a kezelésnek az alkalmazásával 1,3-szer és 1,6-szer gyorsabb vízdifúzió mutatkozott a nedves- és a száraz pácoláshoz képest. A pácolás során lezajló anyagtranszport folyamatok vizsgálatára empirikus modelleket (Peleg, 1988; Zugarramurdi és Lupín, 1980) is alkalmaztam. A Peleg modell használatával megállapítottam, hogy a só felvételének és a víz leadásának kezdeti sebessége az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással érhető el. A modell előrejelzése alapján a száraz pácolással szemben az ultrahanggal kiegészített nedves pácolással akár 43%-kal csökkenthető a pácolási idő, míg a nedves pácolással szemben 29%-os csökkenés érhető el. A telített sóoldatban történő pácolás során megfigyeltem, hogy a vízkötő képesség az egész kísérlet alatt csökken, és végig negatív értéket mutat. Ez a minták dehidratálódására utal, ami húsban elért magas sókoncentráció által kiváltott fehérjedenaturációval van összefüggésben. 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 húspan. A nedves pácolásnál a 60. (7,32 m/m% sótartalom), a száraz pácolásnál pedig még a 90. percben (7,98 m/m %) is kimutatható volt denaturálható fehérje. A húsminták mikroszerkezetének feltérképezésére pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatot végeztem. Az elkészített mikroszkópos képek alapján azt a megállapítást tettem, hogy 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.

II. kísérletemben a nedves-, ultrahanggal (20 kHz, 100 W, 5,09 W/cm²) kombinált nedves-, valamint mikrobuboroltatással kombinált ultrahangos (20 kHz, 100 W, 5,09 W/cm²) nedves pácolás hatását vizsgáltam. A pácolást 20 m/m% páclé koncentráció mellett végeztem el. 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. Megállapítottam, hogy a mikrobuborékos kezelés alkalmazásával 1,2-szer gyorsabb só-, és vízdifúzió érhető el az ultrahanggal kombinált nedves pácoláshoz, valamint 1,6-szer és 1,7-szer gyorsabb a nedves pácoláshoz képest. A Peleg modell használatával megállapítottam, hogy a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos nedves pácolással volt a leggyorsabb só felvételének és a víz leadásának kezdeti sebessége. A sebességállandók alapján a mikrobuborékok használata nagyobb mértékben befolyásolja a nedvesség távozásának kezdeti sebességét, mint a sófelvételt. A modell előrejelzése alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahang alkalmazásával 30%-kal csökkenthető a pácolási idő a nedves pácolással, és 11%-kal az ultrahangos pácolással szemben. 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 végbe megy. 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 mikroszkópos 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.

III. kísérletben csont nélküli, bőrös sertéskaraj mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos (35 kHz, 2,74 W/cm²) nedves pácolását (20 m/m% páclé sókoncentráció, 8 nap), valamint kiegészítő kezelések nélküli nedves pácolását és érlelését (30 nap) végeztem el kisüzemi körülmények között. A sótartalom mérés során kapott eredmények ebben a 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. Kísérletben az R² értékek alapján a só- és vízdifúzió értékek esetén is a legjobb illeszkedést a Marabi modell mutatta. Alkalmazásával megállapította, hogy kavitáció hatásának mikrobuborékok bevezetésével történő intenzívebbé tétele 1,25-szer gyorsabb sódiffúziót, és 1,3-szer gyorsabb vízdifúziót jelent a nedves pácoláshoz képest. A hagyományosan pácolt termékeknél az egyik fő cél a nedvesség eltávolítása a termékből, így a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés hatása előnyös a nedvesség távozásának sebességére nézve. 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 pácolási és érlelési szakaszban a húsminták vízaktivitás értéke folyamatosan csökkent, a karaj minták az előírt értéket a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezeléssel a 24. napra, a nedves pácolással a 38. napra érték el. Ez azt jelenti, hogy 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. Az érlelés során a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos pácolású karajok nem szignifikánsan, de alacsonyabb pH értéket mutattak a nedves pácolású karajokhoz képest.

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 kielégítése valósulhat meg.

7. 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) mikrobuborékolatással 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 mikrobuborékolatással 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 mikrobuborékolatással 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 mikrobuborékolatással 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 mikrobuborékolatással 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 mikrobuborékolatással 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.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A pácolás az egyik legrégebbi élelmiszertartósítási módszer, amely az ozmotikus dehidratáció elvén alapul. Pácolás során a só a húsba diffundál és ozmózis útján szabad vizet veszít, ami a hús vízáktívitásának (a_w) csökkenését eredményezi, növelve ezáltal a friss hús eltarthatóságát. Továbbá e tartósítási technológia alkalmazásával különleges érzékszervi tulajdonságokkal rendelkező termék állítható elő. Az utóbbi időben a húsipar számára a sózási, pácolási folyamat nyomonkövetésének javítása fontos cél, akár a túlsózás elkerülése, akár az alacsony sótartalmú termékek iránti növekvő kereslet kielégítése érdekében. A hagyományosan pácolt termékek előállítása lassú folyamat, több hetet, hónapot vehet igénybe. Ez a hosszú időtartam nem illeszthető be a mai kor igényeit kielégítő technológiába. A termelés és a kereskedelem összehangolása érdekében meghatározó a technológiai lépések gyorsítása, a késztermék minél hamarabbi előállítása. A tradicionális termékek iránti igény nagy, de ahhoz, hogy a fogyasztók igényeit ki lehessen elégíteni, a hagyományos termékek „új környezetbe” illesztése szükséges. Erre egy megoldás az ultrahang alkalmazása. A szakirodalmi kutatás során azt találtam, hogy a pácolás során alkalmazott ultrahangos kezelés pozitívan hat a só húsba történő diffúziójára. Arról azonban, hogy a páclében létrehozott mikrobuborékok milyen hatással vannak az anyagtranszport folyamatokra kevés információ áll rendelkezésünkre. Doktori kutatásom során ezért arra kerestem a választ, hogy az ultrahang valóban gyorsítja-e a só húsba való bejutását, ezáltal a nedvesség távozását, illetve, hogy a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos nedves pácolás vizsgálatával a páclében ultrahangtól függetlenül létrehozott mikrobuborékok tovább gyorsítják-e a só húsba való bejutását az ultrahang által létrehozott mikrobuborékokhoz képest. Ezek megállapításához összehasonlítottam:

- ❖ a száraz és nedves pácolás, valamint az ultrahanggal kombinált nedves pácolás hatását,
- ❖ a nedves pácolás, az ultrahanggal kombinált nedves pácolás, valamint a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos nedves pácolás hatását,
- ❖ kisüzemi pilot méretben a nedves pácolás és a mikrobuborékkal kombinált ultrahangos nedves pácolás hatását.

Kísérleteim során vizsgáltam a só- és víz diffúzióját, a hús vízkötő képességét, a fehérjék állapotát, a hús mikrostruktúráját és állományát. Az ipari körülmények között pácolt bőrös karaj minták esetén a só- és víz diffúziója mellett mértem a vízáktívitást, a színt, valamint a pH-t.

Kísérleti alapanyagként I. és II. kísérletemben henger alakú ($d=18$ mm, $h=30$ mm) sertéskarajt (*Longissimus dorsi*) használtam, III. kísérletemben 2,3-2,5 kg méretű bőrös karajok pácolását végeztem.

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, Zuggarramurdi 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 ultrahangos nedves pácolással jelentősen csökkenthető a pácolási idő a száraz- és a nedves pácolással szemben. A vízkötő képesség mindegyik pácolási mód esetén csökkent, ami a minták dehidratálódására utal. Ez összefüggésben áll a hús fehérjének denaturálódásával, ami már 15 perces pácolás után részben bekövetkezett, a miozin denaturációs csúcsa erre a mintavételi pontra mindegyik pácolási mód esetén eltűnt. A húsminták denaturációs entalpia értékeiben csökkenő tendencia volt megfigyelhető, a denaturálható fehérjék mennyisége az ultrahangos nedves pácolás esetén csökkent legnagyobb mértékben. A vízkötő képesség csökkenésének hatása az elektronmikroszkópos képeken és az állománymérés során kapott eredményekből is látható. A pácolás hatására a rostsálak 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 sótartalom 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% sókoncentrációjú 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 „kisózás” jelenségével magyarázható, ami már az első mintavételi pontnál (15. perc) tapasztalható. Ennél a pontnál ($\geq 3,25\%$ sótartalom) 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, körülbelül 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 húsban 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 sódifúziós 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 mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés során. Az MÉ 1-3/13-1 előírása alapján a pácolt termékek vízaktivitás (a_w) értéke legfeljebb 0,91 lehet. A vízaktivitás 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 színtényezőkre nem volt statisztikailag is alátámasztható hatása a pácolási módoknak. A kísérlet végére a mikrobuborékolatással 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 lezajló folyamatoknak volt jelentős hatása, a pácolási módoknak kevésbé.

