

RÓNAVÁRI Andrea¹ – KOZMA Gábor² – KÓNYA Zoltán³**Abstract**

Over the past decade, we have witnessed the development of newer nano-based foods (containing nanoscale materials or nanotechnology), innovative food packaging materials, so-called "green-nanotechnology" crop production, or nano-biosensors introduced in the field of food safety and waste-reduction. The exploitation and development of nanotechnology-based processes related to the food industry has resulted in numerous patents, as food technologists and engineers constantly need to find new ways to develop foods that may appeal to consumers globally. At the same time, the use of nanoparticles in food technology poses a major challenge due to concerns about the health and safety of consumers. In this article, the nanotechnology applications related to currently available food, the development trends and their effects on the food industry are summarized.

Keywords

nanotechnology, food industry, nutrition, food safety

Absztrakt

Az elmúlt évtizedben szemtanúi lehettünk az újabbnál újabb nanoalapú (nanoméretű anyagokat tartalmazó vagy nanotechnológiával előállított) élelmiszerek, innovatív élelmiszer csomagolóanyagok, az úgynevezett „zöld-nanotechnológiás” növénytermesztés, vagy az élelmiszer-biztonság és hulladékcsökkentés fényében bevezetett nano-bioszenzorok fejlődésének. Az élelmiszeriparral kapcsolatos nanotechnológia alapú eljárások kiaknázása és fejlesztése számos szabadalmat eredményeztek, mivel az élelmiszertechnológusoknak és mérnököknek folyamatosan új módszereket kell találniuk az olyan élelmiszerek fejlesztése közben, amelyek globális szinten vonzóak lehetnek a fogyasztók számára. Ugyanakkor a nanorészecskék élelmiszertechnológiában való alkalmazása, a fogyasztók egészségével és biztonságával kapcsolatos aggodalmak miatt nagy kihívást jelent. Ebben a dolgozatban összefoglaljuk a jelenleg elérhető élelmiszerekkel kapcsolatos nanotechnológiai alkalmazásokat, a fejlesztési irányzatokat és ezek élelmiszeriparra gyakorolt hatásait.

Kulcsszavak

nanotechnológia, élelmiszeripar, táplálkozás, élelmiszer-biztonság

¹ ronavari@chem.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0001-7054-0975 | research fellow, Department of Applied and Environmental Chemistry, Faculty of Science and Informatics, University of Szeged | tudományos munkatárs, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

² kozmag@chem.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0003-2033-0720 | Assistant professor, Department of Applied and Environmental Chemistry, Faculty of Science and Informatics, University of Szeged | adjunktus, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

³ konya@chem.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0002-9406-8596 | Full professor, Department of Applied and Environmental Chemistry, Faculty of Science and Informatics, University of Szeged | Egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

BEVEZETÉS

A „nano-tudomány” a nanoméretű anyagokkal, valamint azok méret- és szerkezetfüggő tulajdonságainak megértésével foglalkozik, összehasonlítja az egyedi atomok, molekulák, vagy tömbi anyagok megjelenésével kapcsolatos különbségeket. A tudományterületen belül a nanotechnológia a nanoméretű anyagok kezelését és szabályozását jelenti, melynek célja a különböző ipari és gyógyászati eljárások és anyagok fejlesztése. Így a nanotechnológia egy olyan átfogó tudományág, ami alkalmazza a fizikai, kémiai, anyagtudományi és más mérnöki tudományokkal kapcsolatos ismereteket. Sok más példához hasonlóan, az emberiség a nanoméretű anyagokat már évezredek óta használja, azonban a célirányos kutatásuk és alkalmazásuk a múlt század végén vált jelentőssé. Népszerűségük oka a méretüknek és nagy fajlagos felületüknek köszönhető, amik miatt egyedi fizikai és kémiai tulajdonságokat mutatnak. [1, 2] A nanoanyag kifejezés alatt azokat az anyagokat értjük, melyek esetén a részecskeméret legalább egyik dimenziójában 1-100 nm közé esik. Az alapján, hogy az átlagos részecske alak hány dimenziójában kisebb ennél a kritikus méretnél, megkülönböztetünk 0, 1 és 2 dimenziós nanorészecskéket, amelyek ebben a sorrendben a nanopötty; nanocső vagy nanoszál; illetve réteges, lamellás szerkezetet jelentenek. [3, 4]


Az élelmiszeripar kezdetben kifejezetten nyitott volt a "nano" korszak vívmányaira, amit elősegített az ilyen jellegű kutatások kiemelt anyagi támogatása és a fogyasztók egyre nagyobb igénye az egyre egészségesebb termékek iránt. A "nanotechnológia" használatának lehetőségei tehát arra készítettek az élelmiszertudósokat, hogy innovatívan gondolkodjanak ezen elvárások kielégítésére. A nanotechnológiát alkalmazó élelmiszerek piacát azonban a kezdeti lelkesedés ellenére lassították a fogyasztók potenciális kockázatainak aggályai, [5-7], az Egészségügyi Világszervezet [8], a nemzeti kormányzati szabályozó szervek [9], így a tudomány képviselői [10] és az ipar élelmiszer-biztonsági szempontból minden esetben megvitatják és értékelik „nanoélelmiszerek” várható hatását az emberi szervezetre. Ennek okán közel két évtizeddel ezelőtt vezető élelmiszeripari szakemberek, tudományos körök és kormányzati szervek létrehoztak egy olyan fórumot, amely megvizsgálja a nanoalapú anyagok élelmiszerekbe történő bevezetésének lehetőségeit.

