

Automatizált, környezet és termékbarát folyadékfertőtlenítő berendezés

Automated, Environmentally and Product-Friendly Beverage Disinfection System

TÓKOS Attila¹, BARTHA Csaba¹, LINGVAY Mónika², BARTHA Áron¹

¹Research-Development Institute for Environmental Protection Technologies and Equipment – ICPE Bistrița SA,
Str. Parcului, Nr. 7, 420035, Bistrița, BN-RO, Fax: +40 263 210938, <https://www.icpebn.ro>
E-mail: icpe@icpebn.ro

²Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet,
Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológia Tanszék, H-4400 Nyíregyháza, Kótaji út 9–11,
<https://mat.nye.hu/hu>, E-mail: lingvay.monika@nye.hu

Abstract

A remotely controllable, closed-loop automated system designed for the continuous-flow, product- and environmentally friendly disinfection of liquid products (milk, drinking water, fruit juices, etc.) was presented. The presented system is designed to provide microbial inactivation in the processed liquid without heating and/or the addition of chemical disinfectants.

Keywords: beverages, disinfection, electroporation, automation, SCADA

Kivonat

Egy távolról vezérelhető, zárt hurokban automatizált, a folyékony termékek (tej, ivóvíz, gyümölcslevek stb.) termék- és környezetbarát, folyamatos áramlású fertőtlenítésére alkalmas berendezés lett bemutatva. A bemutatott berendezés célja a mikroorganizmusok elpusztítása a feldolgozott folyadékban, melegítés és/vagy kémiai fertőtlenítőszeres adagolása nélkül.

Kulcsszavak: italok, fertőtlenítés, elektroporáció, automatizálás, SCADA

1. BEVEZETÉS

A folyékony termékek, beleértve az élelmiszereket (például gyümölcslevek, ivóvíz, tej stb.) fertőtlenítése/sterilizálása egy komplex és nagy gyakorlati jelentőségű tematika [1-3].

A folyadékokban levő kórokozó mikrobiológiai ágensek elpusztításának (fertőtlenítés) szokásos módszerei (hőkezelések közvetlen melegítéssel vagy nagyfrekvenciás elektromos térben - beleértve a mikrohullámokat is; kémiai fertőtlenítőszeres adagolása – pl. az ivóvíz klórozása), azzal a nagy hátránnyal járnak, hogy módosítják a kezelt termék kémiai összetételét (gyümölcs-leveknél egyes vitaminok termikus bomlása, fertőtlenítőszeres maradványai a késztermékben stb.). Ugyanakkor, ezek a módszerek jelentős energia és/vagy kémiai reagens fogyasztással járnak [3, 4]. Az ultraibolya UV sugárzással történő fertőtlenítés korlátozottan alkalmazható mivel egyrészt az abszorbeáló vagy zavaros közegeknek az UV csillapítása nagy és másrészt az UV- forrásoknak alacsony az energiahatékonysága. Az ózon adagolása a folyadékokba [5], bár biztosítja a termék fertőtlenítését túlzott melegítés nélkül, egyes összetevőinek oxidációjához vezethet. Másrészt az ózon-generátoroknak jelentős az energiafogyasztása.

Az extrém alacsony frekvenciájú elektromos térnek (ELF) kitett mikroorganizmusok viselkedését vizsgáló legújabb kísérleti tanulmányok rávilágítottak arra a tényre, hogy a 2-500 Hz tartományban, diszkrét „érzékeny” frekvenciákon, az alacsony térerők (10 V/m-ig) serkentik a mikroorganizmusok növekedését és szaporodását. Ezzel ellentétben az intenzív elektromos terek (100 V/cm felett), a frekvenciától függetlenül, a sejtmembránok permeabilizálásával (perforálásával) a mikroorganizmusokat elpusztítják [6-8].

