



TEJIPARI TECHNOLÓGIAI FOLYAMATOKNÁL ALKALMAZOTT MŰSZERES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS DIELEKTROMOS MÉRÉSEK PARAMÉTEREINEK ÖSSZEFÜGGÉS VIZSGÁLATA

DOBOZI RÉKA¹- JÁKÓI ZOLTÁN¹- CSANÁDI JÓZSEF²- BESZÉDES SÁNDOR¹

¹Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Biológiai Rendszerek Műszaki Intézete,
Szeged;

²Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Élelmiszermérnöki Intézet, Szeged

ÖSSZEFOGLALÁS

A biológiai eredetű anyagok dielektromos tulajdonságaival már régóta foglalkozik a szakirodalom. Azonban az eddigi tejipari alkalmazáshoz kapcsolódó dielektromos mérések során elsősorban az idegen víz jelenlétének detektálását, illetve sajtoknál az adalék- és segédanyagok koncentrációjától való függést vizsgálták. A tejipari technológiai folyamatok dielektromos paraméterekkel történő nyomon követésére vonatkozó közlemények száma csekély. A kutatásunkban a nyers tehéntej oltós alvasztása és két különböző gyártási technológiával készülő félkemény sajt típus, trappista sajt és bácskai gyúrt sajt (Sole-Mizo Zrt., Bácsbokod) érlelése során vizsgáltuk a dielektromos állandót és a dielektromos veszteségi tényezőt 200-2400 MHz frekvenciatartományban nyílt végű koaxiális mérőszondával (Speag DAK 3.5 mérőszensor, Rhode&Schwarz ZVL-3 VNA). Az oltós alvasztást a látszólagos viszkozitás meghatározásával (AND SV-10 vibrációs viszkoziméter), a sajtok érését állományprofil-analízissel (Brookfield CT3 TPA) és műszeres színméréssel (Minolta CR300) is nyomon követtük, hogy meghatározzuk a vizsgált tejipari anyagok dielektromos tulajdonságai és fiziko-kémia változásai közötti összefüggéseket. A kutatásainkat ezen kívül kiterjesztettük a tej laktóztartalmának a dielektromos viselkedésre gyakorolt hatásainak vizsgálatára.

A kutatási eredményeink alapján megállapítható, hogy a dielektromos állandó növekedést, a dielektromos veszteségi tényező csökkenést mutatott az alvasztási folyamat

előrehaladtával. A viszkozitás növekvő tendenciájának kezdete után a dielektromos állandó nem nőtt tovább, és a dielektromos veszteségi tényező is egy minimum érték elérését követően növekedésnek indult, tehát a dielektromos mérésekkel az alvasztási folyamat az alvadék megszilárdulásáig volt nyomon követhető. A dielektromos állandó (ϵ') érlelési folyamat közbeni monitorozásakor azt tapasztaltuk, hogy az érési idő függvényében ϵ' csökken a trappista sajtnál és növekszik a gyúrt sajtnál. A sajtok különböző helyein mért dielektromos állandók átlagai (900, 1500 és 2400 MHz frekvenciákon), valamint ugyanezen helyeken a szín és állományjelzők átlagai között lineáris kapcsolat volt.

Mindezek alapján megállapítható, hogy a gyors, roncsolás- és vegyszermentes dielektromos mérés alkalmas lehet mind a tejszó alvasztási folyamatának, mind a sajtok érési folyamatának nyomon követésére, továbbá az optimális alvasztási és érlelési idő meghatározására.

Kulcsszavak: dielektromos mérés, oltós alvasztás, sajtérés, TPA, színmérés

BEVEZETÉS

Az élelmiszeriparban az egyes gyártási technológiák során az anyag kémiai, biológiai és szerkezeti változásainak jelzésére és objektív vizsgálatára alkalmas mérőeszközök és mérési módszerek fejlesztése még napjainkban is folyamatosan zajlik. Ezek közül az ipari gyakorlat számára azon megoldások különösen nagy jelentőséggel bírnak, amelyekkel roncsolásmentes vizsgálatokat lehet végezni és emellett gyorsan eredményt szolgáltatnak, ezért gyártásközi ellenőrzésre is alkalmasak. A gyártási technológiákban azonosíthatók olyan kulcsfontosságú műveleti lépések, amelyek vagy a gyártási kapacitás, vagy a termék minősége szempontjából meghatározóak, az ezek során végbemenő folyamatok gyors ellenőrzésére szolgáló mérési módszerek kidolgozása mind a kutatás, mind a gyakorlat számára megoldandó feladat. A tejipari technológiákban például az alvasztási folyamat, vagy a sajtok esetében az érlelési folyamat is ezek közé tartozik.

Az iparban egyre szélesebb körben alkalmaznak mikrohullámú energiaközlésen alapuló eljárásokat. A döntően hőkéltést célzó mikrohullámú műveletek tervezése, illetve ezek hatásfokának növelése céljából a kalorikus hatásfokot is befolyásoló dielektromos paraméterek ismerete szükséges. A dielektromos mérések alkalmazási területe sokrétű; használják például szigetelőanyagok vizsgálatára, különböző anyagok

nedvességtartalmának gyors meghatározására, illetve a dielektromos paraméterek az elektromágneses terek orvosdiagnosztikai és gyógyászati célú felhasználásakor is fontos információt szolgáltatnak. Az élelmiszerek és a mezőgazdasági termékek dielektromos paramétereinek meghatározása az elmúlt években egyre nagyobb jelentőséggel bír. Egyrészt alkalmazzák ezeket a tulajdonságokat az anyagok dielektromos melegítésének tervezéséhez (például rádiófrekvenciás és mikrohullámú melegítés), valamint egyre szélesebb körben használják ki a dielektromos mérések kedvező tulajdonságait az anyagok minőségi és beltartalmi paramétereinek értékeléséhez, termelési folyamatok tanulmányozásához, mivel roncsolásmentes és gyors anyagvizsgálati eljárások fejlesztését teszik lehetővé.

IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A dielektromos paraméterek az anyagnak az elektromágneses hullámmal való kölcsönhatását írják le, illetve az elektromágneses sugárzásnak az adott közegben való terjedését jellemzik. A sugárzás energiája az anyaggal való találkozáskor visszaverődhet (reflektálódhat), transzmittálódhat (áthaladhat) vagy elnyelődhet (abszorbeálódhat), mely folyamatokat az anyag dielektromos tulajdonságai is meghatároznak. Az anyagok relatív permittivitása olyan dimenzió nélküli komplex fizikai mennyiség, mely két dielektromos paraméter segítségével írható le.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$

A képletben lévő ε_r' az anyag dielektromos állandója, ε_r'' dielektromos veszteségi tényezője, az imaginárius egység pedig $j = \sqrt{-1}$ értékű komplex szám (Nelson, 2010). A permittivitás valós része, a dielektromos állandó az elektromos térben lévő anyag elektromos energiatároló képességét adja meg. A képzetes rész, a dielektromos veszteségi tényező megmutatja az anyagnak azt a képességét, hogy a külső elektromos térből milyen mértékben képes elektromos energiát disszipálni, vagyis a befogadott elektromos energiát hőenergiává alakítani.

Az dielektromos tulajdonságokat – a kémiai és fizikai paraméterekhez hasonlóan – a molekuláris szerkezet határozza meg, amely minden anyagnál egyedi összetételű és felépítésű, ezért az anyagok elektromos térben való viselkedése is nagyfokú változatosságot mutat. A dielektromos paraméterek frekvencia függvényében való változását az elektromos vezetés és a polarizációs mechanizmusok, mint az elektron-,

atom-, dipólus- és ionpolarizáció befolyásolják. Az élelmiszerek vizsgálatához azonban nem alkalmazzák az elektromágneses spektrum teljes frekvenciatartományát. A mezőgazdaságban és az élelmiszeriparban elterjedt dielektromos mérési módszerek, berendezések a rádiófrekvenciás, illetve a mikrohullámú sugárzások és az anyag kölcsönhatásának vizsgálatán alapulnak (*Skierucha et al.*, 2012).

A rádióhullámok frekvenciatartománya 30 kHz és 300 GHz frekvenciák között helyezkedik el, míg a mikrohullámot ezen tartományon belül, 300 MHz és 300 GHz közötti frekvenciájú, ennek megfelelően 10^6 és 10^9 nm közötti hullámhosszú elektromágneses sugaraknak tekintjük (*Şoproni et al.*, 2008). Ezekben a frekvenciatartományokban fellépő dielektromos mechanizmusok az ionos vezetés és a dipólus rotáció jelensége, melyek dielektromos veszteségeket okoznak az alkalmazott elektromos térben.

Alacsonyabb rádiófrekvenciás frekvenciatartományban az oldott állapotban lévő ionok pozitív vagy negatív töltésüktől függően az elektromos erőter pólusainak megfelelően vándorolnak. A dielektromos veszteséget a folyamatosan váltakozó irányú mozgásból származó energia okozza. (*Komarov et al.*, 2005). A mikrohullámú sugárzás nagyobb frekvenciáin a dipólusos rotáció mechanizmusa jelentősebb. A dipólus-momentummal rendelkező molekulák a tér polaritását követve folyamatosan forognak, ezáltal sűrűlődnak, amely hőt fejleszt (*Tıraş et al.*, 2019).