Az eredmények alapján a mikrobuborékolatással kombinált ultrahangos kezelés alkalmazása a hús pácolása során rendkívül eredményes a só- és vízdifúzió gyorsítása, a vízaktivitás csökkentése, valamint a puhább állomány elérése szempontjából. Alkalmazásával a pácolási és érlelési idő csökkenthető, a termék minősége javítható.

A doktori munkám során több új megállapítást tettem, amellet, hogy újabb olyan kihívások merültek fel a tudományos életben, amelyek további kutatások alapját képezhetik.

SUMMARY

Curing is one of the oldest methods of food preservation, based on the principle of osmotic dehydration. During curing, salt diffuses into the meat while losing water by osmosis. This results in a decrease in water activity (a_w), thus increasing the shelf life of fresh meat. Furthermore, this preservation technology allows the production of a product with specific organoleptic properties. Improving the monitoring of the salting and curing process has recently become a primary objective for the meat industry, either to avoid over-salting or to meet the growing demand for low-salt products. The production of traditionally cured products is a slow process, which can take several weeks or months. This long period cannot be integrated into modern technology. In order to coordinate production and trade, it is essential to speed up the technological steps and produce the finished product as soon as possible. There is a great demand for traditional products, but in order to meet consumer needs, it is necessary to adapt traditional products to a "new environment". One solution is the use of ultrasound. In my literature research I found that ultrasonic treatment during the brining process accelerates the diffusion of salt into the meat. However, limited information is available on the effect of microbubbles generated in the brine on mass transport processes. My PhD research therefore investigated whether ultrasound does accelerate the diffusion of salt into the meat and thus the removal of moisture, and whether microbubbles created in the brine independently of ultrasound further accelerate the penetration of salt into the meat compared to ultrasound-generated microbubbles by investigating ultrasound wet curing combined with microbubbles. These were compared to determine:

- ❖ the effects of dry and wet curing and ultrasound assisted wet curing,
- ❖ the effect of wet curing, ultrasound assisted wet curing and ultrasound assisted wet curing with microbubbles,
- ❖ the effect of wet curing and ultrasound assisted wet curing with microbubble in small-scale pilot scale.

My experiments have investigated salt and water diffusion, meat water binding capacity, protein denaturation, meat microstructure and texture. In addition to salt and water diffusion, I measured water activity, colour and pH in samples of skin-on loin cured under industrial conditions.

In experiments I and II, I used cylindrical shape ($d=18$ mm, $h=30$ mm) of pork loin (*Longissimus dorsi*) as experimental material. In experiment III, I used 2.3-2.5 kg skin-on loins.

The ultrasound wet curing in saturated brine achieved significantly higher salt concentrations than dry curing. There is also a significant difference between the salt content values of wet and ultrasound assisted wet cured samples. The moisture content of the samples was the lowest during the ultrasound assisted wet curing. There was no significant difference between the samples. To

compare the diffusion rates, salt (D_s) and water (D_v) diffusion factors were determined using different mathematical models (Abbasi model, Marabi model, Telis model). In examining the accuracy of the models, I found that the Abbasi model showed the closest fit between measured and calculated values for both salt and water content measurement results. Wet curing supplemented with ultrasound achieves 2 times faster salt diffusion than dry curing and 1.5 times faster than wet curing. When testing the diffusion coefficient of water, I obtained a value 1.6 times higher with ultrasonic curing than with dry curing and 1.3 times higher than with wet curing. Empirical models (Peleg model, Zugarramurdi and Lupín models) were used to characterise the kinetics of mass transfer. Indicators calculated using these models also supported the faster salt uptake and moisture reduction achieved with ultrasonic treatment. Based on the equilibrium salinity (St_{eq}) values calculated using the Peleg model, ultrasonic wet curing can significantly reduce curing time compared to dry and wet curing. The water holding capacity is reduced for all curing modes, indicating dehydration of the samples. This is related to the denaturation of the meat proteins, which already partially occurred after 15 minutes of curing, with the myosin denaturation peak disappearing at this sampling point for all curing modes. The denaturation enthalpy values of meat samples showed a decreasing trend, with the amount of denaturable proteins decreasing the most in the ultrasound assisted wet curing. The effect of the decrease in water binding capacity is also evident from the electron microscopy images and the results obtained from the stock measurements. As a result of the curing, the diameter of the fibres decreased and the hardness of the samples increased. Ultrasound can achieve a softer texture than the other two curing methods.

The introduction of microbubbles in the brine further enhances the salt diffusion. The ultrasound assisted wet curing with microbubbles achieves a significantly higher salt content after 120 minutes of treatment than the ultrasound assisted brining. In Experiment II, the Abbasi model also showed the best relationship for salt diffusion, while the Telis model showed the best relationship for water diffusion. Ultrasound treatment in a 20 m/m% salt brine achieved 1.3 times faster salt diffusion than conventional wet curing, while ultrasound treatment with microbubble was 1.6 times faster. The ultrasound assisted brining with microbubbles can achieve 1,7 times faster water diffusion than traditional wet curing and 1,2 times faster than ultrasound assisted brining. Based on the Peleg model, microbubble assisted ultrasound brining can reduce curing time by 30% compared to conventional wet curing and 11% compared to ultrasound assisted brining. Water binding capacity also showed a decreasing tendency throughout the experiment, similar to that observed in Experiment I. The dehydration of the samples is caused by the phenomenon of "salting out", which is already observed at the first sampling point (15th minute). At this point ($\geq 3.25\%$ salt content), denaturation of proteins was already observed, with no denaturation peaks representing

myosin and sarcoplasmic proteins. When 20% brine was applied, despite the loss of water, swelling of the fibres was detected after 180 minutes of brining. In the images of the microbubble combined ultrasound sample, tiny pores of about 2-3 μm in diameter are observed on the surface of the meat fibres, presumably due to damage caused by the collapse of the microbubbles. This structure-destroying effect results in an even softer texture than ultrasound alone.

The use of microbubbles in laboratory-scale brining showed promising results, so I performed the experiment in pilot scale. For the industrial experiment, I used leather chops. Based on the salinity results, I concluded that ultrasound assisted wet curing supplemented with microbubbles can significantly shorten brining and ageing time due to the uniform and faster distribution of the brine throughout the meat. In Experiment III, the Marabi model was the most appropriate for the salt and water diffusion studies. Based on the salt diffusion coefficients calculated using the model, a 1,25 times faster salt diffusion can be achieved by using microbubbles compared to traditional wet curing. Water diffusion values 1,3 times higher were obtained for ultrasound assisted treatment combined with microbubble grafting. According to the Codex Alimentarius Hungaricus 1-3/13-1, water activity (a_w) of cured products must not exceed 0.91. Based on the water activity values, the addition of microbubbles to the brine results in a 14-day shorter brining and ageing time. In the case of the leathery loin, the lightness (L^*) value of the ultrasound combined with microbubbles samples was significantly lower. There was no statistically supported effect of brining methods on redness (a^*) and yellowness (b^*). However, at the end of the experiment, the ultrasound combined with microbubble grafting showed significantly softer samples. The pH values increased during the experiment. The pH values were not significantly affected by the brining methods.

The results show that the ultrasound combined with microbubble brining during meat curing is highly effective in accelerating salt and water diffusion, reducing water activity and achieving softer stock. It can shorten curing and ageing times and improve product quality.

In the course of my PhD work, I have made several new findings, in addition to new challenges in academia that could form the basis for further research.