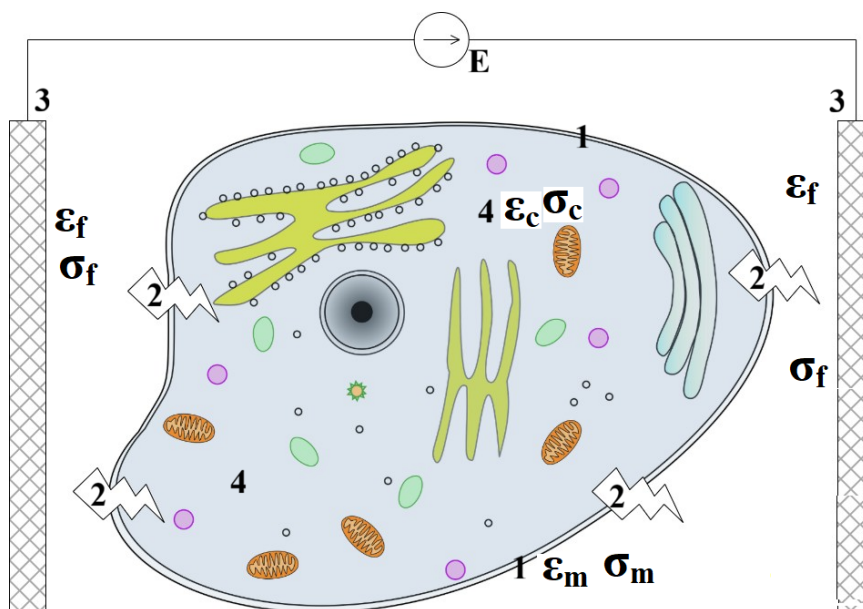
A mikroorganizmusok anyagcseréjének és szaporodásának stimulációját meghatározó diszkrét frekvenciák meghatározását dielektromos spektroszkópiai technikával végzik [7-9]. E tanulmányok eredményei alapján, ipari alkalmazásra, teljesen automatizált és SCADA rendszerrel távvezérelt berendezések, a szennyvíztisztító telepek aktív iszapjában lévő mikroorganizmusok anyagcseréjének stimulálására lettek kivitelezve. Ezek a berendezések, a biológiai tisztítási szakaszban, a fajlagos villamosenergia-fogyasztás [kWh/m^3 kezelt víz] 50%-os csökkenését eredményezték [10-12]. Több tanulmányban, hasonló elven működő (növekedésserkentés ELF térben), automatizált és SCADA rendszerrel felügyelt berendezés a mikroalgák intenzív termelésére lett bemutatva [13-15].

Mikroorganizmusokat tartalmazó folyékony közegekre intenzív elektromos tér (általában $100 \text{ V}/\text{cm}$ -nél nagyobb) alkalmazása a sejtmembránok permeabilitásának növekedéséhez vezet (elektroporáció). [16]. Ez a folyamat kísérletileg a propidium-jodid abszorpciójával volt bizonyítva [17-19].

Mindezekre való tekintettel dolgozatunk célja egy az italok folyamatos áramlású, termék- és természetbarát fertőtlenítésére alkalmas távvezérelt, automatizált berendezés bemutatása.

2. AZ ELEKTROPORÁCIÓS FERTŐTLENÍTÉS

Az elektroporációs fertőtlenítés elve az 1. ábrán van bemutatva.



1. ábra: Az elektroporációs fertőtlenítés elvi vázlata

E – feszültségforrás, 1 – sejtmembrán;

2 – elektromos áttűtés által a sejtmembránban kialakuló pórusok;

3 – elektródák; 4 – citoplazma

Az 1. ábrából megfigyelhető, hogy a σ_f elektromos vezetőképességű és ϵ_f relatív dielektromos permittivitású folyadékban jelen lévő (1) sejtmembránnal (elektromos vezetőképesség σ_m és relatív dielektromos permittivitása ϵ_m) és (4) citoplazmával (elektromos vezetőképesség σ_c és relatív dielektromos permittivitás ϵ_c) rendelkező mikroorganizmus a két síkpárhuzamos polarizációs elektróda (3) között az E elektromos generátor feszültsége által képzett elektromos térnek van kitéve. Az E által generált elektromos térerővonalak eloszlanak a rendszerben, és a σ_m , ϵ_m , σ_c , ϵ_c , σ_f és ϵ_f értékektől függően a membránpotenciál (Ψ) jelentős növekedéséhez vezetnek [20]. Az így létrehozott túlfeszültség hatására a sejtmembránon lyukak (2) képződnek. Az elektromos perforációt (elektroporáció) követően a sejtmembránok permeabilizálódnak, és a kialakult pórusokon keresztül a citoplazma szétoszlik a környezetbe (a fertőtlenítendő folyadékba) – ami a mikroorganizmus pusztulásához (halálához) vezet.