Egy külső elektromos térbe helyezett dielektrikumban a polarizáció egyensúlyi állapotának elérése, illetve a külső elektromos tér hiányában a polarizáció megszűnése nem pillanatszerűen megy végbe. Azt az időt, ami ahhoz szükséges, hogy az orientációs polarizáció az egyensúlyi állapotából $1/e$ -ed részére csökkenjen, relaxációs időnek, a fellépő jelenséget dielektromos relaxációnak nevezik (*Nelson és Trabelsi*, 2012). Ha a dipólus molekulákra nagy hullámhosszú sugárzás hat, akkor elegendően nagy relaxációs idő áll rendelkezésükre, hogy kövessék a váltakozó frekvenciájú elektromos tér polaritását, így a dielektromos állandójuk maximális értéket ér el. Majd növelve a frekvenciát úgynevezett diszperziós frekvenciatartományban „lépésszerűen” lecsökken az értéke, mert a molekulák orientációja és relaxációja nem tud bekövetkezni. Tiszta poláris anyagok (pl. víz) esetén a dielektromos állandó változása által leírt görbe inflexió pontja a relaxációs frekvencián következik be. Ez egyben az a frekvencia érték, ahol a dielektromos veszteségi tényező értéke eléri a maximumát, azaz a vizsgált dielektrikum a legnagyobb elektromos energia disszipáló képességgel rendelkezik. A relaxációs

frekvenciától távolodva mind a növekvő, mind a csökkenő frekvencia értékek felé a dielektromos veszteségi tényező aszimptotikusan közelíti a 0 értéket (*Barba és d'Amore*, 2012).

A relaxáció, az alkalmazott frekvencia és a részecskék mozgási mechanizmusa befolyásolja a dielektromos paraméterek hőmérsékletfüggését. A hőmérséklet növelésével bekövetkező viszkozitás csökkenés a folyadékokban lévő ionok szabad mozgását segíti elő. Ennek eredménye az elektromos vezetőképesség növekedése, így a veszteségi tényező adott frekvencián vett értéke is magasabb lesz. Míg a növekvő hőmérséklet hatására bekövetkező intenzívebb hőmozgás révén a dielektromos állandó adott frekvencián csökken (*Komarov et al.*, 2005). A molekulák mobilitásának vizsgálatára a szakirodalom használja a relaxációs idő frekvenciafüggésének meghatározásán alapuló módszereket. Polimerek esetében például a különböző termomechanikai állapotok közötti átalakulás (üveges, kristály, amorf) nyomon követhető dielektromos mérésekkel (*Ngai et al.*, 2008). A poliszacharidok szerkezeti átalakulásai, illetve egyes mono- és diszacharidokhoz kapcsolódó kémiai reakciók és szerkezeti változásai esetében is megfigyelték, hogy azok dielektromos módszerekkel kimutathatóak. Az egyes szénhidrátok relaxációs idő szerinti elkülönítésének alapja lehet például a hidroximetil-csoport megléte, amely jellegzetes dielektromos viselkedést okoz a rendszerben. Ezenkívül laktóznál a dielektromos veszteségi tényező esetében a hőmérséklet szerinti változási tendenciájában koncentrációtól való függést is megfigyeltek (*Ermolina és Smith*, 2011).

Az orientációs polarizáció mechanizmusa is változik a hőmérséklettel, hiszen a hőmérsékletnövelés által okozott alacsonyabb viszkozitás és intenzívebb Brown-mozgás a poláris molekulák relaxációs idejét lerövidíti. A dielektrikum veszteségi tényezőjének egyre csökkenő maximum értékének helye a nagyobb frekvenciasávok felé tolódik a hőmérséklet növelésével. Egy adott frekvencián a dielektromos veszteségi tényező csökkenhet, vagy nőhet is a felmelegedéssel, attól függően, hogy az anyagot az összetételétől és a komponensek szerkezetétől is függő relaxációs frekvenciától kisebb vagy nagyobb frekvenciájú elektromos térbe helyezzük. A hőmérséklet hatására megváltozott dielektromos relaxáció eredményeképp a dielektromos állandó a hőmérséklet növelésével nagyobb értékeket vesz fel a diszperziós frekvenciatartományban. Kisebb és nagyobb frekvenciákban a hőmérséklettel a dielektromos állandó csökkenése figyelhető meg (*Nelson és Trabelsi* 2014).

Zhu et al. (2014) vizsgálták a nyers tehén- és kecsketej dielektromos állandójának, veszteségi tényezőjének és penetrációs mélységének hőmérséklet- és frekvenciafüggését, annak megállapítására, hogy a vizsgált 10-4500 MHz frekvenciatartományban mely frekvenciák lennének alkalmasak a megfelelő minőségű tej dielektromos melegítéssel történő pasztörözéséhez. A dielektromos veszteségi tényező hőmérsékletfüggésében különbséget találtak a különböző állatokból származó tejek között. A nyers tehéntej rádiófrekvencián vizsgált, hőmérsékletnöveléssel magasabb értékű dielektromos veszteségi tényezője, és ennek következtében növekvő energia abszorpciós képessége arra utal, hogy egy alacsony frekvencián hőkezelt termékben homogénezés nélkül nem egyenletesen történne a felmelegedés. Mikrohullámú frekvenciákon – különösen 2450 MHz frekvencián – a dielektromos veszteségi tényező a hőmérséklet növelésével csökkent, azaz egy ilyen frekvenciájú dielektromos hőkezelés lehetővé tenné azt, hogy a termék alacsonyabb hőmérsékletű pontjai több, míg a magasabb hőmérsékletű részei kevesebb elektromos energiát disszipáljanak, ami ezáltal biztosítaná a tej egyenletes felmelegedését. Azonban a penetrációs mélység nagymértékű frekvenciafüggését figyelembe véve a 915 MHz frekvencián kivitelezett hőkezelési eljárást tartják a leghatékonyabbnak. A tehéntejtől eltérően, a vizsgált kecsketejnél minden frekvencián tapasztalható volt a veszteségi tényező hőmérséklettel való csökkenése, így annál a megfelelő minőségű pasztörözés szélesebb frekvenciatartományban kivitelezhető. Mindezek alapján tehát megállapítható, hogy a nagy nedvességtartalmú anyagok – mint a tej – esetében a dielektromos veszteségi tényező hőmérséklet függvényében való csökkenése elméletileg a mikrohullámnak az egyenletesebb, térfogati felmelegítő hatását segíti elő. Azonban a gyakorlatban, mivel a mikrohullámú anyagkezelések folyamat közbeni szabályozásánál a dielektromos jellemzőket nem mérik, a nagy energiaintenzitású mikrohullámú energiaközlések sok esetben lokális túlhevüléseket okoznak, illetve valós körülmények között a hőmérsékletmező homogenitása nem érhető el. Az anyagkezelések (pl. a tejpasztörözés) esetében a legjobb hatásfokkal alkalmazható frekvencia kiválasztása sok esetben csak elméleti jelentőséggel bír, mivel ilyen célra csak az ún. ISM (Industrial, Scientific, Medical) sávok engedélyezettek.

A tehéntej esetében végeztek vizsgálatokat a szárazanyag-tartalom változásának a dielektromos jellemzőkre gyakorolt hatásainak vizsgálata céljából idegen víz hozzáadásával. *Nunes et al.* (2006) megállapították, hogy az ultramagas hőmérsékleten hőkezelt teljes-, zsírszegény- és sovány tejek között dielektromos állandójuk és

dielektromos veszteségi tényezőjük együttes vizsgálata alapján 1-5 GHz frekvenciatartományban tehető különbség. A veszteségi tényező a 7-9 GHz frekvenciatartományban a többi mintához képest csak a teljes (nem fölözött) tej esetében mutat kismértékű különbséget, azonban ez a különbség az eltérő zsírtartalmú tételek egyértelmű elkülönítésére nem alkalmas. Ez a kutatás is igazolta, hogy az ionok koncentrációjának, illetve az ionok mobilitásának változása elsősorban a mikrohullámú anyagkezeléseknél alkalmazottól alacsonyabb frekvenciatartományoknál okoz a dielektromos állandó és a dielektromos veszteségi tényező értékében jelentős eltéréseket. Más tanulmányok is megerősítették ezen megfigyeléseket, illetve megállapították, hogy a dielektromos veszteségi tényező minimumértéke a hőmérséklet növekedésével emelkedik. A dielektromos állandó 100-600 MHz frekvenciatartományban nem volt alkalmas a fehérjék koncentrációváltozásainak detektálására (Zhu *et al.*, 2015).

A dielektromos jellemzőkön alapuló idegen (hozzáadott) víz detektálásával Guo *et al.* (2010) is foglalkoztak. Megállapították, hogy a víz hozzáadás mértékétől függetlenül a dielektromos jellemzők frekvencia függvényében való változási trendje független, azonban mind a dielektromos állandó, mind a veszteségi tényező abszolútértékeiben különbségek voltak mérhetőek. A dielektromos veszteségi tényező frekvenciafüggésében 1700 ± 100 MHz tartományban minimumérték volt megfigyelhető. A kutatások igazolták, hogy a friss tej dielektromos veszteségi tényezője a szobahőmérsékletű tárolás első 40 órás periódusában folyamatosan növekszik 915 MHz frekvencián. Ugyanazon frekvencián hűtve tárolásnál ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$) az első 60 órás periódus után volt tapasztalható az ϵ'' növekvő tendenciája. A veszteségi tényező változása elsősorban a laktóz, illetve egyes fehérje és zsírfrakciók mikrobiális lebomlására vezethető vissza, amelyet – indirekt módon – a pH csökkenése is alátámasztott. Az ipari léptékű mikrohullámú tej hőkezelések tervezése számára fontos megállapítás volt továbbá, hogy a tej szárazanyag-tartalma, illetve a hőkezelés előtti (átmeneti) tárolási idő a nagy anyagáramok kezelésekor használatos 915 MHz frekvencián a penetrációs mélységet akár 10-15%-os mértékben is befolyásolhatja.