Az első széles körben alkalmazott eljárás során vékony szeretlen bevonatokat alakítottak ki az élelmiszerek felszínén, ami megnövelte eltarthatóságukat [11]. Később olyan biokompatibilis anyagok fejlesztésére törekedtek, amik megelőzik a különböző kórokozók (pl.: *Salmonella choleraesuis*) az élelmiszerek felszínén történő megtapadását és szaporodását. [12] Egy másik nagy kutatási területnek számít a nanotechnológiás csomagolóanyagok tervezése, amik egyszerre lehetnek alkalmasak az élelmiszerek oxidatív úton történő romlásának megakadályozására, vagy éppen bioszenzorok alkalmazásával az adott élelmiszer fogyaszthatóságának jelzésére. [13]

NANOTECHNOLÓGIA AZ ÉLELMISZERIPARBAN

A félelemmel szemben a nanotechnológia alkalmazása az élelmiszerekben számos lehetőséget kínál a jobb és biztonságosabb fogyasztási cikkek előállítására. Jelenleg négy fő élelmiszer-fejlesztési területre van kiemelt hatással: ezek a mezőgazdaság; az élelmiszerfeldolgozóipar; az élelmiszer csomagolás; és a speciális táplálékkiegészítők (1. ábra). Ezekkel alapvetően létrehozhatunk teljesen új funkcionális anyagokat, a tápérték növelését segítő bioaktív összetevőket, olyan funkcionális nanorészecskéket, melyek bioszenzorként

használhatunk, vagy a termékek eltarthatóságát jelentősen megnövelő csomagolóanyagokat. Léteznek olyan nanokapszulák, melyek aktiválásával az élelmiszer színe vagy íze szabályozható a fogyasztó igénye szerint [14], vagy például a Nestlé saját fejlesztése az olyan illékony vegyületek, illat és ízanyagok emulgeált rendszerekben való megőrzése, amivel ezen aromatizáló ágensek tartósan az élelmiszerben maradnak. [15] A mezőgazdaság terén a peszticidek célzott alkalmazásában jelentős a nanoanyagok felhasználása [16], sőt, ma már olyan növényi bevonatok is készülnek, amelyek a víz vagy tápanyagszükségletet képesek jelezni [17]. A nanotechnológia használata az élelmiszerek eltarthatóságának javításával, a romlás és így az élelmiszerpazarlás csökkentésével, valamint a termékek biztonságának és minőségének javításával, nyilvánvaló előnyökkel jár mind egészségügyi, mezőgazdasági, gazdasági és környezetvédelmi szempontból.



Mezőgazdaság	Feldolgozóipar	Csomagolás	Táplálékkiegészítők
Nanopeszticidek	Tápanyagok nanokapszulázása	Antitestek és fluoreszcens nanorészecskékkel érzékelt patogének kimutatása	Nanoméretű hatóanyagok a jobb felszívódás érdekében
Nanotrágák alkalmazása	Ízfokozók, aroma helyettesítők	Biodegradábilis hőmérséklet, páratartalom és szavatossági idő kijelzése	Bevonatok probiotikumok megővéséhez
Nanoszenzorok a növények igényeinek indikálására	Gélek, viszkozitás növelők nanorészecskék segítségével	Nanobevonatokkal gátolt oxidáció	Nanokapszulázás a célzott transzport elősegítésére
Gyógyhatású készítmények nanokapszulázása	Patogén baktériumok szaporodásának gátlása	Módosított áteresztőképességű csomagolóanyagok	Nanotercsek tápanyagszállításra az íz és étel színének megőrzésével
Génmódosítás nanotranszporterek segítségével	gyógyszerekkel és bevonatokkal	Erősebb, könnyebb, újrahasznosítható csomagolóanyagok	
Növényi patogének érzékelése nanoszenzorokkal	Nanoemulziók a tápanyagok jobb elérhetőségéért és a jobb felszívódásért		