Megjegyzendő, hogy a sejtmembrán áttűtését főleg az alkalmazott elektromos tér intenzitása határozza meg, és kevésbé függ a rendszeren áthaladó áramtól, vagy a mikroorganizmusok elektromos térnek való kitettségének idejétől – tehát a sterilizálás rövid elektromos impulzusokkal is elérhető (így a folyadék Joule-effektus általi felmelegedése elhanyagolható, és az energiafogyasztás aránylag kicsi).

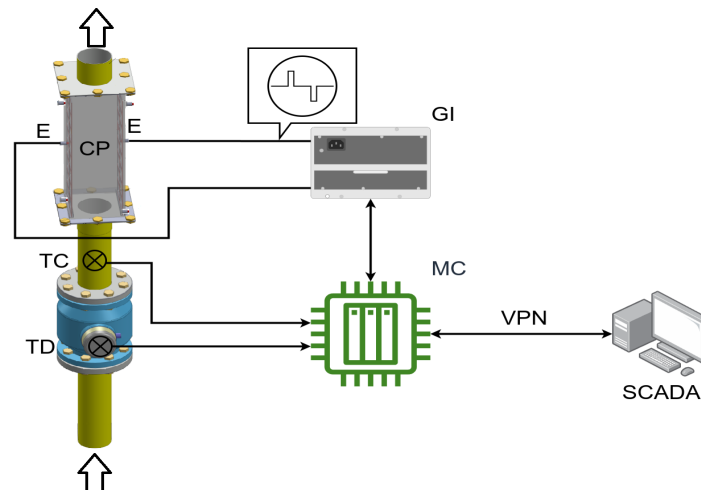
3. AUTOMATIZÁLT ÉS TÁVVEZÉRELT ELEKTROPORÁCIÓS BERENDEZÉS

A berendezés tervezésekor a következő szempontokat/kritériumokat voltak figyelembe véve:

- a) minimális beruházási költségek mellett magas termelékenység biztosítása, ami folyamatos áramlásban alkalmazható fertőtlenítési eljárással érhető el;
- b) az alkalmazott fertőtlenítési eljárásnak termékkíméletesnek kell lennie, azaz nem módosíthatja a fertőtlenített folyadék fizikai-kémiai jellemzőit. Ez kizárja a kémiai fertőtlenítőszeres adagolását, a kezelt folyadék 40 °C fölé történő melegítését és/vagy intenzív fénysugárzásnak való kitettségét, kiküszöbölve a kezelt folyadékok szennyezését, valamint a bennük lévő tápanyagok és vitaminok bomlásának kockázatát [21–24];
- c) a kezelt folyadékok fertőtlenítésének biztosítása minimális fajlagos energiafogyasztás mellett, azaz magas energiahatékonysággal;
- d) biztonságos autonóm működés, a fertőtlenítési folyamat zárt automatizálási hurokban (a beépített szenzorok és jelátalakítók által kibocsátott jelek függvényében) – a fertőtlenítési technológiai folyamat távolról vezérelhető és állítható legyen egy üzemirányító/SCADA rendszeren keresztül.

Az a), b) és c) kritériumokat gyakorlatilag az alkalmazott/kiválasztott fertőtlenítési módszer határozza meg. Így a berendezés tervezésénél az elektroporáción alapuló fertőtlenítési módszer volt alkalmazva.

A megtervezett és kivitelezett fertőtlenítő berendezés vázlatja a 2. ábrán van bemutatva.



2. ábra: A fertőtlenítő berendezés vázlatja

CP – polarizációs cella, E – elektródák, GI – impulzusgenerátor, TC – vezetőképesség jelátalakító, TD – hozam jelátalakító, MC folyamatvezérlő mikroprocesszor, VPN – virtuális kommunikációs magán (biztosított) hálózat, üzemirányító SCADA rendszer

A 2. ábra szerint, a fertőtlenítendő folyadék (ivóvíz, tej, gyümölcsle stb.) a CP polarizációs cellába a TD hozamjelátalakítón keresztül áramlik (lentől felfelé, tehát a polarizációs cella állandóan tele van folyadékkal). A CP-be jutás előtt, a TC vezetőképesség jelátalakítóval, meg van mérve a folyadék vezetőképessége. A TC és TD értékek függvényében az MC folyamatvezérlő mikroprocesszor által vezérelt GI impulzusgenerátor meghatározott időközönként (15-100 ms), meghatározott időtartamú és UV csúcsfeszültségű impulzusokat ad az elektródákra.