A termikus hatásokra az anyagban végbemenő folyamatok nyomon követésére is alkalmasak a dielektromos mérések. Fehérjék esetében például ilyen folyamat lehet a denaturáció. A savófehérjék denaturációs hőmérsékletét – valós alapanyagban – a savófehérjék mellett jelen lévő cukrok és sók is befolyásolják, növelik azt. Bircan *et al.* (2001) megállapították, hogy savófehérjéket tartalmazó vizes rendszerben a dielektromos

veszteségi tényező változása 2450 MHz frekvencián 65 °C hőmérsékletig csökkenő (minimumérték), majd növekvő, 75 °C-tól újra csökkenő (második töréspont), majd újra növekvő tendenciával volt leírható. Amennyiben a savófehérjék mellett a rendszer cukrokat is tartalmazott, a görbe minimumértéke 70-75 °C hőmérséklettartományba, a második karakterisztikus töréspont 80 °C-ra tolódott el. A dielektromos veszteségi tényező frekvenciafüggését leíró görbe második töréspontja egybeesik a savófehérjék denaturációs hőmérséklettartományával (75-80 °C). A savófehérjék közül a β -laktoglobulin a legnagyobb arányban jelenlévő komponens, így a savó denaturációs hőmérsékletét is ez határozza meg leginkább (a 85-90 °C közötti denaturációs hőmérséklettel jellemezhető szérum albuminok részaránya általában 1% alatti). A termikusan előidézett denaturáció során a fehérjék vizet és ionokat képesek megkötni, ezen hatások kifejeződhetnek a dielektromos veszteségi tényező értékének változásában. A pH hatására bekövetkező (savanyítás) fehérje denaturáció a dielektromos paraméterek változásával, és különösen a veszteségi tényező mérésével, nehezen jelezhető, mivel az adagolt sav protonjainak a hatása a rendszer dielektromos viselkedésére sokkal nagyobb, mint önmagában a fehérje denaturációnak. A fehérjefrakció változó polaritású elektromágneses térben való viselkedését nemcsak az összetevő vegyületek megoszlása, illetve a koncentrációjuk határozza meg, hanem diszperz rendszerek esetén a diszpergált komponens és a diszperziós közeg határfelületi feszültsége, felületi energiája is. *Cases és Cayot (2005)* vizsgálták β -laktoglobulin esetében a különböző dielektromos tulajdonságú oldószer (poláris, apoláris) hatását a fehérje dielektromos viselkedésére. Megállapították, hogy mivel az alkalmazott oldószer fiziko-kémiai tulajdonságai befolyásolják a fehérje szerkezetét, konformációját, ezért mind a reológiai, mind a dielektromos viselkedés is ennek függvényében változik. A vizsgált rendszerben a fehérje-fehérje interakciót a fehérjék körül kialakuló hidrát/szolvát burok befolyásolta, amelynek változásait a dielektromos állandó értéke is jelezte. A kutatások eredményeként a reológiai tulajdonságok és a dielektromos állandó változásai között korrelációt feltételeztek.

A tej laktóztartalma és dielektromos viselkedése közötti összefüggést is vizsgálták mind teljes, mind főlözött tej esetében. Az eredmények alapján a módszer a tejszírtartalomban lévő különbség kimutatására is alkalmas volt; 20-2000 MHz frekvenciatartományban a zsírtartalom és a dielektromos veszteségi tényező között negatív lineáris korreláció volt tapasztalható. Alacsonyabb frekvenciasávban az ionos vezetés befolyásolja döntően a

dielektromos viselkedést. A tejben lévő tejszírgolyók (diszperz fázis) mérete (2-10 mikron) ezen frekvenciatartományban gátolja az ionok mozgását, a tejszír koncentrációja mellett a méreteloszlás is befolyásolhatja a dielektromos viselkedést. A tejszírgolyócskák komponensei a vízhez képest kevésbé poláris vagy apoláris tulajdonságúak, tehát magasabb frekvenciatartományokban pedig a polarizálhatóságuk gyengébb, amely növekvő koncentrációjuk hatására szintén csökkenő tendenciát okoz az ϵ'' értékében (Guo *et al.*, 2010). Továbbá tehéntejnél bizonyos frekvenciatartományokban a veszteségi tényező és a fehérjertalom között szoros pozitív korreláció volt.

A laktózt tartalmazó tej esetében 20-4500 MHz frekvenciatartományban a dielektromos állandó csökkenő tendenciájú frekvenciafüggését figyelték meg, míg a veszteségi tényező frekvenciától függése karakterisztikus V-alakú függvénnyel volt leírható kb. 2000 MHz minimumhellyel. A veszteségi tényező ezen jellegzetes viselkedését egyébként más élelmiszereknél is megfigyelték. A mikrohullámú kezeléseknél gyakran alkalmazott 2450 MHz frekvencián Liu *et al.* (2018) érdekes jelenséget figyeltek meg, miszerint a dielektromos veszteségi tényező a laktóztartalom növekedésével minden esetben növekszik, azonban a dielektromos állandó viselkedését a tej zsírtartalma is befolyásolja: a teljes tejnél (tejszír 3,9%) az ϵ' a laktóz koncentrációjával növekszik, míg fölöszt soványtejnél (zsírtartalom 0,1% alatt) a dielektromos állandó csökken. A laktóz, a hidroxil- és hidroximetil-csoportjai révén, a tejben lévő tejszírgolyók halmazképződési hajlandóságát növeli, és a képződő halmazok az ionos vezetést gátolják, így alacsonyabb frekvenciákon a veszteségi tényező csökken a koncentráció növelésével. Azonban magasabb frekvenciasávban (mint például a mikrohullámú kezelések frekvenciái) a laktóz mennyiségének növelésével a gyengén poláros (hidroxil- és hidroximetil-csoportok) mennyisége is növekszik, amely a dielektromos veszteségi tényező növekedését okozza.

A dielektromos paraméterek meghatározásán alapuló módszerekkel a joghurt fermentációs folyamatot is nyomon követték. Guo *et al.* (2018) megállapították, hogy a dielektromos jellemzők közül elsősorban a veszteségi tényező változása tekinthető olyan mértékűnek, amely lehetővé teszi a fermentációs folyamatok műszeres ellenőrzését, illetve a fermentáció esetében a végpontjelzést. Az ϵ'' a fermentációs időszak első szakaszában csökken, a mikrobiális savtermelés miatti pH csökkenésével, illetve a vezetőképesség növekedésével jól korrelálva, majd a kazein izoelektromos pontjának (pH=4,6) elérése után a csökkenő tendencia növekvőbe vált át. A veszteségi tényező ezen

'töréspontja' (minimumérték) tehát a joghurt esetében a fermentáció során bekövetkező fiziko-kémiai változások detektálására alkalmas.

A dielektromos méréseket nemcsak tej, hanem különböző tejtermékek esetében is vizsgálták már. A sajtok esetében például a dielektromos állandó és a veszteségi tényező vonatkozásában is a mérési frekvencia növelésével csökkenő tendenciát figyeltek meg 300 MHz-3 GHz tartományban. A sajtok dielektromos viselkedését a hőmérséklet is befolyásolja, általában 5 °C hőmérsékleten rendelkeznek a legnagyobb ϵ' értékkel, amely 55-65 °C hőmérséklettartományig csökken. A veszteségi tényező változását azonban a nedvességtartalom/zsirtartalom arány is befolyásolja: alacsony víz/zsír aránynál (1,3-1,6) az ϵ'' 5-55 °C tartományban a hőmérséklet növekedésével csökken, majd ezután növekszik; míg magas víz/zsír arányú (2-2,3) sajt típusoknál az ϵ'' növekvő tendenciát mutat 5-75 °C hőmérséklettartományban (Everard *et al.*, 2006). Ezek alapján tehát általánosítható dielektromos viselkedés nem állapítható meg. Fagan *et al.* (2005) különböző összetételű sajtok dielektromos paramétereinek és a mintákban ismert mennyiségben lévő nedvesség- és sótartalom közötti korrelációt vizsgálták. A nedvességtartalom növekedésével a dielektromos állandó növekvő értékei mutattak összefüggést 2450 MHz frekvencián, emellett a víztartalom hatással volt a veszteségi tényezőre is. Ezzel szemben a sótartalom csak a dielektromos veszteségi tényező értékét befolyásolta. A növekvő sótartalom miatti nagyobb dielektromos veszteség a növekvő mértékű ionos vezetésnek volt köszönhető, így alacsonyabb frekvencián, 948 MHz-en volt erősebb a kapcsolat a kémiai és a dielektromos jellemzők között.