1. Ábra: A nanotechnológia alkalmazása az élelmiszeripar különböző területein

Garti és társai [18] olyan többfázisú nanoemulziókat fejlesztettek ki, melyekkel a tápanyagok olajban vagy vízben való oldódása sokszorosára javítható. Ez elsősorban annak a tulajdonságának köszönhető, hogy a nanoemulziók három nagyságrenddel kisebbek a megszokott mikroemulzióknál, ami a tápanyagszállításban is hatalmas előnyt jelent. Ennek köszönhetően a gyógyszer szállításhoz is használt polimer nanorészecskékre vonatkozó tanulmányok innovatív módszerekhez vezettek a "funkcionális élelmiszerek" kifejlesztése terén [19]. A biológiailag lebomló polimerekbe, például PLGA-ba ágyazott gyógyszerkészítmények heteken vagy hónapokon keresztül ellenőrzött felszabadulási tulajdonságokat mu-

tatnak, ha szájon át adják a betegeknek. Ugyanezt a stratégiát alkalmazzák az alacsony biológiai hozzáférhetőségű, szájon át alkalmazott gyógyszerek terápiás hatásainak fokozására, hogy olyan étrendkiegészítőket szállítsanak, amelyek csekély tápértékűek alacsony stabilitásuk miatt. [20]

A nanotechnológia szerepet kapott a probiotikumok szállításának javításában is. A természetes biológiai folyamatokon keresztül tápláló, hasznos mikroorganizmusok transzportját a nanokapszulázási technológia segíti. A probiotikumokban használt baktériumok előnyei csak úgy aknázhatóak ki, ha azok képesek elérni a test meghatározott helyeit anélkül, hogy megsemmisülnének. Ezen követelményeknek való megfelelés érdekében a probiotikumok beágyazása nagy figyelmet kap az élelmiszeriparban, aminek fényében számos esetben étrendkiegészítőként szabadalmaztattak a gyomorsavval történő lebomlásra rezisztens, nanobevonatú probiotikus baktériumokra.

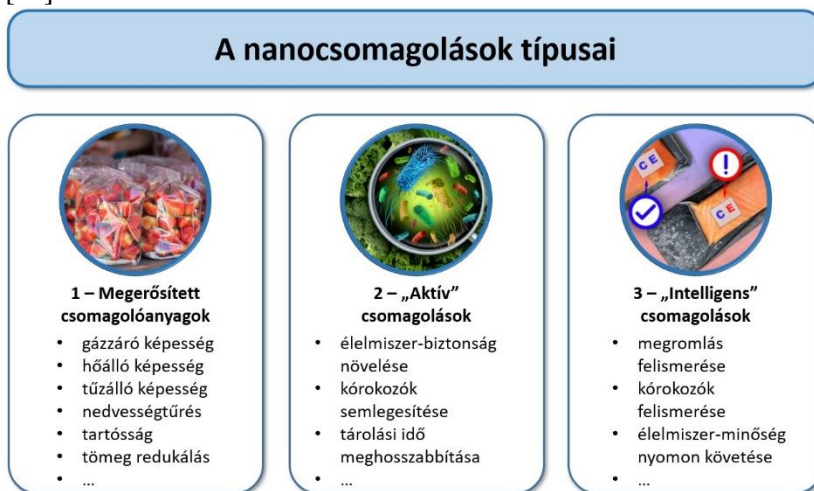
Az élelmiszeripar kiindulási pontjának számító mezőgazdaságban is a nanoanyagok számos lehetséges alkalmazással rendelkeznek. Ezen a területen az egyik legintenzívebben kutatott terület az úgynevezett „nanotrágya” fejlesztése. Ezek az anyagok úgy javítják a terméshozamot és a minőséget a hatékonyabb tápanyagfelhasználáson keresztül, hogy közben csökkentik a termelési költségeket, így hozzájárulnak a mezőgazdasági fenntarthatósághoz is. [21] Kimutatták például a szójabab esetében, hogy a foszfáttartalmú nanotrágyával kezelt növények növekedési üteme 32 %-kal, míg maghozama 20 %-kal emelkedett a hagyományos trágyához képest. [22]

A növényvédő szerek használata rendszeres gyakorlat a kereskedelmi mezőgazdaságban. Az alkalmazott növényvédő szereknek általánosan csak nagyon kis mennyisége (~1%) éri el a célkárosítókat, míg a fennmaradó 99% szennyezi a környezetet, ami súlyos következményekkel jár az élelmiszerláncra és az emberi egészségre. A nanopeszticidek fontosak a kártevők hatékony és fenntartható kezeléséhez, és képesek minimalizálni a szintetikus vegyi anyagok használatát. A nanopeszticidek azonban egészségügyi problémákat is felvetnek. A környezetvédelmi ügynökség (EPA, USA) véleménye szerint a nanopeszticidek kis méretük miatt fokozottabb dermális felszívódással bírnak és könnyebben átjuthatnak a sejtmembránokon, illetve belélegezve mélyen behatolhatnak a tüdőbe. Ezen kockázatok figyelembevételével is érdemes mérlegelni a nagyságrendekkel nagyobb mennyiségben alkalmazott rovarirtók ellenében a nanopeszticidek szabályozhatóbb alkalmazását.