A fertőtlenítendő folyadékban létező összes kórokozó mikroorganizmus inaktiválásához szükséges elektromos térerősséget, E [V/cm], a sejtmembrán σ_m és ϵ_m paraméterei, a citoplazma σ_c és ϵ_c paraméterei, valamint a kezelt folyadék σ_f és ϵ_f paraméterei határozzák meg. A σ_f és ϵ_f paraméterek a fertőtlenítendő folyadék váltakozó áramú vezetőképességét határozzák meg (folyamatosan mérve TC). A folyadékban jelen lévő kórokozó mikroorganizmusokat, valamint az alkalmazott E elektromos térerősség mellett elért fertőtlenítési hatékonyságot kísérletileg határozzák meg (specifikus mikrobiológiai módszerekkel). A megfelelő fertőtlenítést biztosító E térerősség eléréshez, az egymástól d távolságra rögzített elektródákra adott UV csúcsfeszültségű impulzusok szükségesek, tehát (1):

$$Uv = E \cdot d \quad (1)$$

A fertőtlenítéshez szükséges energiát, E_n , az összes alkalmazott elektromos impulzus energiájának összege adja meg, $W_n = \sum W_i$. Egy impulzus energiáját W_i [J] a (2) egyenlettel számíthatjuk ki:

$$W_i = \int_0^t u(t)i(t)dt \quad (2)$$

ahol: u – az impulzus feszültségének pillanatnyi értéke [V], t – az impulzus időtartama [s] (a 2. ábra szerint kb. 1 és 4 ms között – ameddig az impulzus feszültsége eléri az U_v értéket) és i – az áram pillanatnyi értéke [A].

Két egymást követő impulzus közötti időintervallum 15 és 100 ms között van, a fertőtlenítő cellán áthaladó folyadék áramlási sebességétől függően. Az impulzusismétlési gyakoriságot az MC-re telepített program automatikusan, úgy vezérli a TD által generált folyadékhozam-jel függvényében, hogy a hidraulikus tartózkodási idő alatt a teljes fertőtlenítés megtörténjen.

A szabályozási algoritmus szabályalapú adaptív stratégiaként valósul meg, amelyben a vezetőképességméréseket az impulzus amplitúdójának és időtartamának meghatározására, az áramlási sebesség mérését pedig az impulzus ismétlési intervallum beállítására van használva. Az impulzus amplitúdója a beépített mérőegység segítségével zárt hurkú vezérléssel van szabályozva. Az üzemi tartományok a várható folyadékjellemzőknek megfelelően előre meghatározottak, és mikrobiológiai validációs kísérletekkel finomítják őket. A MC-SCADA-architektúrán keresztül megvalósított adaptív szabályozási stratégia a javasolt telepítés lényeges eleme. A kezelt folyadék jellemzői jelentősen változhatnak a forrástól és az üzemi körülményektől függően, ami befolyásolja a fertőtlenítési folyamat hatékonyságát. A folyamatparaméterek folyamatos monitorozásával és az elektromos impulzusok amplitúdójának, időtartamának és gyakoriságának automatikus beállításával a rendszer fenntartja a mikroorganizmusok inaktiválásához szükséges feltételeket, miközben korlátozza az energiafogyasztást.