Az élelmiszerek egy jelentős részében a víz- és a sótartalmat tekintik a dielektromos viselkedés szempontjából leginkább meghatározó komponensnek. A víz esetében azonban nem pusztán a mennyiség, hanem a fiziko-kémiai forma (például kristályvíz, BET-víz, szabad vagy kötött víz), illetve a többi komponens tulajdonságai (pl.: vízben oldható komponens, diszperz komponens) is befolyásolja a dielektromos paraméterek, illetve ehhez kapcsolódóan a relaxációs idő, vagy a penetrációs mélység értékét (Bircan *et al.*, 2001). A sajtok esetében a sókoncentráció többféle mechanizmus által is befolyásolja a dielektromos viselkedést. A só adagolással, vagyis az ionok koncentrációjának növelésével, alacsonyabb frekvenciákon az ionos vezetés erősödik, amely többek között ezen frekvenciákon a veszteségi tényező értékének növekedését eredményezi. Másrészt a sók adagolásával a fehérjék hidrátburkai, a vízkötési potenciál

is változhat. Ezen fiziko-kémiai változások szintén befolyásolják a sajtok dielektromos tulajdonságait (Velazquez *et al.*, 2018).

Az utóbbi évek kutatásai során a dielektromos paraméterek pontosabb meghatározásával nemcsak szilárd anyagok és kevés komponensből álló folyadékelegyek, hanem egyre több biológiai anyag dielektromos viselkedését is vizsgálják. Ezen kutatások eredményei rámutattak arra, hogy a dielektromos állandó és a veszteségi tényező szakirodalomban szereplő általános frekvencia-, nedvesség-, vagy hőmérsékletfüggési tendenciái többkomponensű, heterogén rendszerekben, és főleg biológiai eredetű anyagok esetében nem mindig igazolhatóak, anyagfüggő „fluktuációk” és anomális viselkedés figyelhető meg (Zhu és Guo, 2017; Maenhout *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Solyom *et al.*, 2020). A biológiai eredetű anyagok dielektromos viselkedése területén ezért még további, részletesebb vizsgálatok szükségesek.

ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

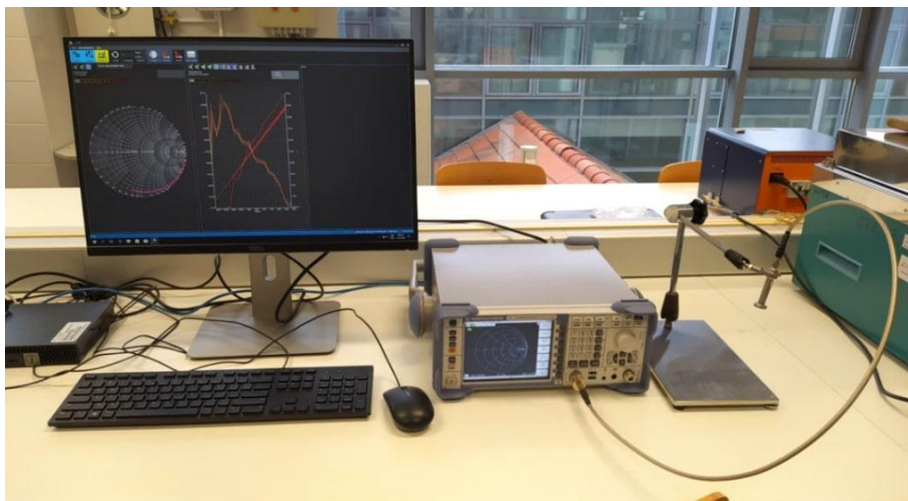
A dielektromos mérőberendezés és működése

A dielektromos állandó és a veszteségi tényező mérésére egy laboratóriumi dielektromos mérőrendszert használtuk (1. ábra). Egy vektorhálózat-analizátorhoz (ZVL-3 VNA, Rhode&Schwarz GmBh) 50 ohm ellenállású koaxiális tápvonallal csatlakoztatott DAK 3.5 (SPEAG GmBh) mérőszenzor segítségével határoztuk meg a dielektromos paramétereket. A mérési módszer elve, hogy a nyitott végű érzékelővel rendelkező DAK szenzor fogadja a vektorhálózat-analizátor (VNA) által a mintába bocsátott, a mérendő anyag felületéről visszaverődő jeleket és továbbítja a koaxiális tápvonalon keresztül a vektorhálózat-analizátorba, ami a reflexiós tényező mérésére alkalmas. A vektorhálózat-analizátorhoz csatlakoztatott számítógépre telepített DAK szoftver segítségével a mért reflexiós együttható átkonvertálható az anyag komplex permittivitásává.

A dielektromos paraméterek méréséhez a DAK szenzor 0,2-20 GHz frekvenciatartományban alkalmazható, azonban a mérhető maximális frekvencia értéket a használt vektorhálózat-analizátor 3 GHz frekvenciára korlátozza. Az előzetes mérési tapasztalataink alapján a felső frekvenciatartományban nagymértékű elektromágneses zavarást tapasztaltunk, emiatt a vizsgálatokat 200 MHz és 2400 MHz közötti tartományban végeztük. A dielektromos tulajdonságok – dielektromos állandó,

dielektromos veszteségi tényező, veszteségszög tangens – frekvencia függvényében kapott értékeit a rendszer 10 ponton 3-3 mérés átlagából adja meg, melyeknek számtani átlagaként határoztuk meg az egy adott mérési ponthoz tartozó paraméterek értékeit (a minták esetében minden pozícióban 5 mérési pontot alkalmazva, mérési pontonként 30 rögzített mérési adatból).

Az anyag sűrűségében előforduló változások mérési hibákat okozhatnak, ezért ügyeltünk arra, hogy a szenzor és az anyag közvetlen találkozását légrés mentesen biztosítsuk. Ehhez a mérőszenzor nyitott végű érzékelőjét a tejmintáknál minden esetben 10 mm-es mélységben belemerítettük a folyadékba, sajtok esetén pedig a minták sima felületére helyeztük és 2 mm-es mélységű penetrációt alkalmazva rögzítettük. A tejipari termékek vizsgálatát megelőzően ismert dielektromos paraméterekkel rendelkező referenciaanyagra saját ellenőrző mérést hajtottunk végre, melyhez a tej és a sajt legnagyobb arányú összetevőjét, a vizet használtuk. A dielektromos méréseket a műszer gyártója által rögzített víz referenciaadatokkal szemben végeztük. A mérőrendszer minden újbóli indítása után a mérési megbízhatóságot a gyártói referenciaanyagokkal Cole-Cole diagramon vizuálisan (a szenzor nem látható szennyeződése, illetve a tápvonal mozgatása miatti hiba azonnali kiszűrése céljából), és a mért adatok és referenciaértékek számszerű összevetésével is ellenőriztük.



1. ábra: Dielektromos mérőberendezés

Figure 1: Dielectric measurement equipment

Az oltós alvasztás anyagai és a folyamat nyomon követésének módszere

Az alvasztási művelet vizsgálatához egy helyi tejtermelőtől beszerzett nyers tehéntejet és MAXIREN 600 (DSM Food Netherlands, *Kluyveromyces lactis* termelte kimozin, 600 IMCU/mL; 3mg/mL koncentráció) iparilag is alkalmazott enzimet használtunk. A tej oltóenzim koncentrációját az ipari technológiában alkalmazottnak megfelelő adagolási tartományban megválasztva 100 ml teje vonatkoztatva 9 µl/100 ml volt.

Az alvasztási folyamat során a látszólagos viszkozitás (a kolloid rendszerekre jellemző folyási tulajdonság) változását SV-10 típusú (A&D Company, Japan) vibrációs viszkoziméterrel, a dielektromos paraméterek változását a dielektromos mérőberendezéssel monitoroztuk. A két mérőműszer egymással párhuzamosan, külön mintatartó edénybe kitöltött, de mindenben azonos összetételű tejmintában, azonos hőmérsékleten mérte a vizsgálandó paramétereket. A vibrációs viszkoziméter lamellái a készülékhez tartozó polikarbonát mintatartó edénybe kimért 45 ml, míg a dielektromos mérőszensor egy üvegedénybe öntött 125 ml térfogatú tejet tartalmazó mintába merülve végezte a méréseket. A viszkozitást és a dielektromos paramétereket közvetlenül az oltóenzim hozzáadagolása után, majd a 90 perces alvasztási vizsgálat első fél órájában 5 percnként, azt követően 10 percnként határoztuk meg. Minden mérésnél a tej alvasztásához szükséges állandó $37 \pm 1,5$ °C hőmérséklet biztosításához vízfürdőbe (Medline BS-11) helyeztük a mintákat.

A sajtok érlelése során felhasznált minták és műszeres vizsgálatok

A sajtok érési folyamatának vizsgálatához a Sole-Mizo Zrt. bácsbokodi üzeme által gyártott és trappista sajtot és bácskai gyúrt sajtot használtunk fel. A félkorong alakú trappista sajtok 700 gramm kiserelésben, vákuumcsomagolásban; a korong alakú 350 gramm kiserelésű bácskai gyúrt sajtok az üzemi érlelési gyakorlatban is alkalmazott zsugorfóliába csomagolva érkeztek. A sajtmintákat a gyári paraméterek szerint, a trappista sajtok esetében 14 ± 1 °C, a bácskai gyúrt sajtot 7 ± 1 °C hőmérsékleten tároltuk és érleltük. Mindkét típusú sajtból származó vizsgálati minták ugyanazon gyártási tételből származtak.