ÉLELMISZER CSOMAGOLÁS

Az élelmiszerek elfogadható ára, megfelelő minősége, összetétele és kellemes íze mellett, az ételek biztonságos fogyaszthatósága, a fogyasztók élelmiszer-biztonsági igénye is nagyon fontos szempont. Az élelmiszerek minőségének minél hosszabb ideig történő megőrzése, vagy más néven tartósítása mindig is egy igen fontos megoldandó probléma volt. Az élelmiszerek mikroorganizmusok általi szennyeződésektől vagy az oxidációtól való megóvására használt ún. appertizálás (konzerválás) és pasztörözés (a mikrobák hőkezeléssel történő megsemmisítése) technikáját még a 18. században fejlesztették ki. Azonban az ilyen megoldások napjainkban csak korlátozottan használhatók az élelmiszereken megtapadó, opportunist, gyorsan fejlődő és rendkívül ellenálló, levegőben terjedő mikrobák elleni védelemben. [23, 24] Az élelmiszer eredetű mikrobiális kórokozók által okozott betegségek és halálesetek óriási gazdasági terhet rónak az egészségügyi szektorra, és a problémát csak súlyosbítják az egyre ellenállóbbá váló mikrobiális törzsek. [25]

A tartósítás egyik alappillére a megfelelő csomagolás kiválasztása. A legkorszerűbb, nanotechnológián alapuló ún. „intelligens/smart” és „aktív” élelmiszer-csomagolási eljárások alkalmazása számos előnnyel jár a hagyományos csomagolási módszerekkel szemben (2. ábra). [24]



2. Ábra: intelligens/smart és aktív élelmiszer-csomagolási eljárások

Ezen előnyök közé sorolható, hogy az aktív csomagolóanyagok jobb mechanikai szilárdsággal és zárótulajdonságokkal, sokszor antimikrobiális hatású bevonatokkal rendelkeznek. [26] Az ilyen csomagolóanyagok esetében, az élelmiszerek eredetéről és biztonsági állapotáról, kórokozók jelenlétéről nanoszenzorok segítségével kaphatunk figyelmeztetéseket valós időben a szállításuk és tárolásuk során. [27]

A modern élelmiszercsomagolásokban használt nanokompozit anyagokat úgy állítják elő, hogy valamilyen kiváló tulajdonságú polimert nanoméretű részecskék hozzáadásával erősítenek meg, amely nanocsomagolások sok szempontból meghaladják a hagyományos csomagolások minőségét. Például ma már széleskörben ismert, hogy a nanoanyag-polimerek szerkezeti elrendezésük révén kiváló mechanikai jellemzőkkel rendelkeznek. [28] Ezek a nanoanyag-polimer kompozit csomagolóanyagok kiválóan alkalmasak élelmiszerek tárolására, mivel kevésbé áteresztőek a gázok számára, mint más anyagok. Emellett ugyanaz az ellenállóképesség fele olyan vastagságú nanoanyag-polimerrel is elérhető, mint más nanokompozitok használatával, így az ezekből a nanoanyag-polimerekből készült csomagolóanyagok könnyebbek és előállításuk kisebb gyártási költséggel jár. A nanoanyagok mellett más inert anyagokkal, mint például szilika-, kitin- vagy kitozán nanorészecskékkel is dúsíthatóak a polimerek, ezáltal szintén erősebb, könnyebb, tűzállóbb és jobb hőálló képességű kompozitok állíthatók elő. [29]

Egy másik jelentős globális probléma az élelmiszerpazarlás és -romlás, amely első sorban akkor következik be, amikor az élelmiszer-részecskék hosszabb ideig légköri gázokkal, nedvességgel vagy fénnel érintkeznek. Az élelmiszer-csomagolás zárótulajdonságai így kritikus szerepet játszanak az élelmiszerek tartósításában, egy jól megtervezett, jól záródó csomagolóanyag segítségével csökkenteni lehet az olyan szennyezett élelmiszerekből származó hulladék kibocsátást, amely a környezeti elemek behatásának az eredménye-

ként keletkezik. Erre a problémára az élelmiszeriparban elérhető megoldások közül kiemelendők azok a csomagolások, melyek záró tulajdonságait olyan nanoanyagok beépítésével oldották meg, amelyek jelentősen csökkentik a lebontó anyagok légkörből való bejutását. Olyan alacsony áteresztőképességű nanokompozitokat fejlesztettek ki, amik nanokompozitokból, például különböző nanoanyagokból készültek hőre lágyuló műanyagok és elasztomerek hozzáadásával. Szintén élelmiszer-csomagoló alkalmazásokban vizsgálták az alacsony sűrűségű polietilén (LDPE) polimereket nanokompozit anyagokkal kombinálva. [30] Ezen mérések során kimutatták, hogy ezek a nanokompozit polimerek kiváló termikus és mechanikai tulajdonságokkal, valamint megnövelt oxigénzáró tulajdonsággal rendelkeztek, ezáltal az élelmiszerek biztonságosabb hosszabbtávú tartósítását tették lehetővé. Az LDPE-nanokompozit anyag oxigénzáró képessége valószínűleg a polimer-kompozit szerkezetének és a nagy fajlagos felületének köszönhető, így ezen anyagokból készült csomagolás jelentősen késlelteti a légköri gázok bejutását a tasakba.