MELLÉKLETEK

M1 Irodalomjegyzék

- 48/2016. (VII. 18.) FM rendelet, 2016. Magyar Élelmiszerkönyv kötelező előírásairól szóló 152/2009. (XI. 12.) FVM rendelet módosításáról, n.d.
- Aadil, R.M., Zeng, X.-A., Han, Z., Sun, D.-W., 2013. Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. *Food Chem.* 141, 3201–3206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.008>
- 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 Bioprod. Process.* 90, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.11.015>
- Agarwal, A., Ng, W.J., Liu, Y., 2011. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere* 84, 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Alamatian, S., Mohebbi, M., Varidi, M., Momen Nezhad, M., 2019. Modeling of osmotic treatment of ostrich meat coated by tragacanth and salep. *Meat Sci.* 156, 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.031>
- Andersen, R.H., Andersen, H.J., Bertram, H.C., 2007. Curing-induced water mobility and distribution within intra- and extra-myofibrillar spaces of three pork qualities. *Int. J. Food Sci. Technol.* 42, 1059–1066. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01341.x>
- Andres, A.I., Cava, R., Martin, D., Ventanas, J., Ruiz, J., 2005. Lipolysis in dry-cured ham: Influence of salt content and processing conditions. *Food Chem.* 90, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.013>
- AOAC, 1990. *Official Methods of Analysis*. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC
- Arnau, J., Gou, P., 2001. Effect of air relative humidity on ham rind and subcutaneous salted fat during the resting period. *Meat Sci.* 58, 65–68. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00132-7)
- Arnau, J., Gou, P., Comaposada, J., 2003. Effect of the relative humidity of drying air during the resting period on the composition and appearance of dry-cured ham surface. *Meat Sci.* 65, 1275–1280. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00036-6)
- Arnau, J., Guerrero, L., Gou, P., 1997. Effects of Temperature During the Last Month of Ageing and of Salting Time on Dry-Cured Ham Aged for Six Months. *J. Sci. Food Agric.* 74, 193–198. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199706\)74:2<193::AID-JSFA788>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199706)74:2<193::AID-JSFA788>3.0.CO;2-O)
- Arnau, J., Serra, X., Comaposada, J., Gou, P., Garriga, M., 2007. Technologies to shorten the drying period of dry-cured meat products. *Meat Sci.*, 53rd International Congress of Meat Science and Technology (53rd ICoMST) 77, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.015>

- Assis, F.R., Morais, R.M.S.C., Morais, A.M.M.B., 2017. Mathematical Modelling of Osmotic Dehydration Kinetics of Apple Cubes: Od of apple cubes in different process conditions. *J. Food Process. Preserv.* 41, e12895. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12895>
- Assis, F.R., Morais, R.M.S.C., Morais, A.M.M.B., 2016. Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between Mathematical Models. *Food Eng. Rev.* 8, 116–133. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9123-1>
- Astruc, T., 2014. Connective tissue: structure, function, and influence on meat quality, in: *Encyclopedia of Meat Sciences*. Elsevier, pp. 321–328. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00186-0>
- Aykın-Dinçer, E., 2021. Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. *Meat Sci.* 176, 108469. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108469>
- Azuara, E., Cortés, R., Garcia, H.S., Beristain, C.I., 1992. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *Int. J. Food Sci. Technol.* 27, 409–418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb01206.x>
- Bantle, M., Petrova, I., Raiser, J., Eikevik, T.M., 2014. Dynamic model and kinetics for convective drying of ham with different salt contents 6.
- Bao, G., Niu, J., Li, S., Zhang, L., Luo, Y., 2022. Effects of ultrasound pretreatment on the quality, nutrients and volatile compounds of dry-cured yak meat. *Ultrason. Sonochem.* 82, 105864. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105864>
- Barat, J.M., Grau, R., Ibáñez, J.B., Fito, P., 2005. Post-salting studies in Spanish cured ham manufacturing. Time reduction by using brine thawing–salting. *Meat Sci.* 69, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.05.020>
- Barat, J.M., Grau, R., Ibáñez, J.B., Pagán, M.J., Flores, M., Toldrá, F., Fito, P., 2006. Accelerated processing of dry-cured ham. Part I. Viability of the use of brine thawing/salting operation. *Meat Sci.* 72, 757–765. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.10.013>
- Barekat, S., Soltanizadeh, N., 2018. Effects of Ultrasound on Microstructure and Enzyme Penetration in Beef Longissimus lumborum Muscle. *Food Bioprocess Technol.* 11, 680–693. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2043-8>
- Barteri, M., Diociaiuti, M., Pala, A., Rotella, S., 2004. Low frequency ultrasound induces aggregation of porcine fumarase by free radicals production. *Biophys. Chem.* 111, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2004.04.002>
- Bermúdez-Aguirre, D., Corradini, M.G., Mawson, R., Barbosa-Cánovas, G.V., 2009. Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 10, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.11.005>
- Böcker, U., Ofstad, R., Bertram, H.C., Egelanddal, B., Kohler, A., 2006. Salt-Induced Changes in Pork Myofibrillar Tissue Investigated by FT-IR Microspectroscopy and Light Microscopy. *J. Agric. Food Chem.* 54, 6733–6740. <https://doi.org/10.1021/jf060178q>

- Boler, D.D., Woerner, D.R., 2017. What is meat? A perspective from the American Meat Science Association. *Anim. Front.* 7, 8–11. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0436>
- Brewer, M.S., McKeith, F.K., 1999. Consumer-rated Quality Characteristics as Related to Purchase Intent of Fresh Pork. *J. Food Sci.* 64, 171–174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb09885.x>
- Caraveo, O., Alarcon-Rojo, A.D., Renteria, A., Santellano, E., Paniwnyk, L., 2015. Physicochemical and microbiological characteristics of beef treated with high-intensity ultrasound and stored at 4 °C: Quality of beef after application of high-intensity ultrasound. *J. Sci. Food Agric.* 95, 2487–2493. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6979>
- Cárcel, J.A., Benedito, J., Bon, J., Mulet, A., 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Sci.* 76, 611–619. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.01.022>
- Carcel, J.A., Benedito, J., Mulet, A., Riera, E., 2003. Mass Transfer Effects During Meat Ultrasonic Brining 4.
- Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Benedito, J., Mulet, A., 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *J. Food Eng., International Conference on Food Innovation - foodInnova 2010* 110, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.038>
- Carlos A., G.-L., Armando, Q.-R., John, B., René R., B.-Q., Ricardo, T.-A., Jorge, J.-C., 2007. Effect of ultrasound on the mass transfer and physical changes in brine bell pepper at different temperatures. *J. Food Eng.* 81, 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.11.011>
- Cava, R., Ventanas, J., Florencio Tejeda, J., Ruiz, J., Antequera, T., 2000. Effect of free-range rearing and α -tocopherol and copper supplementation on fatty acid profiles and susceptibility to lipid oxidation of fresh meat from Iberian pigs. *Food Chem.* 68, 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00155-7)
- Chabbouh, M., Ben Hadj Ahmed, S., Farhat, A., Sahli, A., Bellagha, S., 2012. Studies on the Salting Step of Tunisian Kaddid Meat: Experimental Kinetics, Modeling and Quality. *Food Bioprocess Technol.* 5, 1882–1895. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0635-2>
- Chang, H.-J., Wang, Q., Tang, C.-H., Zhou, G.-H., 2015. Effects of Ultrasound Treatment on Connective Tissue Collagen and Meat Quality of Beef Semitendinosus Muscle: Ultrasound on Collagen and Meat Quality of Beef. *J. Food Qual.* 38, 256–267. <https://doi.org/10.1111/jfq.12141>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, Khan, M.K., 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem., European Society of Sonochemistry (ESS12)* 18, 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Chiralt, A., Fito, P., 2003. Transport Mechanisms in Osmotic Dehydration: The Role of the Structure. *Food Sci. Technol. Int.* 9, 179–186. <https://doi.org/10.1177/1082013203034757>
- Chiralt, A., Fito, P., Barat, J.M., Andrés, A., González-Martínez, C., Escriche, I., Camacho, M.M., 2001. Use of vacuum impregnation in food salting process. *J. Food Eng., Osmotic Dehydration* 49, 141–151. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00219-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00219-3)