Az érés dielektromos paraméterekkel való követése mellett vizsgálatokat végeztünk a sajtok állományának és színének változásáról is. Ez a három különböző típusú mérés mindig egy napon történt, a trappista és a bácskai gyúrt sajtból is egy-egy mintát felhasználva. Az első mérési alkalomra a gyártástól számított 5. napon került sor. A sajtok

az érlelésinél magasabb, de minden esetben azonos, hőmérsékleten (kb. $16^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) kerültek vizsgálatra. A hőmérséklet megválasztásánál figyelembe vettük, hogy a fogyasztó a hűtőből fogyasztás előtt a terméket kivesszi, vagyis ennek hőmérséklete – a környezeti hőmérséklettől függően – néhány Celsius-fokot emelkedik. A sajtok csomagolásának eltávolítását követően a mintákat megfelelő méretű és alakú darabokra vágtuk az említett mérések kivitelezéséhez. A dielektromos- és színméréseknél 4 cm vastagságú mintát készítettünk sík metszésfelületekkel. Az esetlegesen megjelenő érési lyukakat kikerülve helyeztük el a mérőszenzorokat. A mért paramétereket a sajtminák különböző részein határoztuk meg: a sajtok külső felületének és a felülettől a középpont felé számított kb. 1 cm-es távolság közötti felületeken (kéreg), illetve a minta darabolásával a sajtok geometriai középpontjától számított 1 cm-es távolságon belül (közép).

A sajtminák állományprofil-analízisét (Texture Profile Analysis, TPA) Brookfield CT3 típusú állományvizsgáló műszerrel végeztem. A műszerrel mérhető állományjellemzők közül a keménység paramétert használtam fel a dielektromos tulajdonságokkal való összefüggések vizsgálatánál. A vizsgálatok előtt a trappista sajt és a bácskai gyúrt sajt közép és kéreg részéből kivágtott 18-20 mm vastagságú szeletet készítettünk elő. A Petri-csészébe helyezett minták fölé egy acéllemezt rögzítettünk, hogy a próbafej felfelé irányuló mozgása során megakadályozzuk a minták elmozdulását. Minden mintán 3-szor végeztünk állománymérést különböző helyeken. A mérésekhez 7 mm átmérőjű, acél próbafejet használtunk, mely 0,5 mm/s sebességgel 13 mm-es penetrációs mélység eléréséig hatolt be 2 ciklusban.

A sajtok színének objektív értékelésére Minolta CR-300 típusú tristimulusos színmérő készülékkel a CIELab színtérben értelmezett L^* , a^* és b^* színezési koordinátákat határoztam meg. Az L^* színezési koordináták a vizsgált minta világosságát adják meg egy feketétől ($L^*=0$) fehérig ($L^*=100$) terjedő skálán. Az a^* színezési koordináták határozzák meg az anyag vörösvörös színétét ($+a^*=$ vörös, $-a^*=$ zöld), b^* színezési koordináták a sárga-kék színétét ($+b^*=$ sárga, $-b^*=$ kék). Minden mérésorozat előtt a készülékhez tartozó fehér etalonnal kalibrációt végeztünk. A sajtok színezési koordinátáit a meghatározott mérési helyeken (kéreg részen, középső részen) 5-5 mérés átlagából számítottuk. A színmérés esetében is úgy választottuk meg a szenzorpozíciót, hogy a mérési pontokon az érlelés alatt kialakuló lyukakból történő reflexió ne befolyásolja a színmérés eredményeit.

EREDMÉNYEK

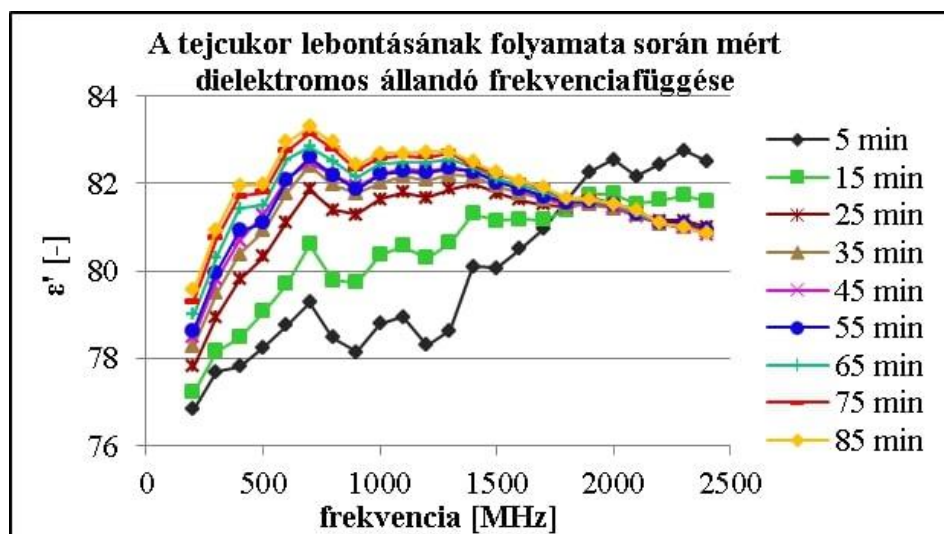
Tejcukor lebontási folyamat vizsgálata

A laktózzlebomlási folyamat közbeni dielektromos mérésekkel, illetve laktózmentes tej dielektromos paramétereivel kapcsolatos szakirodalmi eredmények nem álltak rendelkezésünkre. A tej dielektromos viselkedését illetően azonban a szakirodalom alapján megállapítható, hogy a dielektromos paraméterek frekvencia függvényében való változását a hőkezelés módja, a fejtés után eltelt idő (mikrobiális állapot), illetve a tejszíron kívüli összetevők koncentrációja egyaránt befolyásolhatják (*Munoz et al.*, 2017). A tej a nagy víztartalma ellenére, a benne oldott formában és diszperz fázisként egyaránt jelen lévő, sokféle vegyület miatt nem követi a víz dielektromos viselkedését. Tiszta vízben a dipólusos vízmolekulák a frekvencia növekedésével egyre kevésbé tudják követni a változó polaritású elektromágneses teret, ezért a dielektromos állandó csökkenő tendenciát mutat (*Barba és d'Amore*, 2012). A hőmérséklet növelés hatására a dielektromos állandó alacsony frekvenciákon nő, míg az anyagkezeléseknél használt frekvenciákat is magában foglaló magasabb frekvenciatartományban csökken. A tendenciaváltáshoz tartozó frekvenciatartomány az adott anyagra jellemző. Azonban éppen tej és egyéb folyékony halmazállapotú élelmiszeripari anyag esetében vannak olyan tanulmányok, amelyek nemcsak a mért dielektromos jellemzők abszolútértékében, hanem a változási tendenciákban is eltérő viselkedést tapasztaltak (*Zhu et al.*, 2014). Egyazon anyag esetében a nedvességtartalom csökkentése a dielektromos állandó értékét csökkenti (*Komarov et al.*, 2005), azonban ha a nedvességelvonás közben anyagszerkezeti-, vagy a hő hatására kémiai változások is végbe mennek, egyértelmű tendenciák már nem állapíthatóak meg. Az ionok jelenléte nemcsak alacsony, hanem magasabb frekvenciákon is lényegesen megváltoztathatja a dielektromos viselkedést, mivel nagyobb frekvenciákon az ionok disszociációja és vízmolekulákhoz kötődése a polarizálhatóságot is befolyásolja.

Az 5 m/m%-ban laktózt tartalmazó szuszpenzióhoz β -galaktozidáz enzim adagolása után meghatároztuk, hogy a laktóz hidrolízise hogyan befolyásolja a tejminta dielektromos viselkedését. A szakirodalomban már több esetben számoltak be arról, hogy enzimes-, illetve fermentációs folyamatok nyomon követhetőek voltak dielektromos paraméterek monitorozásával (*Olmi et al.*, 2007; *Velazquez et al.*, 2013).

A 85 perces vizsgálat kezdetén a dielektromos állandó a frekvencia függvényében karakterisztikus ingadozó értékekkel növekedett, majd a vizsgált dielektromos paraméter változásának trendje módosult a laktóz lebontásának eredményeképp, hiszen 25 percet követően 1300 MHz-1400 MHz-től egyértelmű csökkenő tendenciát figyelhetünk meg (2. ábra).

Az idő előrehaladtával a dielektromos állandó frekvenciafüggését szemléltető görbék metszéspontja 1800 MHz frekvenciától következett be. A ε' csökkenő tendenciájának kezdete 1000-1500 MHz frekvenciatartományra tehető, de ezt a lebontási idő hossza is befolyásolja.



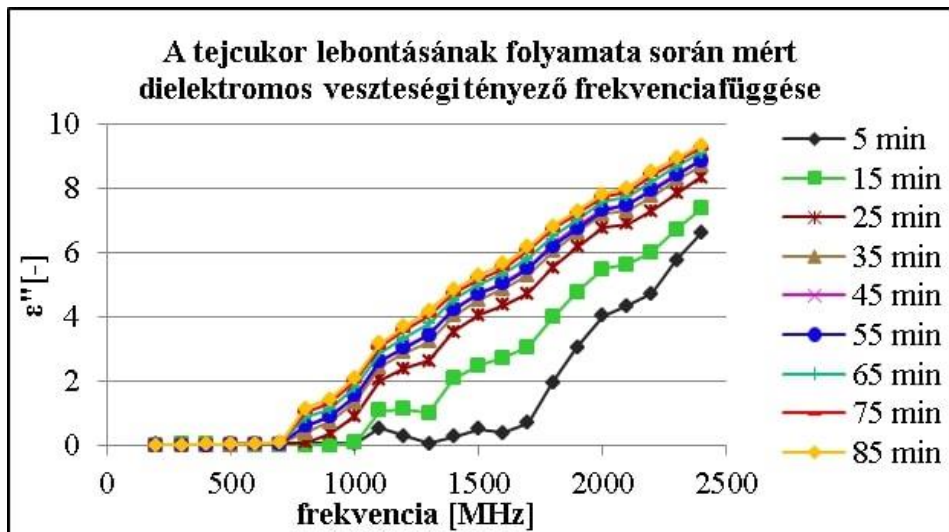
2. ábra: A tejcukor lebontás folyamata során mért dielektromos állandó frekvenciafüggése

Figure 2: Frequency dependence of the dielectric constant measured during the process of enzymatic lactose hydrolysis

A laktáz enzim tejcukor hidrolízisének következtében keletkező monoszacharid egységek könnyebben polarizálódtak az elektromos térben. Ez egy határon túl a dielektromos állandó értékében csökkenő, a veszteségi tényező értékében növekvő tendencia kialakulásához vezet. A tejcukor bomlását nem volt lehetőségünk komponensszintű analitikával nyomon követni, a méréseink során csak a dielektromos paraméterekben tendenciózus változások megjelenését kerestük. Azonban például a

szakirodalomban leírt glükóz koncentrációjának dielektromos jellemzőkre gyakorolt hatása részben magyarázhatja ezt a megfigyelést (Höchtl *et al.*, 2000; Deshmukh és Ghongade, 2016).