Az élelmiszeriparban az antimikrobiális hatású csomagolások gyártása iránt egyre nő az igény, különösen az élelmiszerek minőségének és eltarthatóságának növelése miatt. Az antibakteriális tulajdonságaiknak köszönhetően a csomagolóanyagokban a nanoezüst kompozitok felhasználása terjedt el leginkább. [31] Az ezüst nanorészecskék antibakteriális szerként való alkalmazása nem újdonság, már korán megfigyelték, hogy az ezüst erősen gátolja a baktériumok növekedését és anyagcseréjét. Azonban ipari méretű felhasználáshoz zöld, környezetbarát előállítási módszer szükséges. John és munkatársai (2003) egy innovatív zöld környezetbarát gyártási módszerről számoltak be, amely során egy antibakteriális fedőréteggel képesek bevonni különböző fém nanorészecskéket csupán egyetlen lépésben. [32] Az eljárás magába foglalja különböző olajok, például növényi olajok oxidatív szárítását szerves oldószer jelenlétében. Az általuk ismertett eljárás előnye, hogy minimálisra csökkenti a környezetszennyezést a bevonási folyamat során szükséges szerves oldószer mennyiségének csökkentésével.

Emellett a kutatók számos olyan új módszert fejlesztettek ki az élelmiszer-kórokozók megcélzására, amelyek válaszreakciós mechanizmust alkalmaznak. Az antimikrobiális szerekkel töltött nanorészecske kapszulákat úgy tervezték meg, hogy a kapszulákból aktív hatóanyagok szabaduljanak fel a membránlizáló szerek bakteriális szekréciójára reagálva. [33]

A bioszenzorok fejlesztéséhez használt nanoanyagok magas szintű érzékenységet és szelektivitást tesznek lehetővé az élelmiszeripari megoldásokban. Az élelmiszer-mikrobiológiában (bio)nanoszenzorokat használnak a kórokozók kimutatására feldolgozóüzemekben vagy élelmiszer-alapanyagokban a rendelkezésre álló élelmiszer összetevők mennyiségi meghatározására, a fogyasztók és a forgalmazók figyelmeztetésére az élelmiszerek biztonsági állapotáról. A nanoszenzor olyan indikátorként működik, amely reagál a környezeti feltételek változásaira, például a tárolóhelyiségek páratartalmának vagy hőmérsékletének változására, mikrobiális szennyeződések megjelenésére vagy a termékek lebomlására.

A szakemberek különféle nanoszerkezeteket, mint például vékonyrétegeket, nanocsöveket, nanorészecskéket és nanoszálakat is vizsgáltak bioszenzorokban való lehetséges alkalmazásuk szempontjából. [34] Az oxidációs-redukciós reakciókkal összefüggésben álló redox-ciklus események mérésére tervezett nanoszenzorok segítségével kimutatható az élelmiszerek csomagolásánál az oxigénszivárgás. Az élelmiszer-csomagolásba beépített ilyen érzékelő mechanizmusok rendkívül hasznosak lehetnek az élelmiszer-pazarlás csökkentésében azáltal, hogy figyelmeztetik a fogyasztókat az élelmiszer minőségére, illetve annak

változására. Oxigénérzékeny indikátorokat használnak olyan címkék vagy vékonyréteg formájában, amelyek oxidációra érzékeny enzimeket vagy kapcsolt redox reakciókat tartalmaznak, amelyek kimutatható vagy látható színváltozásokat indukálnak (mint például a metilénkék esetében).

A mikrobiális anyagok vagy sejtek kimutatására szolgáló vékonyrétegek felhasználásával gyors és rendkívül érzékeny immunszenzorokat hoztak létre. Ezekben a szenzorokban specifikus antitesteket, antigéneket vagy fehérjemolekulákat rögzítettek vékony nanofilmekre vagy szenzorchipre, amelyek jeleket bocsátanak ki a célmolekulák kimutatásakor.

A nanotechnológia segítséget nyújthat az élelmiszerminőség monitorozásában azáltal is, hogy nanoanyagok segítségével kimutatható számos peszticid, kórokozó és toxin is. Például kórokozók élelmiszerekben való kimutatására léteznek nanorészecske-nyomkövető alapú elektrokémiai DNS-érzékelők. Az alkalmazás során polimerrel bevont különböző típusú nanorészecskéket - mint például nemesfémek, nem nemesfémek, fém-sók, polisztirol vagy szilícium – használnak, ezáltal ezek a nanorészecske bioszenzorok nagyobb érzékenységgel rendelkeznek, mint a hagyományos detektorok. [35]