- Clemente, G., Bon, J., García-Pérez, J.V., Mulet, A., 2007. Natural Convection Drying at Low Temperatures of Previously Frozen Salted Meat. *Dry. Technol.* 25, 1885–1891. <https://doi.org/10.1080/07373930701677967>
- Comaposada, J., Gou, P., Arnau, J., 2000. The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. *Meat Sci.* 55, 291–295. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00154-0)
- Committee, T.B.C.A., 2015. Composition of Meat.
- Corzo, O., Bracho, N., Rodríguez, J., 2012. Comparison of Peleg and Azuara et al. models in the modeling mass transfer during pile salting of goat sheets. *LWT - Food Sci. Technol.* 46, 448–452. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.12.002>
- Cox, D.W., St, L., 1995. Purification system and method 10.
- Cropotova, J., Tappi, S., Genovese, J., Rocculi, P., Laghi, L., Dalla Rosa, M., Rustad, T., 2021. Study of the influence of pulsed electric field pre-treatment on quality parameters of sea bass during brine salting. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 70, 102706. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102706>
- Csima G., 2015. Zselatin alapú édesipari termék reológiájának jellemzése (PhD). Corvinus University of Budapest, Budapest. <https://doi.org/10.14267/phd.2015035>
- Dahal, P., 2023. Sarcomere: Definition, Structure, Diagram, and Functions [WWW Document]. URL <https://microbenotes.com/sarcomere/> (accessed 1.30.24).
- Decker, E.A., Faustman, C., Lopez-Bote, C.J., 2000. Antioxidants in Muscle Foods: Nutritional Strategies to Improve Quality. John Wiley & Sons.
- Delgado-Povedano, M.M., Luque de Castro, M.D., 2015. A review on enzyme and ultrasound: A controversial but fruitful relationship. *Anal. Chim. Acta* 889, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.05.004>
- Devatkal, S.K., Naveena, B.M., 2010. Effect of salt, kinnow and pomegranate fruit by-product powders on color and oxidative stability of raw ground goat meat during refrigerated storage. *Meat Sci.* 85, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.01.019>
- Dhall, A., Halder, A., Datta, A.K., 2012. Multiphase and multicomponent transport with phase change during meat cooking. *J. Food Eng.* 113, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.030>
- Dijkink, R., Le Gac, S., Nijhuis, E., van den Berg, A., Vermes, I., Poot, A., Ohl, C.-D., 2008. Controlled cavitation–cell interaction: trans-membrane transport and viability studies. *Phys. Med. Biol.* 53, 375–390. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/2/006>
- Dimakopoulou-Papazoglou, D., Katsanidis, E., 2016. Mass transfer kinetics during osmotic processing of beef meat using ternary solutions. *Food Bioprod. Process.*, 29th EFFoST International Conference 100, 560–569. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.09.001>

- Dinçer, C., Topuz, A., 2015. Inactivation of *Escherichia coli* and Quality Changes in Black Mulberry Juice Under Pulsed Sonication and Continuous Thermosonication Treatments: Ultrasonication of *E. coli* in Black Mulberry Juice. *J. Food Process. Preserv.* 39, 1744–1753. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12406>
- Du, X., Li, H., Nuerjiang, M., Shi, S., Kong, B., Liu, Q., Xia, X., 2021. Application of ultrasound treatment in chicken gizzards tenderization: Effects on muscle fiber and connective tissue. *Ultrason. Sonochem.* 79, 105786. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105786>
- Elias, M., Laranjo, M., Potes, M.E., Agulheiro-Santos, A.C., Fernandes, M.J., Garcia, R., Fraqueza, M.J., 2020. Impact of a 25% Salt Reduction on the Microbial Load, Texture, and Sensory Attributes of a Traditional Dry-Cured Sausage. *Foods* 9, 554. <https://doi.org/10.3390/foods9050554>
- Erdoğdu, F., 2005. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *J. Food Eng.* 68, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.038>
- Estévez, M., Kylli, P., Puolanne, E., Kivikari, R., Heinonen, M., 2008. Fluorescence spectroscopy as a novel approach for the assessment of myofibrillar protein oxidation in oil-in-water emulsions. *Meat Sci.* 80, 1290–1296. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.004>
- Estévez, M., Ventanas, S., Cava, R., 2005. Protein Oxidation in Frankfurters with Increasing Levels of Added Rosemary Essential Oil: Effect on Color and Texture Deterioration. *J. Food Sci.* 70, c427–c432. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb11464.x>
- Estévez, M., Ventanas, S., Morcuende, D., Ventanas, J., 2014. Mediterranean Products, in: Toldrá, F., Hui, Y.H., Astiasarán, I., Sebranek, J.G., Talon, R. (Eds.), *Handbook of Fermented Meat and Poultry*. Wiley, pp. 361–369. <https://doi.org/10.1002/9781118522653.ch42>
- Fan, C.-H., Lin, C.-Y., Liu, H.-L., Yeh, C.-K., 2017. Ultrasound targeted CNS gene delivery for Parkinson's disease treatment. *J. Controlled Release* 261, 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.07.004>
- Feng, H., Barbosa-Canovas, G., Weiss, J. (Eds.), 2011. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing, Food Engineering Series*. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3>
- Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., 2008. Dehydration of Sapota (*Achras sapota* L.) Using Ultrasound as Pretreatment. *Dry. Technol.* 26, 1232–1237. <https://doi.org/10.1080/07373930802307118>
- Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., Pérez-Alvarez, J.A., Aranda-Catalá, V., 2004. Effect of sodium chloride, sodium triphosphate and pH on color properties of pork meat. *Color Res. Appl.* 29, 67–74. <https://doi.org/10.1002/col.10215>
- Flores, M., 2018. Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products. *Meat Sci., Quality and Integrity for Global Consumers. The 64th International Congress of Meat Science and Technology, Melbourne, Australia* 144, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.016>

- Flores, M., Aristoy, M.C., Antequera, T., Barat, J.M., Toldrá, F., 2009. Effect of prefreezing hams on endogenous enzyme activity during the processing of Iberian dry-cured hams. *Meat Sci.* 82, 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.017>
- Flores, M., Barat, J.M., Aristoy, M.-C., Peris, M.M., Grau, R., Toldrá, F., 2006. Accelerated processing of dry-cured ham. Part 2. Influence of brine thawing/salting operation on proteolysis and sensory acceptability. *Meat Sci.* 72, 766–772. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.10.008>
- Fox, J.B., 1980. Diffusion of chloride, nitrite, and nitrate in beef and pork. *J. Food Sci.* 45, 1740–1744. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb07601.x>
- Frank, D., Oytam, Y., Hughes, J., 2017. Sensory Perceptions and New Consumer Attitudes to Meat, in: *New Aspects of Meat Quality*. Elsevier, pp. 667–698. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00028-X>
- Friedrich L., 2008. Ultrahang alkalmazása húskészítmények minősítésében és gyártástechnológiájában. Budapesti Corvinus Egyetem.
- Gallego-Juarez, J.A., Rodriguez-Corral, G., Gálvez Moraleda, J.C., Yang, T.S., 1999. A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Dry. Technol.* 17, 597–608. <https://doi.org/10.1080/07373939908917555>
- Gandemer, G., 2002. Lipids in muscles and adipose tissues, changes during processing and sensory properties of meat products. *Meat Sci.* 62, 309–321. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00128-6)
- García-Garrido, J.A., Quiles-Zafra, R., Tapiador, J., Luque de Castro, M.D., 2000. Activity of cathepsin B, D, H and L in Spanish dry-cured ham of normal and defective texture. *Meat Sci.* 56, 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00005-X)
- Geiker, N., Bertram, H., Mejborn, H., Dragsted, L., Kristensen, L., Ruiz Carrascal, J., Bügel, S., Astrup, A., 2021. Meat and Human Health—Current Knowledge and Research Gaps. *Foods* 10, 1556. <https://doi.org/10.3390/foods10071556>
- Ghafoor, M., Misra, N.N., Mahadevan, K., Tiwari, B.K., 2014. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ultrason. Sonochem.* 21, 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016>
- Gil, M., Guerrero, L., Sárraga, C., 1999. The effect of meat quality, salt and ageing time on biochemical parameters of dry-cured Longissimus dorsi muscle. *Meat Sci.* 51, 329–337. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)00129-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)00129-6)
- Gogate, P.R., Kabadi, A.M., 2009. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochem. Eng. J., Invited Review Issue 2009* 44, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Gómez, J., Sanjuán, N., Arnau, J., Bon, J., Clemente, G., 2019. Modeling of sodium nitrite and water transport in pork meat. *J. Food Eng.* 249, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.01.008>