A fertőtlenítő berendezés távfelügyelete és a folyamatparaméterek beállítása a PLC-hez csatlakoztatott SCADA rendszeren keresztül történik, ezáltal jelentősen csökkentve a kezelői beavatkozást és a kapcsolódó üzemeltetési költségeket. A SCADA platformhoz való távoli hozzáférés csak a jogosult felhasználók számára lehetséges jelszóval védett VPN kommunikációs csatornákon keresztül.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Egy távolról vezérelhető, zárt hurokban automatizált, a folyékony termékek (tej, ivóvíz, gyümölcslevek stb.) termék- és környezetbarát, folyamatos áramlású fertőtlenítésére alkalmas berendezés lett bemutatva. A bemutatott berendezés a mikroorganizmusok elpusztítására lett kifejlesztve a feldolgozott folyadékokban melegítés és/vagy kémiai fertőtlenítőszeres adagolása nélkül. A kifejlesztett és bemutatott berendezés az elektroporáció elvén működik, mely szerint a mikroorganizmusokkal fertőzött folyadék intenzív elektromos impulzusok által képzett elektromos térben van átvezetve. Az intenzív elektromos tér maradandó pórusokat képez a sejtmembránokon (elektroporáció) és a sejtmembránok permeabilizálódnak. A permeabilizált sejtmembránon a sejt citoplazmája kijut a közegbe (kezelt folyadék) és a mikroorganizmus elpusztul (a folyadék fertőtlenítődik). A berendezés teljesen automatizált, és távolról – VPN-el biztosított digitális kommunikációs hálózaton keresztül vezérelhető és monitorozható a telepített SCADA rendszerrel. A megvalósított automatizációs rendszer biztosítja az impulzusgenerátor működésének zárt hurkú vezérlését (az impulzusok amplitúdója, időtartama és gyakorisága) az áramlás- és vezetőképesség-érzékelők által szolgáltatott jelek függvényében, így a fertőtlenítés biztonságos és minimális energiafogyasztással történik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Dolgozatunkat a Romániai Oktatási és Kutatási Minisztérium (CCCDI - UEFISCDI) támogatta anyagiilag a PNCDI IV tudományos program keretében - kutatási szerződés: PN-IV-P7-7.1-PTE-2024-0106 (EPDEcoA)