A veszteségi tényező frekvencia függvényében való változása a mérés ideje alatt egyre nagyobb mértékű volt (3. ábra). A tejszennél növekvő mennyiségben lévő glükóz és galaktóz – a laktóznál kisebb molekulatömegűek és ezáltal könnyebb polarizálhatóságuk miatt – az alkalmazott elektromos mező hatására növelte a dielektromos veszteséget (Fuchs és Kaatze, 2002).



3. ábra: A tejcukor lebontás folyamata során mért dielektromos veszteségi tényező frekvenciafüggése

Figure 3: Frequency dependence of the dielectric loss factor measured during the process of enzymatic lactose hydrolysis

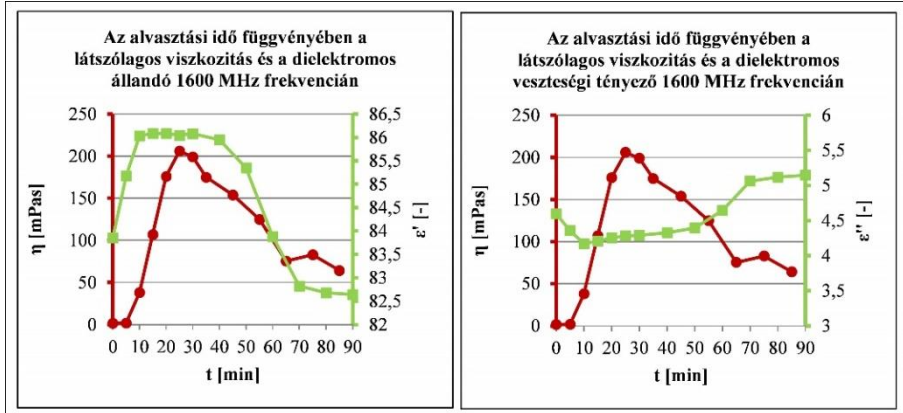
Oltós alvasztási folyamat vizsgálata

A tejtöltés alvasztása során a kazein micellák destabilizációját leggyakrabban rennin, vagy kimozin enzimek okozzák. Az enzim a kazein fehérjét glükomakropeptidekre és para- κ -kazeinre hasítja, amelyek kalciumionok jelenlétében aggregátumokká kapcsolódnak össze, majd az alvasztás következő fázisában egy térhálós polimerszerkezetet hoznak létre. A kialakult gélszerkezetű alvadék nem tartja meg végtelen hosszú ideig szerkezetét, hanem a fehérjék térszerkezeti változása miatt fellépő

szinerézis során a savó egy része kiszorul a polimerhálóból. A fehérjék esetében, modellrendszerekben a szakirodalom már leírta a konformációváltozás (*Zhou és Pang, 2018*), a fehérjéket felépítő aminosavak típusa (*Song, 2002*), illetve a fehérje-kalcium kötődés mértéke (*Penfold et al., 1998; Ye és Harte, 2013*) és a dielektromos paraméterek közötti kapcsolat meglétét. Ezek alapján, mivel az alvasztás során a fehérjefrakcióban egyes komponensek molekulatömege, a fehérjék térszerkezete, az ionok mobilitása, továbbá a szabad/kötött víz aránya is változik, a dielektromos mérések potenciálisan alkalmasak lehetnek ezen folyamatok jelzésére.

A dielektromos állandó a frekvencia függvényében azonos tendenciát követve változott; a legnagyobb értékek 1500-1600 MHz frekvencián voltak mérhetőek. A dielektromos veszteségi tényező nagyságrendnyi növekedése a frekvencia függvényében kb. 800 MHz frekvenciától volt tapasztalható. A dielektromos paraméterek változásában azt tapasztaltuk, hogy 1600 MHz frekvencián változtak a legszélesebb tartományban az értékek, ezért ezen a frekvencián mért adatokat használtuk fel a látszólagos viszkozitással való összefüggések vizsgálata során.

Az oltóenzim hozzáadásával az alvasztás során a viszkozitás értékeinek nagyságrendbeli növekedését mértük. A látszólagos viszkozitás értékeinek növekvő tendencia szerinti változásának kezdete, azaz a kazein micellák aggregálódási folyamatának megindulása 5 perc után bekövetkezett, ahogy az a *4. ábrán* is látható.



4. ábra: 1600 MHz frekvencián mért dielektromos paraméterek és a látszólagos viszkozitás az alvasztási idő függvényében

Figure 4: Dielectric parameters measured at 1600 MHz and relative viscosity as a function of clotting time

Közvetlenül az oltóenzim tejbe adagolása után mért kiindulási értékről az 1600 MHz frekvencián meghatározott dielektromos állandó mindaddig növekedett az idő előrehaladtával, amíg a látszólagos viszkozitás változásában nagyságrendnyi növekedést tapasztaltunk. A dielektromos veszteségi tényező – a dielektromos állandó változásával azonos időtartamban – a vizsgált alvasztási folyamat kezdeti szakaszában csökkent.

A viszkozitás növekedésének megindulásával a dielektromos állandó értékei nem nőttek tovább és a dielektromos veszteségi tényező csökkenő tendenciája is megszűnt, tehát a dielektromos mérésekkel az alvasztási folyamat az alvadék megszilárdulásáig volt nyomon követhető. Ez alapján elmondható, hogy a dielektromos állandó értékeinek időben növekvő szakasza a tejben az oltóenzim hatására bekövetkező kazeinmicellák hidrolízisének és a polimerháló szerkezet kialakulásához szükséges kalciumionok mobilitás változásának eredménye. A hidrolízis során kialakult kisebb részecskék és ionok könnyebben mobilizálódhattak az elektromágneses tér hatására, a relaxációs idejük csökkent, ez okozhatta a ϵ' értékében a növekvő, míg ϵ'' értékekben a csökkenő tendenciát.

A dielektromos állandó időfüggését vizsgálva a 4. ábrán látható, hogy a legnagyobb enzimkoncentrációjú tejminta dielektromos állandója a kezdeti növekedés után, a 10. percet követő fél órában egy állandó értéket tartva nem változott, majd csökkenést

követően a mérés kezdetén meghatározottnál alacsonyabb értéken állandósult. A dielektromos veszteségi tényező változásában tapasztalt minimum értéket követően növekvő tendencia volt megfigyelhető mindhárom kísérlet során, aminek következtében a 90. percben meghatározott ε'' értékek meghaladták az alvasztási folyamat kezdetén mért ε'' értékeket. A dielektromos állandó csökkenését és a dielektromos veszteségi tényező növekedését a viszkozitás növekedésének kezdetével egyidejűleg tapasztaltuk, így a ε' csökkenő és a ε'' növekvő tendenciája a kazein micellák aggregálódásával és a térhálós szerkezet kialakításához szükséges kalciumionok megkötésével, azaz a részecskék mobilitásának változásával magyarázható.

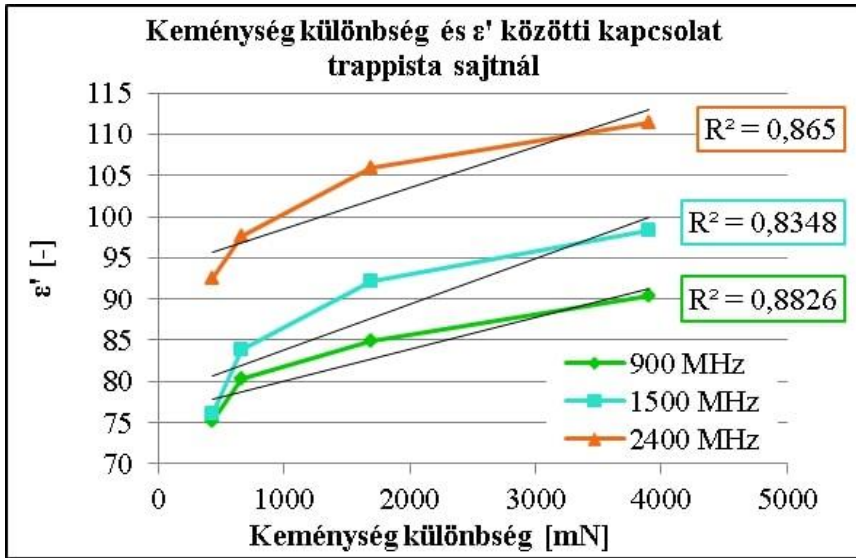
Sajt érési folyamat vizsgálata

A két vizsgált sajt dielektromos paraméterei közül a dielektromos állandó érési idővel történő változását követtük nyomon, a dielektromos veszteségi tényező értékei a frekvencia és érlelési idő függvényében nem tendenciaszerűen változtak. A szakirodalomban a sajtok esetében foglalkoztak már a dielektromos jellemzőkkel, azonban elsősorban a nedvességtartalommal, vagy a sótartalommal való korrelációt vizsgálva (Everard *et al.*, 2006; Velazquez *et al.*, 2018).