- Gómez, J., Sanjuán, N., Bon, J., Arnau, J., Clemente, G., 2015. Effect of temperature on nitrite and water diffusion in pork meat. *J. Food Eng.* 149, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.008>
- Gómez-Salazar, J.A., Ochoa-Montes, D.A., Cerón-García, A., Ozuna, C., Sosa-Morales, M.E., 2018. Effect of Acid Marination Assisted by Power Ultrasound on the Quality of Rabbit Meat. *J. Food Qual.* 2018, e5754930. <https://doi.org/10.1155/2018/5754930>
- González-González, L., Luna-Rodríguez, L., Carrillo-López, L.M., Alarcón-Rojo, A.D., García-Galicia, I., Reyes-Villagrana, R., 2017. Ultrasound as an Alternative to Conventional Marination: Acceptability and Mass Transfer. *J. Food Qual.* 2017, e8675720. <https://doi.org/10.1155/2017/8675720>
- Gou, P., Comaposada, J., Arnau, J., 2003. NaCl content and temperature effects on moisture diffusivity in the Gluteus medius muscle of pork ham. *Meat Sci.* 63, 29–34. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00048-7)
- Govari, M., Pexara, A., 2015. Nitrates and Nitrites in meat products. *J. Hell. Vet. Med. Soc.* 66, 127–140. <https://doi.org/10.12681/jhvms.15856>
- Graiver, N., Pinotti, A., Califano, A., Zaritzky, N., 2006. Diffusion of sodium chloride in pork tissue. *J. Food Eng.* 77, 910–918. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.018>
- Guo, L., Zhang, X., Guo, Y., Chen, Z., Ma, H., 2024. Evaluation of ultrasonic-assisted pickling with different frequencies on NaCl transport, impedance properties, and microstructure in pork. *Food Chem.* 430, 137003. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137003>
- Guo, W., Greaser, M.L., 2017. Muscle Structure, Proteins, and Meat Quality, in: *New Aspects of Meat Quality*. Elsevier, pp. 13–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00002-3>
- Gupta, P., Suresh, S., Jha, J.M., Banat, F., Sillanpää, M., 2021. Sonochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19, 2663–2687. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01157-9>
- Hamill, R., Botineştean, C., 2016. Meat: Structure, in: *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier, pp. 701–710. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00451-7>
- Hernot, S., Klivanov, A.L., 2008. Microbubbles in ultrasound-triggered drug and gene delivery. *Adv. Drug Deliv. Rev., Ultrasound in Drug and Gene Delivery* 60, 1153–1166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.03.005>
- Huang, J., Sun, L., Liu, H., Mo, Z., Tang, J., Xie, G., Du, M., 2020. A review on bubble generation and transportation in Venturi-type bubble generators. *Exp. Comput. Multiph. Flow* 2, 123–134. <https://doi.org/10.1007/s42757-019-0049-3>
- Huff-Lonergan, E., Lonergan, S.M., 2005. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. *Meat Sci., 51st International Congress of Meat Science and Technology (ICoMST)* 71, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.022>
- IDEC : Corporate Message [WWW Document], n.d. URL <https://www.idec.com/home/finbubble/bubble01.html> (accessed 2.15.22).

- ImmaculateJeyasanta, K., Prakash, S., Patterson, J., 2016. Wet and dry salting processing of double spotted queen fish *Scomberoides lysan* (Forsskål, 1775). *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*
- Inguglia, E.S., Zhang, Z., Tiwari, B.K., Kerry, J.P., Burgess, C.M., 2017. Salt reduction strategies in processed meat products – A review. *Trends Food Sci. Technol.* 59, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.016>
- Jambrak, A.R., Šimunek, M., Petrović, M., Bedić, H., Herceg, Z., Juretić, H., 2017. Aromatic profile and sensory characterisation of ultrasound treated cranberry juice and nectar. *Ultrason. Sonochem.* 38, 783–793. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.027>
- Jangjou, A., Meisami, A.H., Jamali, K., Niakan, M.H., Abbasi, M., Shafiee, M., Salehi, M., Hosseinzadeh, A., Amani, A.M., Vaez, A., 2021. The promising shadow of microbubble over medical sciences: from fighting wide scope of prevalence disease to cancer eradication. *J. Biomed. Sci.* 28, 49. <https://doi.org/10.1186/s12929-021-00744-4>
- Jayasooriya, S.D., Bhandari, B.R., Torley, P., D'Arcy, B.R., 2004. Effect of High Power Ultrasound Waves on Properties of Meat: A Review. *Int. J. Food Prop.* 7, 301–319. <https://doi.org/10.1081/JFP-120030039>
- Jónás G., 2021. A nagy hidrosztatikus nyomáskezelés hatásának vizsgálata a hús pácolása során. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, MATE, Budapest, p. 121.
- Kahraman, O., Lee, H., Zhang, W., Feng, H., 2017. Manothermosonication (MTS) treatment of apple-carrot juice blend for inactivation of *Escherichia coli* 0157:H7. *Ultrason. Sonochem.* 38, 820–828. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.024>
- Kajitani, S., Fukuoka, M., Sakai, N., 2011. Kinetics of Thermal Denaturation of Protein in Cured Pork Meat. *Jpn. J. Food Eng.* 12, 19–26. <https://doi.org/10.11301/jsfe.12.19>
- Kaneko, A., Gong, X., Takagi, S., Matsumoto, Y., 2013. Development of Microbubble Generator and its Utilization to Enhance the Mass Transfer in the Bubble Plumes and Columns. Presented at the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 191–196. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2012-72097>
- Kang, D., Gao, X., Ge, Q., Zhou, G., Zhang, W., 2017. Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification. *Ultrason. Sonochem.* 38, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.026>
- Kang, D., Zou, Y., Cheng, Y., Xing, L., Zhou, G., Zhang, W., 2016. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing. *Ultrason. Sonochem.* 33, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.024>
- Karshafian, R., Samac, S., Bevan, P.D., Burns, P.N., 2010. Microbubble mediated sonoporation of cells in suspension: Clonogenic viability and influence of molecular size on uptake. *Ultrasonics* 50, 691–697. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.01.009>

- Kentish, S., Ashokkumar, M., 2011. The Physical and Chemical Effects of Ultrasound, in: Feng, H., Barbosa-Canovas, G., Weiss, J. (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Springer New York, New York, NY, pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_1
- Keyhani, K., Guzmán, H.R., Parsons, A., Lewis, T.N., Prausnitz, M.R., 2001. Intracellular Drug Delivery Using Low-Frequency Ultrasound: Quantification of Molecular Uptake and Cell Viability. *Pharm. Res.* 18, 1514–1520. <https://doi.org/10.1023/A:1013066027759>
- Kim, Y.-B., Lee, H.-S., Francis, L., Kim, Y.-D., 2019. Innovative swirling flow-type microbubble generator for multi-stage DCMD desalination system: Focus on the two-phase flow pattern, bubble size distribution, and its effect on MD performance. *J. Membr. Sci.* 588, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117197>
- Klintham, P., Tongchitpakdee, S., Chinsirikul, W., Mahakarnchanakul, W., 2018. Two-step washing with commercial vegetable washing solutions, and electrolyzed oxidizing microbubbles water to decontaminate sweet basil and Thai mint: A case study. *Food Control* 94, 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.025>
- Knight, P., Parsons, N., 1988. Action of NaCl and polyphosphates in meat processing: Responses of myofibrils to concentrated salt solutions. *Meat Sci.* 24, 275–300. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(88\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0309-1740(88)90040-X)
- Körmendy, L., 1991. A pácolásnál játszódó fizikai folyamatok. II. Húsipari Továbbképző Napok, Pácolt termékek gyártásának elmélete és gyakorlata.
- Lametsch, R., Karlsson, A., Rosenvold, K., Andersen, H.J., Roepstorff, P., Bendixen, E., 2003. Postmortem Proteome Changes of Porcine Muscle Related to Tenderness. *J. Agric. Food Chem.* 51, 6992–6997. <https://doi.org/10.1021/jf034083p>
- Lawrie, R.A., Ledward, D.A., 2006. *Lawrie's meat science*, 7. ed. ed, Woodhead Publishing in food science, technology and nutrition. Woodhead Publ, Cambridge.
- Lazarides, H.N., Mitrakas, G.E., Matsos, K.I., 2007. Edible coating and counter-current product/solution contacting: A novel approach to monitoring solids uptake during osmotic dehydration of a model food system. *J. Food Eng.* 82, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.007>
- Leães, Y.S.V., Lorenzo, J.M., Seibt, A.C.M.D., Pinton, M.B., Robalo, S.S., Mello, R.D.O., Wagner, R., Barin, J.S., De Menezes, C.R., Campagnol, P.C.B., Cichoski, A.J., 2023. Do ultrasound form spontaneously nitrous pigments in nitrite-free pork meat batter? *Meat Sci.* 203, 109231. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109231>
- Leal-Ramos, M.Y., Alarcon-Rojo, A.D., Mason, T.J., Paniwnyk, L., Alarjah, M., 2011. Ultrasound-enhanced mass transfer in Halal compared with non-Halal chicken. *J. Sci. Food Agric.* 91, 130–133. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4162>
- Li, J., Song, Y., Yin, J., Wang, D., 2017. Investigation on the effect of geometrical parameters on the performance of a venturi type bubble generator. *Nucl. Eng. Des.* 325, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.10.006>