NANO-BIZTONSÁG

A nanoanyagok mérete, méretfüggő fizikai-kémiai tulajdonságai és a tömbfázistól eltérő viselkedése együttesen értékes teret kínál a nanotechnológiai innovációk számára. Ugyanezeknek a jellemzőknek azonban toxikus hatásai lehetnek olyan esetben, amikor a nanoélelmiszereken és az élelmiszerekkel érintkezésbe kerülő anyagokon keresztül a nanoanyagok kapcsolatba kerülnek biológiai rendszerekkel például sejtekkel, szövetekkel és szervekkel. Többen vizsgálták a nanoanyagokkal kapcsolatban felmerülő biztonsági aggodalmakat, hangsúlyozva a nanorészecskék csomagolóanyagból élelmiszerekbe vándorlását, különböző szövetekben és szervekben való felhalmozódását, valamint a fogyasztók egészségére gyakorolt hatását. A nanorészecskék migrációját és szervezetben belüli eloszlását számos tényező befolyásolhatja, úgymint a részecskék morfológiája, koncentrációja, felületi energiája, adszorpciója vagy aggregációja. Például kimutatták, hogy a csomósodást gátló adalékanyagként használt szilícium-dioxid nanorészecskék citotoxikusak lehetnek tüdősejtekre nézve. [36] Titán dioxiddal végzett vizsgálatok során kiderült, hogy ezen nanorészecskék hatása független a részecskemérettől, és a nanorészecskék patkányokban *in vivo* citotoxikus hatása nem korrelál megbízhatóan az ugyanabban a vizsgálatban végzett *in vitro* kísérletek eredményeivel. [37] Cushen és munkatársai kidolgoztak egy modellt az élelmiszer-csomagolásból származó részecskék migrációjának tanulmányozására. [38] Réz és ezüst nanokompozitok vizsgálata során megfigyelték, hogy a részecskeméret, a hőmérséklet vagy az érintkezési idő helyett a migrációt leginkább befolyásoló tényező a kompozit nanotöltőanyag százalékos aránya volt. Ezek alapján elmondható, hogy mivel minden nanoméretű anyagnak saját egyedi tulajdonságai vannak, így szervezetbeni viselkedésüket, esetleges toxicitásuk kockázatát eseti alapon kell meghatározni. Ennélfogva az ismeretlen toxicitású nanorészecskék belélegzésével, lenyelésével és bőrön keresztül történő felszívódásával kapcsolatos kockázatok miatt nagy szükség van megbízható rutin analitikai módszerek és eszközök kifejlesztésére a nanoélelmiszer-termékek biztonsági ellenőrzéséhez és kockázatértékeléséhez. [39] A nanoélelmiszerekkel kapcsolatos adatok és kutatási eredmények megosztásának fokozottabb igénye mellett továbbá az új nanotechnológia alapú élelmiszeripari

termékekre és megoldásokra vonatkozóan forgalmazásukat megelőzően szigorú minőségi, egészségügyi és környezetvédelmi biztonsági minősítéssel egybekötött engedélyezési eljárást kell kidolgozniuk a szabályozó hatóságoknak, mely elengedhetetlen ezen új termékek biztonságos, hosszútávú felhasználáshoz és ellenőrzéséhez.

KÖVETKEZTETÉSEK – FEJLESZTÉSEK, JAVASLATOK

A nanoméretű anyagok tulajdonságainak részletesebb megismerése és az élelmiszeriparban rejlő lehetőségeik kiaknázása révén a nanotechnológián alapuló élelmiszerek bevezetése hosszútávon gazdaságilag előnyös lehet, valamint megoldást adhat számos, az élelmiszerekkel kapcsolatos problémára. A kutatások előrehaladtával a különböző nanoanyagok számos alkalmazása ismert az élelmiszer-csomagolás és az élelmiszer-biztonság területén. A megnövekedett élelmiszer-termelés költséghatékony, innovatív, szabályozható tulajdonságokkal rendelkező termékeket kínál az ún. smart és egészségesebb élelmiszerek előállításához, valamint intelligens csomagolórendszereket, amelyek jobban védik az élelmiszereket a hatékonyabb tárolási tulajdonságuknak köszönhetően. Emellett ígéretes eredményeket értek el az élelmiszer-tartósítás terén, a nanoanyagok felhasználásával az élelmiszerek összetétele (pl. íz, nedvességtartalom) garantálható és minőségének romlása (pl. melékizetek, gázok) kiküszöbölhető. Nano-hordozórendszerek segítségével különböző bioaktív vegyületeket lehet specifikusan célszövetekhez eljuttatni.

A nanoélelmiszer-rendszerek fejlesztése során a kapcsolódó biztonsági kérdések és a környezeti hatások felbecslése kulcsfontosságú, a nanoanyagok alkalmazása megfelelő szabályozás mellett humán egészségügyi, környezeti és gazdasági előnyökkel járhat.