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by a grant of the Romanian Ministry of Education and Research, CCCDI – UEFISCDI, under the scientific project PN-IV-P7-7.1-PTE-2024-0106 „EPDEcoA”.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. P. S. Cabral, "Water Microbiology. Bacterial Pathogens and Water," *IJERPH*, vol. 7, no. 10, pp. 3657–3703, Oct. 2010, doi: 10.3390/ijerph7103657.
- [2] M. V. Yates, "Drinking Water Microbiology," in *Reference Module in Biomedical Sciences*, Elsevier, 2018, p. B9780128012383661238. doi: 10.1016/B978-0-12-801238-3.66123-8.
- [3] M. Collivignarelli, A. Abbà, I. Benigna, S. Sorlini, and V. Torretta, "Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 86, Dec. 2017, doi: 10.3390/su10010086.
- [4] C. Chahal, B. van den Akker, F. Young, C. Franco, J. Blackbeard, and P. Monis, "Chapter Two - Pathogen and Particle Associations in Wastewater: Significance and Implications for Treatment and Disinfection Processes," vol. 97, S. Sariaslani and G. M. Gadd, Eds., in *Advances in Applied Microbiology*, vol. 97., Academic Press, 2016, pp. 63–119. doi: <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2016.08.001>.
- [5] Wastewater technology fact sheet : ozone disinfection. [Washington, D.C.] : United States Environmental Protection Agency, Office of Water, [1999], 1999. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/ozon.pdf>
- [6] C. Bartha et al., "Behavior of Microorganisms from Wastewater Treatments in Extremely Low-Frequency Electric Field," *Biointerface Research in Applied Chemistry*, vol. 12, pp. 5071–5080, Oct. 2021, doi: 10.33263/BRIAC124.50715080.
- [7] E. Radu, D. Lipcinski, N. Tanase, and I. Lingvay, "The influence of the 50 Hz electric field on the development and maturation of *Aspergillus niger*," *EEA - Electrotehnică, Electronică, Automatică*, vol. 63, pp. 68–74, Jan. 2015.
- [8] A. Tókos, C. Bartha, M. Jipa, D.-D. Micu, A.-R. Caramitu, and I. Lingvay, "Interactions of Extremely Low-Frequency Electric Field with the Active Sludge Live Materia from Wastewater Treatments," in *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania: IEEE, Mar. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425187.
- [9] M. Lingvay, A. R. Caramitu, A.-M. Borș, and I. Lingvay, "Dielectric spectroscopic evaluation in the extremely low frequency range of an *Aspergillus niger* culture," *Studia Universitatis Babeș-Bolyai Chemia*, vol. 64, pp. 279–288, Jun. 2019, doi: 10.24193/subbchem.2019.2.23.
- [10] A. Tókos et al., "Contributions to Energy Saving in Wastewater Treatment Plants," in *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Prague, Czech Republic: IEEE, Jul. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872736.
- [11] C. Bartha et al., "Saving Energy in Biological Wastewater Treatment by Using Extremely Low-Frequency Electric Field—Pilot-Scale Study," *Sustainability*, vol. 15, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151511670.
- [12] A. Tókos, C. Bartha, D. D. Micu, M. Jipa, I. Nascu, and I. Lingvay, "Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants," in *2021 9th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania: IEEE, Jun. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MPS52805.2021.9492616.
- [13] A. Voina et al., "Equipment for Increasing the Phototrophic Microalgae Production at Lab Scale," in *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Cape Town, South Africa: IEEE, Nov. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICECET58911.2023.10389345.
- [14] A. Tókos et al., "Automation control system of an equipment for ELF stimulated phototrophic microalgae production," in *2024 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*, Victoria, Seychelles: IEEE, Feb. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/ACDSA59508.2024.10468047.
- [15] I. Lingvay, M. Vranceanu-Jipa, R.-A. Chihaia, A. Tókos, C. Bartha, and G. Circiumaru, "Impact of 50 Hz Electromagnetic Field on the Growth of *Chlorella vulgaris*," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, p. 6506, 2024, doi: 10.3390/app14156506.
- [16] C. Ungureanu, S. Răileanu, D. S. Ștefan, I. Lingvay, A. Tokos, and M. Ștefan, "Electric Field Effects on Microbial Cell Properties: Implications for Detection and Control in Wastewater Systems," *Environments*, vol. 12, no. 10, p. 343, Sep. 2025, doi: 10.3390/environments12100343.
- [17] C. Chen, S. W. Smye, M. P. Robinson, and J. A. Evans, "Membrane electroporation theories: a review," *Med Bio Eng Comput*, vol. 44, no. 1–2, pp. 5–14, Mar. 2006, doi: 10.1007/s11517-005-0020-2.
- [18] N. Barauskaitė et al., "Using pulse electric fields (PEF) for selective inactivation of coliform bacteria," *biologija*, vol. 68, no. 4, Dec. 2022, doi: 10.6001/biologija.v68i4.4840.
- [19] J. P. Stratford et al., "Electrically induced bacterial membrane-potential dynamics correspond to cellular proliferation capacity," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 116, no. 19, pp. 9552–9557, May 2019, doi: 10.1073/pnas.1901788116.
- [20] J. M. Benarroch and M. Asally, "The Microbiologist's Guide to Membrane Potential Dynamics," *Trends in Microbiology*, vol. 28, no. 4, pp. 304–314, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.tim.2019.12.008.

- [21] T. Yu, J. D. Morton, S. Clerens, and J. M. Dyer, "Cooking-Induced Protein Modifications in Meat," *Comp Rev Food Sci Food Safe*, vol. 16, no. 1, pp. 141–159, Jan. 2017, doi: 10.1111/1541-4337.12243.
- [22] J. F. Vaz and P. K. Sharma, "Adaptational changes in the lipids and fatty acid profile of the cell and thylakoid membrane of rice plants exposed to sunlight," *Physiol Mol Biol Plants*, vol. 16, no. 3, pp. 229–240, Jul. 2010, doi: 10.1007/s12298-010-0024-8.
- [23] X. Wang, N. Qiu, and Y. Liu, "Effect of Different Heat Treatments on In Vitro Digestion of Egg White Proteins and Identification of Bioactive Peptides in Digested Products," *Journal of Food Science*, vol. 83, no. 4, pp. 1140–1148, Apr. 2018, doi: 10.1111/1750-3841.14107.
- [24] S. E. Duncan and H.-H. Chang, "Implications of Light Energy on Food Quality and Packaging Selection," in *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 67, Elsevier, 2012, pp. 25–73. doi: 10.1016/B978-0-12-394598-3.00002-2.