- Li, W., Gamlath, C.J., Pathak, R., Martin, G.J.O., Ashokkumar, M., 2021. Ultrasound – The Physical and Chemical Effects Integral to Food Processing, in: Innovative Food Processing Technologies. Elsevier, pp. 329–358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22679-6>
- Li, W., Leong, T.S.H., Ashokkumar, M., Martin, G.J.O., 2018. A study of the effectiveness and energy efficiency of ultrasonic emulsification. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 20, 86–96. <https://doi.org/10.1039/C7CP07133G>
- Li, X., Liu, C., Liu, F., Zhang, X., Peng, Q., Wu, G., Lin, J., Zhao, Z., 2023. Accelerated removal of five pesticide residues in three vegetables with ozone microbubbles. *Food Chem.* 403, 134386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134386>
- Lu, J., Jones, O.G., Yan, W., Corvalan, C.M., 2023. Microbubbles in Food Technology. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 14, 495–515. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-052720-113207>
- Majou, D., Christieans, S., 2018. Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats. *Meat Sci.* 145, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.013>
- Malek, M.N.F.A., Hussin, N.M., Embong, N.H., Bhuyar, P., Rahim, M.H.Ab., Govindan, N., Maniam, G.P., 2020. Ultrasonication: a process intensification tool for methyl ester synthesis: a mini review. *Biomass Convers. Biorefinery.* <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01100-6>
- 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>
- Marriott, N.G., Tracy, J.B., Kelly, R.F., Graham, P.P., 1983. Accelerated Processing of Boneless Hams to Dry-Cured State. *J. Food Prot.* 46, 717–721. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-46.8.717>
- Martín, L., Córdoba, J.J., Antequera, T., Timón, M.L., Ventanas, J., 1998. Effects of salt and temperature on proteolysis during ripening of Iberian ham. *Meat Sci.* 49, 145–153. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(97\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(97)00129-0)
- Mason, T.J., Cobley, A.J., Graves, J.E., Morgan, D., 2011. New evidence for the inverse dependence of mechanical and chemical effects on the frequency of ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 18, 226–230. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.05.008>
- Mason, T.J., Peters, D., 2002. *Practical Sonochemistry: Power Ultrasound Uses and Applications.* Woodhead Publishing.
- Mawarni, D.I., Juwana, W.E., Yuana, K.A., Budhijanto, W., Deendarlianto, Indarto, 2022. Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using the swirl flow type of microbubble generator. *J. Water Process Eng.* 48, 102846. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102846>

- McDonnell, C. K., Allen, P., Morin, C., Lyng, J.G., 2014. The effect of ultrasonic salting on protein and water–protein interactions in meat. *Food Chem.* 147, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.125>
- McDonnell, Ciara K., Lyng, J.G., Arimi, J.M., Allen, P., 2014. The acceleration of pork curing by power ultrasound: A pilot-scale production. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 26, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.05.004>
- McNeill, S.H., 2014. Inclusion of red meat in healthful dietary patterns. *Meat Sci., Meat Science, Sustainability & Innovation: ‘60th International Congress of Meat Science and Technology 17-22 August 2014, Punta del Este, Uruguay’* 98, 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.028>
- Meijering, B.D.M., Juffermans, L.J.M., van Wamel, A., Henning, R.H., Zuhorn, I.S., Emmer, M., Versteilen, A.M.G., Paulus, W.J., van Gilst, W.H., Kooiman, K., de Jong, N., Musters, R.J.P., Deelman, L.E., Kamp, O., 2009. Ultrasound and Microbubble-Targeted Delivery of Macromolecules Is Regulated by Induction of Endocytosis and Pore Formation. *Circ. Res.* 104, 679–687. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.108.183806>
- Miller, D.L., Bao, S., Morris, J.E., 1999. Sonoporation of cultured cells in the rotating tube exposure system. *Ultrasound Med. Biol.* 25, 143–149. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(98\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(98)00137-9)
- Mokrzycki, W., Tatol, M., 2011. Color difference Delta E - A survey. *Mach. Graph. Vis.* 20, 383–411.
- Mondal, J., Lakkaraju, R., Ghosh, P., Ashokkumar, M., 2021. Acoustic cavitation-induced shear: a mini-review. *Biophys. Rev.* 13, 1229–1243. <https://doi.org/10.1007/s12551-021-00896-5>
- Muthukumar, S., Yang, K., Seuren, A., Kentish, S., Ashokkumar, M., Stevens, G.W., Grieser, F., 2004. The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry. *Sep. Purif. Technol., Selected Papers from the 9th APPChE Conference, September 2002, Christchurch, New Zealand* 39, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.12.013>
- Navarro-Becerra, J.A., Song, K.-H., Martinez, P., Borden, M.A., 2022. Microbubble Size and Dose Effects on Pharmacokinetics. *ACS Biomater. Sci. Eng.* 8, 1686–1695. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.2c00043>
- Nitrites pácsó 1000gr. - Böllérbolt webáruház [WWW Document], n.d. URL <https://www.bollerbolt.hu/termek-reszletek/nitrites-pacso-1000gr-240> (accessed 1.30.24).
- Ochoa-Martinez, C.I., Ramaswamy, H.S., Ayala-Aponte, A.A., 2007. A Comparison of Some Mathematical Models Used for the Prediction of Mass Transfer Kinetics in Osmotic Dehydration of Fruits. *Dry. Technol.* 25, 1613–1620. <https://doi.org/10.1080/07373930701590665>
- Offer, G., Trinick, J., 1983. On the mechanism of water holding in meat: The swelling and shrinking of myofibrils. *Meat Sci.* 8, 245–281. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(83\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0309-1740(83)90013-X)