Bár a nanotechnológia napról-napra fejlődik, a rengeteg lehetőség mellett továbbra is számos, összetettebb kihívás van a jelenlegi technológiai megoldásokban. Az élelmiszeripari felhasználásra szánt új nanoanyagok megjelenésével továbbá felmerülnek a nanotechnológia rövid- és hosszútávú alkalmazásának következményeivel kapcsolatos megválaszolandó kérdések is, amelyeket a fogyasztói társadalom aggodalmainak enyhítése érdekében szükséges megválaszolni. Ilyen például a nanoélelmiszerek bevezetését követően növekvő mennyiségben környezetbe kerülő nanohulladék, mely a későbbiekben szükségessé teszi a környezetből a táplálékláncba kerülő nanoanyagok egészségre gyakorolt hatásának értékelését is. A felmerülő kérdések megválaszolásához a nanotechnológia élelmiszerszektorba való bevezetésének ütemét megfelelően le kell lassítani, hogy lehetővé váljon az anyagokhoz és eljárásokhoz kapcsolódó potenciális kockázatok azonosítása és kiértékelése a biztonságosabb felhasználás érdekében. Ez azt jelenti, hogy az innovációt szabályozási iránymutatásokkal kell egyensúlyba hozni olyan megbízható és robusztus kockázatértékelési eszközök rendelkezésre állásával, amelyek jelenleg még nincsenek kidolgozva a nanoélelmiszerek esetében. A szükséges jogszabályozás megalkotása mellett a kockázatkezelés és a kockázatkommunikációs feladatok kidolgozása és megvalósítása is indokolt. A nanotechnológiával kapcsolatos szakmai képzés és az ismeretterjesztés, a lehetőségek és a kockázatok komplex összefüggései interdiszciplináris megközelítést követelnek meg. A közvéleményt formáló, tudományos nyilvános szerepvállalás már most kritikus meghatározó szerepet játszik a nanotechnológia alapú élelmiszerek és technológiák elfogadásában. Ezenkívül, a nanoélelmiszerek előnyei mellett a velük járó kockázatoknak is nyilvánosan hozzáférhetőnek és átláthatónak kell lennie a fogyasztói bizalom növelése érdekében.

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. Jeevanandam, A. Barhoum, Y.S. Chan, A. Dufresne, M.K. Danquah, Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations, *Beilstein J Nanotechnol*, 9 (2018) 1050-1074.
- [2] L.A. Kolahalam, I.V. Kasi Viswanath, B.S. Diwakar, B. Govindh, V.G. Reddy, Y.L.N. Murthy, Review on nanomaterials: Synthesis and applications, *Materials Today: Proceedings*, (2019).
- [3] D. Kumar, B.J. Kumar, H.M. Mahesh, Quantum Nanostructures (QDs): An Overview, in, 2018.
- [4] I. Khan, K. Saeed, I. Khan, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities, *Arabian Journal of Chemistry*, 12 (2019) 908-931.
- [5] L.J. Frewer, K. Bergmann, M. Brennan, R. Lion, R. Meertens, G. Rowe, M. Siegrist, C. Vereijken, Consumer response to novel agri-food technologies: Implications for predicting consumer acceptance of emerging food technologies, *Trends in Food Science & Technology*, 22 (2011) 442-456.
- [6] M. Siegrist, M.E. Cousin, H. Kastenholz, A. Wiek, Public acceptance of nanotechnology foods and food packaging: the influence of affect and trust, *Appetite*, 49 (2007) 459-466.
- [7] J. Kuzma, Moving forward responsibly: Oversight for the nanotechnology-biology interface, *Journal of Nanoparticle Research*, 9 (2007) 165-182.
- [8] F.W.E.M.o.t.A.o.N.i.t. Food, O.d.N.U.p.l.a.e.l.a.O.m.d.l.s. Agriculture Sectors: Potential Food Safety Implications, FAO/WHO Expert Meeting on the application of nanotechnologies in the food and agriculture sectors : potential food safety implications : meeting report, in, Food and Agriculture Organization of the United Nations ; World Health Organization, Rome, Italy; Geneva, Switzerland.
- [9] P.H.o.L.S. Great Britain, K.J.S.o.H.S.S. Technology Committee, Nanotechnologies and food : 1st report of session 2009-10. Vol. 1 Report Vol. 1 Report, The Stationery Office, London, 2010.
- [10] J. Kuzma, J. Romanchek, A. Kokotovich, Upstream oversight assessment for agrifood nanotechnology: a case studies approach, *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 28 (2008) 1081-1098.
- [11] J.J. Kester, O. Fennema, Edible films and coatings: a review, *Food technology (USA)*, (1986).
- [12] Z. Wang, M. Ke, L. He, Q. Dong, X. Liang, J. Rao, J. Ai, C. Tian, X. Han, Y. Zhao, Biocompatible and antibacterial soy protein isolate/quaternized chitosan composite sponges for acute upper gastrointestinal hemostasis, *Regenerative Biomaterials*, 8 (2021).
- [13] D. Enescu, M.A. Cerqueira, P. Fucinos, L.M. Pastrana, Recent advances and challenges on applications of nanotechnology in food packaging. A literature review, *Food and Chemical Toxicology*, 134 (2019) 110814.
- [14] M. Pateiro, B. Gómez, P.E.S. Munekata, F.J. Barba, P. Putnik, D.B. Kovačević, J.M. Lorenzo, Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products, *Molecules*, 26 (2021) 1547.
- [15] L. Sagalowicz, M.E. Leser, H.J. Watzke, M. Michel, Monoglyceride self-assembly structures as delivery vehicles, *Trends in Food Science & Technology*, 17 (2006) 204-214.