A frekvencia növekedésével nőtt a dielektromos állandó értéke függetlenül attól, hogy milyen érettségű és milyen típusú sajtot vizsgáltunk, azonban az érési időszak előrehaladásával a dielektromos állandó azonos frekvencián egyre nagyobb értékeket vett fel a gyúrt sajt nál, míg csökkenő tendencia volt tapasztalható a trappista sajt vizsgálatánál. Edami sajt érlelés közbeni dielektromos mérési tapasztalatai kapcsán Kubiš *et al.* (2001) az érési idő előrehaladtával a dielektromos állandó növekvő tendenciájáról számoltak be, igaz ebben a kutatásban magasabb frekvenciatartományban (10 GHz) végezték a kísérleteket. A különböző érettségi állapotokhoz tartozó dielektromos jellemzők közötti különbségek az összes mintát figyelembe véve 900 MHz-től a mérési frekvenciasáv maximumáig (2400 MHz) voltak nagyobb mértékűek. Ezért a következőkben, valamennyi sajt típus esetében ezen két frekvencián mért dielektromos állandókat mutatjuk be, kiegészítve egy közbenső mérési frekvenciához (1500 MHz) tartozó értékekkel.

A keménység sajtok kéreg- és középrésze közötti különbségének változása és a dielektromos állandó közötti kapcsolat trappista sajt nál közel lineáris összefüggést mutatott (5. ábra). A különbségek mérésével és az ezekhez kapcsolódó esetleges

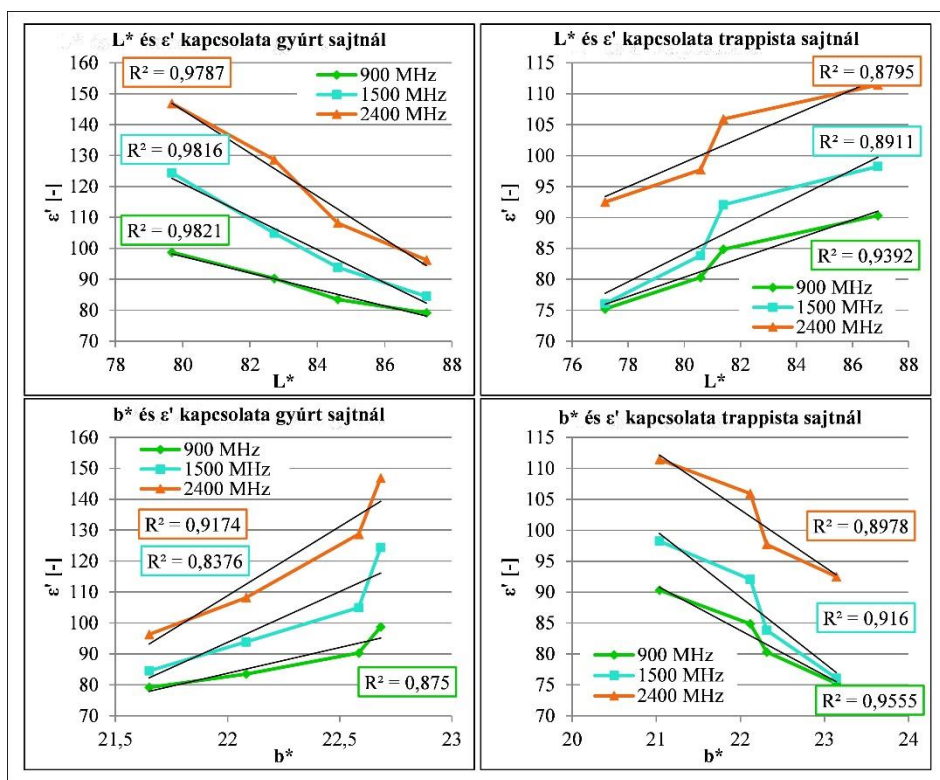
összefüggések meghatározásával a sajtok különböző rétegeiben az állomány érés alatti kiegyenlítődése vizsgálható.



5. ábra: A dielektromos állandó és a keménység két mérési pontban meghatározott különbsége közötti kapcsolat trappista sajtnál

Figure 5: Correlation between the dielectric constant and the difference in hardness determined at two measuring points in Trappist cheese

Mindkét típusú sajtnál a különböző helyeken mért dielektromos állandók átlagértékei, valamint az ugyanezen helyeken mért szinkordináták közötti kapcsolatot a 6. ábrán szemléltetjük.



6. ábra: Az L^* és a b^* szinkoordináta és a dielektromos állandó kapcsolata a két mérési pozícióban vett átlagértékek alapján

Figure 6: The correlation between the averages of color coordinate L^* and b^* and the dielectric constant measured in specific points of the cheeses

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLAT

A kutatásaink során megállapítottuk, hogy a laktózelebontás következtében keletkező monoszacharid egységek könnyebben polarizálódtak az elektromos térben, ami egy határon túl a dielektromos állandó értékében csökkenő, a veszteségi tényező értékében növekvő tendencia kialakulásához vezetett.

A kísérleti eredményeink azt mutatták, hogy az oltós alvasztási folyamat kezdeti szakaszában a dielektromos állandó növekszik, a dielektromos veszteségi tényező csökken. A látszólagos viszkozitás növekedésének megindulásával a dielektromos állandó értékei nem nőttek tovább és a dielektromos veszteségi tényező csökkenő

tendenciája is megszűnt, tehát a dielektromos mérésekkel az alvasztási folyamat az alvadék megszilárdulásáig volt nyomon követhető.

A sajtok érlelés alatti dielektromos viselkedésének vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy az érlelési idő előrehaladtával, az érlelés első szakaszában a dielektromos állandó a gyúrt sajt nál növekvő, a trappista sajt nál csökkenő tendencia szerint változott. Ezen karakterisztikusan megjelenő, az érlelés egyes szakaszaiban egyértelműen tapasztalható összefüggések, illetve a tendenciát érintő változások egy időpontra esése lehetővé teszi a dielektromos módszerek alkalmazását az érlelési folyamat nyomon követésére. A sajtok különböző helyein (kéreg és közép) mért dielektromos állandók átlagai az érlelés vizsgált időtartama alatt lineáris kapcsolatban volt az ugyanezen helyeken mért színkoordináták átlagaival, illetve trappista sajt nál a keménység két mérési pontban meghatározott keménység-különbség paraméterekkel.

Mindezek alapján tehát a dielektromos mérések alkalmazhatóak lehetnek a vizsgált egyes tejipari gyártási technológiai folyamatok nyomon követésére. Azonban a dielektromos módszerek esetében a szélesebb frekvenciatartományt érintő további mérések, illetve a dielektromos viselkedés változásának háttérében lévő részletesebb analitikai vizsgálatok szükségesek annak érdekében, hogy a dielektromos jellemzők, valamint a szín-, állomány- és reológiai paraméterek közötti egyértelmű kapcsolat feltárhatóvá váljon, és a dielektromos paramétereken alapuló becslési eljárások kidolgozhatóak legyenek.

INVESTIGATION OF CORRELATIONS BETWEEN THE PARAMETERS OF INSTRUMENTAL TEST METHODS AND DIELECTRIC MEASUREMENTS IN DAIRY TECHNOLOGY PROCESSES

RÉKA DOBOZI¹ - ZOLTÁN JÁKÓI¹ - JÓZSEF CSANÁDI² - SÁNDOR BESZÉDES¹

¹University of Szeged, Faculty of Engineering, Department of Biosystems Engineering, Szeged;

²University of Szeged, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Szeged

SUMMARY

Dielectric behavior of biological materials has been studied for decades. Dielectric characterization of dairy products was carried out in order to detect added water in milk and the concentration of additives in cheese, for instance. However, there can be found just very few study about monitoring processes in dairy technology by dielectric measurements. In our study, the change of dielectric constant and dielectric loss factor were measured during chymosin-induced (MAXIREN 600 chymosin from *Kluyveromyces lactis*) coagulation of cow milk, and the ripening period of two types of semi-hard cheese with different production technologies (Sole-Mizo Zrt., Bácsbokod). The dielectric properties were determined with open-ended coaxial probe (Speag DAK 3.5, Rhode&Schwarz ZVL-3) from 200 MHz to 2400 MHz. The enzymatic coagulation was monitored by measuring relative viscosity (AND SV-10 vibro viscometer). During cheese ripening, texture profile analysis (Brookfield CT3 TPA analyzer) and color measurement (Minolta CR300) were also applied to determine whether the changes of dielectric parameters are correlated with the physico-chemical changes. In addition, we investigated the effect of milk lactose content on dielectric behavior.