- Ohl, C.-D., Arora, M., Ikink, R., de Jong, N., Versluis, M., Delius, M., Lohse, D., 2006. Sonoporation from Jetting Cavitation Bubbles. *Biophys. J.* 91, 4285–4295. <https://doi.org/10.1529/biophysj.105.075366>
- Ojha, K.S., Keenan, D.F., Bright, A., Kerry, J.P., Tiwari, B.K., 2016. Ultrasound assisted diffusion of sodium salt replacer and effect on physicochemical properties of pork meat. *Int. J. Food Sci. Technol.* 51, 37–45. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13001>
- Ojha, K.S., Tiwari, B.K., O'Donnell, C.P., 2018. Effect of Ultrasound Technology on Food and Nutritional Quality, in: *Advances in Food and Nutrition Research*. Elsevier, pp. 207–240. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.01.001>
- Öner, M., Yildirim, A., Bayram, M., 2010. Modeling of Water Absorption of Ultrasound Applied Chickpeas (*Cicer arietinum* L.) Using Peleg's Equation. *J. Agric. Sci.* 16, 278–286. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001148
- Ortiz, A., González, E., García-Torres, S., Gaspar, P., Tejerina, D., 2021. Do animal slaughter age and pre-cure freezing have a significant impact on the quality of Iberian dry-cured pork loin? *Meat Sci.* 179, 108531. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108531>
- Ozuna, C., Puig, A., García-Pérez, J.V., Mulet, A., Cárcel, J.A., 2013. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. *J. Food Eng.* 119, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.016>
- Pan, J., Li, C., Liu, X., He, L., Zhang, M., Huang, Shuangjia, Huang, Shanfen, Liu, Y., Zhang, Y., Jin, G., 2022. A multivariate insight into the organoleptic properties of porcine muscle by ultrasound-assisted brining: Protein oxidation, water state and microstructure. *LWT* 159, 113136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113136>
- Park, S.-Y., Kim, H.-Y., 2022. Effect of wet- and dry-salting with various salt concentrations on pork skin for extraction of gelatin. *Food Hydrocoll.* 131, 107772. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107772>
- Parmar, R., Majumder, S.K., 2013. Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification—A state-of-the-art report. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 64, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.002>
- Pegg, R.B., Shahidi, F., 2008. *Nitrite Curing of Meat: The N-Nitrosamine Problem and Nitrite Alternatives*. John Wiley & Sons.
- Peleg, M., 1988. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *J. Food Sci.* 53, 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>
- Peña, M., Alarcon-Rojo, A., Renteria, A., Garcia-Galicia, I., Santellano-Estrada, E., Quintero-Ramos, A., Luna, L., 2017. Quality and sensory profile of ultrasound-treated beef. *Ital. J. Food Sci.* 29, 463–475.
- Perez-Alvarez, J.A., Sanchez-Rodríguez, E., Fernandez-Lopez, J., Gago-Gago, M.A., Ruíz-Peluffo, C., Rosini, M., Pagan-Moreno, M.J., Lopez-Santovenia, F., Aranda-Catalá, V.,

1997. Chemical and color characteristics of “Lomo embuchado” during salting seasoning. *J. Muscle Foods* 8, 395–411. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.1997.tb00728.x>
- Petrova, I., Aasen, I.M., Rustad, T., Eikevik, T.M., 2015. Manufacture of dry-cured ham: a review. Part 1. Biochemical changes during the technological process. *Eur. Food Res. Technol.* 241, 587–599. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2490-2>
- Pighin, D.G., Sancho, A.M., Gonzalez, C.B., 2008. Effect of salt addition on the thermal behavior of proteins of bovine meat from Argentina. *Meat Sci., Beef Up Your Tango - Meat Research in Argentina* 79, 549–556. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.12.011>
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., Chemat, F., 2013. Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. *Food Control* 31, 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.039>
- Pinotti, A., Graiver, N., Califano, A., Zaritzky, N., 2002. Diffusion of Nitrite and Nitrate Salts in Pork Tissue in the Presence of Sodium Chloride. *J. Food Sci.* 67, 2165–2171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09521.x>
- Pöhl, H., 2016. Applications of Different Curing Approaches and Natural Colorants in Meat Products, in: *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages*. Elsevier, pp. 209–225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100371-8.00010-5>
- Poligne, I., Collignan, A., Trystram, G., 2002. Effects of Salting, Drying, Cooking, and Smoking Operations on Volatile Compound Formation and Color Patterns in Pork. *J. Food Sci.* 67, 2976–2986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08848.x>
- Postema, M., van Wamel, A., ten Cate, F.J., de Jong, N., 2005. High-speed photography during ultrasound illustrates potential therapeutic applications of microbubbles: Ultrasonic microbubbles for therapy. *Med. Phys.* 32, 3707–3711. <https://doi.org/10.1118/1.2133718>
- Posthuma, J.A., Rasmussen, F.D., Sullivan, G.A., 2018. Effects of nitrite source, reducing compounds, and holding time on cured color development in a cured meat model system. *LWT* 95, 47–50. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.040>
- Quinn, J.R., Raymond, D.P., Harwalkar, V.R., 1980. Differential scanning calorimetry of meat proteins as affected by processing treatment. *J. Food Sci.* 45, 1146–1149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb06507.x>
- Rodrigues, R.T., Rubio, J., 2007. DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *Int. J. Miner. Process.* 82, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.019>
- Rokhina, E.V., Lens, P., Virkutyte, J., 2009. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art. *Trends Biotechnol.* 27, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.02.001>
- Sablani, S.S., Datta, A.K., Rahman, M.S., Mujumdar, A.S., 2006. *Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques*. CRC Press.
- Sanches, M.A.R., Colombo Silva, P.M.O., Barretto, T.L., Darros-Barbosa, R., Silva-Barretto, A.C. da, Telis-Romero, J., 2021. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. *LWT* 149, 112036. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112036>

- Sárraga, C., Carreras, I., García Regueiro, J.A., 2002. Influence of meat quality and NaCl percentage on glutathione peroxidase activity and values for acid-reactive substances of raw and dry-cured *Longissimus dorsi*. *Meat Sci.* 62, 503–507. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00039-6)
- Schmidt, F.C., Carciofi, B.A.M., Laurindo, J.B., 2009. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. *J. Food Eng.* 91, 553–559. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.003>
- Schmidt, F.C., Carciofi, B.A.M., Laurindo, J.B., 2008. Salting operational diagrams for chicken breast cuts: Hydration–dehydration. *J. Food Eng.* 88, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.005>
- Sebba, F., 1971. Microfoams—an unexploited colloid system. *J. Colloid Interface Sci.* 35, 643–646. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(71\)90223-2](https://doi.org/10.1016/0021-9797(71)90223-2)
- Seong, P., Park, K., Cho, S., Park, B., Ba, H., 2015. The Impact of Ripening Time on Technological Quality Traits, Chemical Change and Sensory Characteristics of Dry-cured Loin. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 28. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0789>
- Sergeev, A., Shilkina, N., Tarasov, V., Mettu, S., Krasulya, O., Bogush, V., Yushina, E., 2020. The effect of ultrasound treatment on the interaction of brine with pork meat proteins. *Ultrason. Sonochem.* 61, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104831>
- Serra, X., Ruiz-Ramírez, J., Arnau, J., Gou, P., 2005. Texture parameters of dry-cured ham *m. biceps femoris* samples dried at different levels as a function of water activity and water content. *Meat Sci.* 69, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.07.004>
- Shahidi, F., Samaranyaka, A.G.P., Pegg, R.B., 2014. CURING | Brine Curing of Meat, in: *Encyclopedia of Meat Sciences*. Elsevier, pp. 416–424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00112-4>
- Shao, J.-H., Deng, Y.-M., Song, L., Batur, A., Jia, N., Liu, D.-Y., 2016. Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique. *LWT - Food Sci. Technol.* 66, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.008>
- Sharedeh, D., Mirade, P.-S., Venien, A., Daudin, J.-D., 2015. Analysis of salt penetration enhancement in meat tissue by mechanical treatment using a tumbling simulator. *J. Food Eng.* 166, 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.023>
- Shung, K.K., Cannata, J.M., Zhou, Q.F., 2007. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: A review. *J. Electroceramics* 19, 141–147. <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9044-3>
- Siró, I., Vén, Cs., Balla, Cs., Jónás, G., Zeke, I., Friedrich, L., 2009. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *J. Food Eng.* 91, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.015>
- Stadnik, J., Dolatowski, Z.J., 2011. Influence of sonication on Warner-Bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (*m. semimembranosus*). *Eur. Food Res. Technol.* 233, 553. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1550-5>