- [16] B.S. Sekhon, Nanotechnology in agri-food production: an overview, *Nanotechnology, science and applications*, 7 (2014) 31-53.
- [17] G.V. Lowry, A. Avellan, L.M. Gilbertson, Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution, *Nature Nanotechnology*, 14 (2019) 517-522.
- [18] N.A.N.M.S.H.H.R.T.T.F.B.M. Salim, Nanoemulsion as a topical delivery system of antipsoriatic drugs, *RA RSC Advances*, 6 (2016) 6234-6250.
- [19] C. Vauthier, K. Bouchemal, Methods for the preparation and manufacture of polymeric nanoparticles, *Pharmaceutical research*, 26 (2009) 1025-1058.
- [20] J.C.A.G.F.U.o.W.D.o.C.E. Xu, Synthesis of polymeric nanoparticles for the controlled release of hydrophobic and hydrophilic therapeutic compounds, in, 2016.
- [21] M. Kah, R.S. Kookana, A. Gogos, T.D. Bucheli, A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues, *Nature Nanotechnology*, 13 (2018) 677-684.
- [22] R. Liu, R. Lal, Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*), *Scientific Reports*, 4 (2014) 5686.
- [23] L.M. Mancilla-Becerra, T. Lías-Macías, C.L. Ramírez-Jiménez, J.B. León, Multidrug-resistant bacterial foodborne pathogens: Impact on human health and economy, *Pathog Bact*, 2019 (2019) 1-18.
- [24] A.A. Anvar, H. Ahari, M. Ataei, Antimicrobial Properties of Food Nanopackaging: A New Focus on Foodborne Pathogens, *Frontiers in microbiology*, 12 (2021) 690706.
- [25] M.E. Doyle, Multidrug-resistant pathogens in the food supply, *Foodborne pathogens and disease*, 12 (2015) 261-279.
- [26] T. Singh, S. Shukla, P. Kumar, V. Wahla, V.K. Bajpai, Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview, *Frontiers in microbiology*, 8 (2017) 1501-1501.
- [27] S.D.F. Mihindukulasuriya, L.T. Lim, Nanotechnology development in food packaging: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 40 (2014) 149-167.
- [28] X. He, H. Deng, H.-m. Hwang, The current application of nanotechnology in food and agriculture, *Journal of Food and Drug Analysis*, 27 (2019) 1-21.
- [29] C. Vasile, Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review, *Materials*, 11 (2018) 1834.
- [30] J. Sarfraz, T. Gulin-Sarfraz, J. Nilsen-Nygaard, M.K. Pettersen, Nanocomposites for Food Packaging Applications: An Overview, *Nanomaterials*, 11 (2021) 10.
- [31] H. Tavakoli, H. Rastegar, M. Taherian, M. Samadi, H. Rostami, The effect of nano-silver packaging in increasing the shelf life of nuts: An in vitro model, *Italian journal of food safety*, 6 (2017) 6874.
- [32] A. Kumar, P.K. Vemula, P.M. Ajayan, G. John, Silver-nanoparticle-embedded antimicrobial paints based on vegetable oil, *Nature materials*, 7 (2008) 236-241.
- [33] Y. Liu, D.E. Sameen, S. Ahmed, J. Dai, W. Qin, Antimicrobial peptides and their application in food packaging, *Trends in Food Science & Technology*, 112 (2021) 471-483.
- [34] O. Bashir, S.A. Bhat, A. Basharat, M. Qamar, S.A. Qamar, M. Bilal, H.M.N. Iqbal, Nano-engineered materials for sensing food pollutants: Technological advancements and safety issues, *Chemosphere*, 292 (2022) 133320.
- [35] A. Mokhtarzadeh, R. Eivazzadeh-Keihan, P. Pashazadeh, M. Hejazi, N. Gharaatifar, M. Hasanzadeh, B. Baradaran, M. de la Guardia, Nanomaterial-based biosensors for detection of pathogenic virus, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97 (2017) 445-457.

- [36] H. Yang, Q.Y. Wu, M.Y. Li, C.S. Lao, Y.J. Zhang, Pulmonary Toxicity in Rats Caused by Exposure to Intratracheal Instillation of SiO₂ Nanoparticles, *Biomedical and environmental sciences : BES*, 30 (2017) 264-279.
- [37] D.B. Warheit, T.R. Webb, C.M. Sayes, V.L. Colvin, K.L. Reed, Pulmonary Instillation Studies with Nanoscale TiO₂ Rods and Dots in Rats: Toxicity Is not Dependent upon Particle Size and Surface Area, *Toxicological Sciences*, 91 (2006) 227-236.
- [38] M. Cushen, J. Kerry, M. Morris, M. Cruz-Romero, E. Cummins, Evaluation and simulation of silver and copper nanoparticle migration from polyethylene nanocomposites to food and an associated exposure assessment, *Journal of agricultural and food chemistry*, 62 (2014) 1403-1411.
- [39] T. Singh, S. Shukla, P. Kumar, V. Wahla, V.K. Bajpai, Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview, *Frontiers in microbiology*, 8 (2017) 1501.