Our results show that the dielectric constant increased significantly and the dielectric loss factor decreased as the coagulation progresses forward. As the growing tendency of viscosity with the time appeared the rising tendency of dielectric constant broke and the dielectric loss factor started to increase after reaching a minimum value. Therefore, it can be concluded that the overall process is detectable by the analysis of dielectric behavior until the coagulated gel is formed. During cheese ripening processes, dielectric constants

decreased for Trappist cheese, while increased for kneaded cheese as a function of ripening time. Moreover, there is a linear correlation between the dielectric constants (900, 1500 and 2400 MHz) and the averages of color coordinates and TPA indicators measured in specific points of the cheeses.

Our results verified, that the rapid, non-destructive, and chemical-free dielectric measurement method can be suitable for the monitoring both enzymatic coagulation of milk and cheese ripening. Furthermore, it is applicable to determine the endpoint and optimal time period of these processes in dairy technology.

Keywords: dielectric measurement, milk clotting, cheese ripening, TPA, color measurement

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közlemény az Innovációs és Technológiai Minisztérium UNKP-21-1-SZTE-310 és UNKP-21-5-SZTE-556 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatómunkát a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja (BO/00161/21/4) támogatta. A szerzők köszönetüket fejezik ki a Bonafarm Csoportnak, hogy a Sole-Mizo Zrt. bácsbokodi üzeme által gyártott sajtokat rendelkezésünkre bocsátotta.

IRODALOM

Barba, A.A. - d'Amore, M. (2012): Relevance of dielectric properties in microwave assisted processes. In: *Microwave Materials Characterization (Ch 6)*. Ed.: Costanzo, S., Intech Europe. 91-118.

Bircan, C. - Barringer, S.A. - Mangino, M.E. (2001): Use of dielectric properties to detect whey protein denaturation. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 36(3). 179-86.

Cases, E. - Cayot, P. (2005): Effect of apolar phase dielectric constant on interfacial properties of β -lactoglobulin (dielectric constant and interfacial properties of β -lactoglobulin). *Food Hydrocolloids*. 19(1). 165-170.

- Deshmukh, V. V. - Ghongade, R. B. (2016):* Measurement of dielectric properties of aqueous glucose using planar ring resonator. International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom). 1-5.
- Ermolina, I. - Smith, G. (2011):* Dielectric spectroscopy of low-losses sugar lyophiles: III: The influence of moisture on the dielectric response of freeze-dried lactose. Journal of Non-Crystalline Solids. 357(2). 671–676.
- Everard, C.D. - Fagan, C.C. - O'Donnell, C.P. - O'Callaghan, D.J. - Lyng, J.G. (2006):* Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3GHz. Journal of Food Engineering. 75(3). 415-422.
- Fagan, C.C. - Everard, C. - O'Donnell, C.P. - Downey, G. - O'Callaghan, D.J. (2005):* Prediction of inorganic salt and moisture content of process cheese using dielectric spectroscopy. International Journal of Food Properties. 8(3). 543-557.
- Fuchs, K. - Kaatz, U.. (2002):* Dielectric spectra of mono- and di-saccharide aqueous solutions. The Journal of Chemical Physics. 116(16). 7137-7144.
- Guo, C. - Xin, L. - Dong, Y. - Zhang, X. - Wang, X. - Fu, H. - Wang, Y. (2018):* Dielectric properties of yogurt for online monitoring of fermentation process. Food and Bioprocess Technology. 11(5). 1096-1100.
- Guo, W. - Zhu, X. - Liu, H. - Yue, R. - Wang, S. (2010):* Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties. Journal of Food Engineering. 99(3). 344-350.
- Höchtel, P. - Boresch, S. - Steinhauser, O. (2000):* Dielectric properties of glucose and maltose solutions. The Journal of Chemical Physics. 112(22). 9810-9821.
- Komarov, V. - Wang, S. - Tang, J. (2005):* Permittivity and measurements. In: Encyclopedia of RF and Microwave Engineering. John Wiley & Sons. 3693-3711.
- Kubiš, I. - Křivánek, I. - Gajdůšek, S. (2001):* The relationships between the chemical, dielectric and sensory properties of Edam cheese during ripening. Czech Journal of Food Sciences. 19(3). 85-89.
- Liu, Q. - Guo, W. - Zhu, X. (2018):* Effect of lactose content on dielectric properties of whole milk and skim milk. International Journal of Food Science and Technology. 53(9). 1-8.
- Maenhout, G. - Santorelli, A. - Porter, E. - Ocket, I. - Markovic, T. - Nauwelaers, B. (2019):* Effect of dehydration on dielectric measurements of biological tissue as function

of time. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*. 4(3). 200-207.

Munoz, I. - Gou, P. - Picouet, P.A. - Barlabé, A. - Felipe, X. (2017): Dielectric properties of milk during ultra-heat treatment. *Journal of Food Engineering*. 219. 137-146.

Nelson, S.O. (2010): Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 44(2). 98-113.

Nelson, S.O. - Trabelsi, S. (2012): Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 46(2). 93-107.

Nelson, S.O. - Trabelsi, S. (2014): Dielectric properties of agricultural products – fundamental principles, influencing factors, and measurement techniques. In: Awuah, Ramaswamy and Tang eds. *Radio-Frequency Heating in Food Processing: Principles and Applications Vol.4.*, CRC Press. 44-48.

Ngai, K.L. - Grzybowska, K. - Grzybowski, A. - Kamińska, E. - Kaminski, K. - Paluch, M. - Capaccioli, S. (2008): Recent advances in fundamental understanding of glass transition. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 354(47). 5085-5088.

Nunes, A. - Bohigas, X. - Tejada, J. (2006): Dielectric study of milk for frequencies between 1 and 20 GHz. *Journal of Food Engineering*. 76(2). 250-255.

Olmi, R. - Meriakri, V.V. - Ignesti, A. - Priori, S. - Riminesi, C. (2007): Monitoring alcoholic fermentation by microwave dielectric spectroscopy. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 41(3). 37-49.

Penfold, R. - Warwicker, J. - Jönsson, B. (1998): Electrostatic models for calcium binding proteins. *Journal of Physical Chemistry B*. 102. 8599-8610.

Skierucha, W. - Wilczek, A. - Szyłowska, A. (2012): Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International Agrophysics*. 26(2). 187-197.

Solyom, K. - Lopez, P.R. - Esquivel, P. - Lucia, A. - Vásquez-Caicedo, A.L. (2020): Effect of temperature and moisture contents on dielectric properties at 2.45 GHz of fruit and vegetable processing by-products. *RSC Advances*. 10(28). 16783-16790.

Song, X. (2002): An inhomogeneous model of protein dielectric properties: Intrinsic polarizabilities of amino acids. *The Journal of Chemical Physics*. 116(21). 9359-9363.

Şoproni, D. - Maghiar, T. - Molnar, C. - Francisc, I. - Hathazi, F.I. - Bandici, L. - Arion, M. - Krausz, A. (2008): Study of electromagnetic properties of the agricultural products. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 1(1). 130-133.

Tıraş, B. - Dede, S. - Altay, F.L. (2019): Dielectric Properties of Foods. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology. 7(11). 1805-1816.

Velazquez, J. - Castro-Giráldez, M. - Fito, P.J. (2013): Control of the brewing process by using microwaves dielectric spectroscopy. Journal of Food Engineering. 119(3). 633-639.

Velazquez, J. - Castro-Giráldez, M. - Cuibus, L. - Tomas-Egea, J.A. - Socaciu, C. - Fito, P.J. (2018): Study of the cheese salting process by dielectric properties at microwave frequencies. Journal of Food Engineering. 224. 121-128.

Ye, R. - Harte, F. (2013): Casein maps: Effect of ethanol, pH, temperature, and CaCl₂ on the particle size of reconstituted casein micelles. Journal of Dairy Science. 96(2). 799–805.

Zhang, M. - Li, L. - Cheng, J. - Wang, J. - Ding, J. - Yuan, X. - Zhou, S. - Liu, X. (2019). Effects of moisture, temperature, and salt content on the dielectric properties of pecan kernels during microwave and radio frequency drying processes. Foods. 8(9). 385.

Zhou, H. X. - Pang, X. (2018). Electrostatic interactions in protein structure, folding, binding, and condensation. Chemical Reviews. 118(4). 1691-1741.

Zhu, X. - Guo, W. - Jia, Y. (2014). Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4.500 MHz relevant to radio-frequency and microwave pasteurization process. Food and Bioprocess Technology. 7(6). 1830-1839.

Zhu, X. - Guo, W. - Liang Z. (2015). Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties. Food and Bioprocess Technology. 8(7). 1485-1494.

Zhu, Z. - Guo, W. (2017). Frequency, moisture content, and temperature dependent dielectric properties of potato starch related to drying with radio-frequency/microwave energy. Scientific Reports. 7(1). 9311.

A szerzők levélcíme – Address of the authors:

Dobozi Réka

Szegedi Tudományegyetem

Mézőgazdasági Kar

Biológiai Rendszerek Műszaki Intézete

6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.

e-mail: dobozireka2000@gmail.com

Jákói Zoltán

Szegedi Tudományegyetem

Mézői Kar

Biológiai Rendszerek Műszaki Intézete

6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.

e-mail: jakoiz@mk.u-szeged.hu

Dr. Csanádi József

Szegedi Tudományegyetem

Mézői Kar

Élelmiszermérzői Intézet

6725 Szeged, Moszkvai krt. 5-7.

e-mail: csanadi@mk.u-szeged.hu

Dr. Beszédes Sándor

Szegedi Tudományegyetem

Mézői Kar

Biológiai Rendszerek Műszaki Intézete

6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.

e-mail: beszedes@mk.u-szeged.hu