- Stadnik, J., Dolatowski, Z.J., Baranowska, H.M., 2008. Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (m. semimembranosus) during ageing. *LWT - Food Sci. Technol.* 41, 2151–2158. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.12.003>
- Stanton, A., 2022. 4. How much Meat and Dairy is Good for Us? The Importance of Transparent Evidence-Based Health Metrics. *Anim. - Sci. Proc.* 13, 2. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.03.005>
- Suman, S.P., Nair, M.N., Joseph, P., Hunt, M.C., 2016. Factors influencing internal color of cooked meats. *Meat Sci., Meat for Global Sustainability: 62nd International Congress of Meat Science and Technology (62nd ICoMST)*, August 14-19, 2016, Bangkok, Thailand 120, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.006>
- Takahashi, M., Chiba, K., Li, P., 2007. Formation of Hydroxyl Radicals by Collapsing Ozone Microbubbles under Strongly Acidic Conditions. *J. Phys. Chem. B* 111, 11443–11446. <https://doi.org/10.1021/jp074727m>
- Taormina, P.J., 2014. MEAT AND POULTRY | Curing of Meat, in: *Encyclopedia of Food Microbiology*. Elsevier, pp. 501–507. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00195-6>
- Telis, V.R.N., Romanelli, P.F., Gabas, A.L., Telis-Romero, J., 2003. Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 38, 529–535. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000400012>
- Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chem. Eng. Sci., 10th International Conference on Gas–Liquid and Gas–Liquid–Solid Reactor Engineering* 66, 3172–3179. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.043>
- Tesař, V., 2014. Shape oscillation of microbubbles. *Chem. Eng. J.* 235, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.027>
- Thorarinsdottir, K.A., Arason, S., Geirsdottir, M., Bogason, S.G., Kristbergsson, K., 2002. Changes in myofibrillar proteins during processing of salted cod (*Gadus morhua*) as determined by electrophoresis and differential scanning calorimetry. *Food Chem.* 77, 377–385. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00349-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00349-1)
- Tian, Z.M., Wan, M.X., Wang, S.P., Kang, J.Q., 2004. Effects of ultrasound and additives on the function and structure of trypsin. *Ultrason. Sonochem.* 11, 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2003.09.004>
- Tiwari, B.K., Muthukumarappan, K., O'Donnell, C.P., Cullen, P.J., 2008. Effects of Sonication on the Kinetics of Orange Juice Quality Parameters. *J. Agric. Food Chem.* 56, 2423–2428. <https://doi.org/10.1021/jf073503y>
- Toldr, F. (Ed.), 2010. *Handbook of Meat Processing*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK. <https://doi.org/10.1002/9780813820897>
- Toldr, F. (Ed.), 2004. *Dry-Cured Meat Products*. Food & Nutrition Press, Inc., Trumbull, Connecticut, USA. <https://doi.org/10.1002/9780470385111>

- Toldra', F., 1998. Proteolysis and lipolysis in flavour development of dry-cured meat products. *Meat Sci., Meat Consumption and Culture 44th International Congress of Meat Science and Technology* 49, S101–S110. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)90041-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)90041-9)
- Toldrá, F., 2012. Biochemistry of Processing Meat and Poultry, in: Simpson, B.K. (Ed.), *Food Biochemistry and Food Processing*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 303–316. <https://doi.org/10.1002/9781118308035.ch16>
- Toldrá, F., 2004. *Dry-Cured Meat Products*, 1st ed. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470385111>
- Toldrá, F., 2002. *Dry-cured meat products*, Publications in food science and nutrition. Food & Nutrition Press, Trumbull, Conn.
- Toldrá, F., Aristoy, M.-C., Flores, M., 2000. Contribution of muscle aminopeptidases to flavor development in dry-cured ham. *Food Res. Int.* 33, 181–185. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00032-6)
- Toldrá, F., Flores, M., 1998. The Role of Muscle Proteases and Lipases in Flavor Development During the Processing of Dry-Cured Ham. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 331–352. <https://doi.org/10.1080/10408699891274237>
- Toldrá, F., Hui, Y.H., Astiasarán, I., Sebranek, J.G., Talon, R. (Eds.), 2014. *Handbook of Fermented Meat and Poultry*, 1st ed. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118522653>
- Tomac, A., Rodríguez Mallo, S., Perez, S., Garcia Loredo, A.B., Yeannes, M.I., 2020. Vacuum impregnation in *Merluccius hubbsi* hake fillets brining. Effect on mass transfer kinetics, texture and colour. *LWT* 119, 108892. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108892>
- Ventanas, S., Estevez, M., Andrés, A.I., Ruiz, J., 2008. Analysis of volatile compounds of Iberian dry-cured loins with different intramuscular fat contents using SPME–DED. *Meat Sci.* 79, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.08.011>
- Virgili, R., Parolari, G., Schivazappa, C., Bordini, C.S., Borri, M., 1995. Sensory and Texture Quality of Dry-Cured Ham as Affected by Endogenous Cathepsin B Activity and Muscle Composition. *J. Food Sci.* 60, 1183–1186. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04551.x>
- Wang, A., Kang, D., Zhang, W., Zhang, C., Zou, Y., Zhou, G., 2018. Changes in calpain activity, protein degradation and microstructure of beef *M. semitendinosus* by the application of ultrasound. *Food Chem.* 245, 724–730. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.003>
- Wang, Z., He, Z., Gan, X., Li, H., 2018. Effect of peroxy radicals on the structure and gel properties of isolated rabbit meat myofibrillar proteins. *Int. J. Food Sci. Technol.* 53, 2687–2696. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13878>
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F., Bermúdez-Aguirre, D., 2005. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. *J. Food Eng., IV Iberoamerican Congress of Food Engineering (CIBIA IV)* 67, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.jfo-odeng.2004.05.053>
- Wright, W.D., 1981. 50 Years of the 1931 CIE Standard Observer for Colorimetry. *AIC Color* 81.

- Wu, Z., Bertram, H.C., Kohler, A., Böcker, U., Ofstad, R., Andersen, H.J., 2006. Influence of Aging and Salting on Protein Secondary Structures and Water Distribution in Uncooked and Cooked Pork. A Combined FT-IR Microspectroscopy and ^1H NMR Relaxometry Study. *J. Agric. Food Chem.* 54, 8589–8597. <https://doi.org/10.1021/jf061576w>
- Xiong, G., Fu, X., Pan, D., Qi, J., Xu, X., Jiang, X., 2020. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat. *Ultrason. Sonochem.* 60, 104808. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104808>
- Yang, Y., Li, Q., Guo, X., Tu, J., Zhang, D., 2020. Mechanisms underlying sonoporation: Interaction between microbubbles and cells. *Ultrason. Sonochem.* 67, 105096. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105096>
- Yeung, C.K., Huang, S.C., 2017. Effects of Ultrasound Pretreatment and Ageing Processing on Quality and Tenderness of Pork Loin. *J. Food Nutr. Res.* 5, 809–816. <https://doi.org/10.12691/jfnr-5-11-3>
- Yildirim, A., Öner, M.D., Bayram, M., 2011. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. *J. Food Eng.* 104, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.005>
- Zhao, C.-C., Eun, J.-B., 2018. Influence of ultrasound application and NaCl concentrations on brining kinetics and textural properties of Chinese cabbage. *Ultrason. Sonochem.* 49, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.039>
- Zheng, L., Sun, D.-W., 2006. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review. *Trends Food Sci. Technol.* 17, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.010>
- Zhou, G.H., Zhao, G.M., 2007. Biochemical changes during processing of traditional Jinhua ham. *Meat Sci.*, 53rd International Congress of Meat Science and Technology (53rd ICoMST) 77, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.028>
- Zou, Y., Zhang, W., Kang, D., Zhou, G., 2018. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking. *Int. J. Food Sci. Technol.* 53, 828–836. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13659>
- Zugarramurdi, A., Lupín, H.M., 1980. A Model to Explain Observed Behavior on Fish Salting. *J. Food Sci.* 45, 1305–1311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb06543.x>

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, **Dr. Friedrich Lászlónak** az értekezés elkészítéséhez nyújtott szakmai segítségéért, a dolgozatom mielőbbi elkészítésére való biztatásáért.

Köszönöm az **Állattermék és Élelmiszertartósítási Technológia Tanszék** minden munkatársának, akik szakmai tudásukkal és biztatásukkal támogatták a munkámat.

Köszönöm **Dr. Kovács Péternek** (Funkció Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.) hogy lehetővé tette számomra a kisüzemi kísérlet elvégzését.

Köszönöm **férjemnek, Dr. Jónás Gábornak** a szakmai segítségét, támogatását, valamint türelmét, amit felém tanúsított a doktori értekezésem megírása során.

Köszönöm **szüleimnek és testvéreimnek**, akik támogattak és biztattak doktori tanulmányaim és a dolgozat megírása folyamán.