

Pregledni rad DOI: 10.5937/DDD26012K

SAVREMENE TEHNOLOGIJE DEZINFEKCIJE KONTAKTNIH POVRŠINA U INDUSTRIJI SUVE HRANE: MEHANIZMI DELOVANJA, TEHNOLOŠKI IZAZOVI I INDUSTRIJSKA PRIMENA

ADVANCED DISINFECTION TECHNOLOGIES FOR FOOD-CONTACT SURFACES IN THE DRY FOOD INDUSTRY: MECHANISMS, TECHNOLOGICAL CHALLENGES AND INDUSTRIAL APPLICATION

Jasna Kureljušić^{1}, Ana Vasić¹, Jelena Maletić¹*

Kratak sadržaj

Dezinfekcija kontaktnih površina predstavlja ključnu meru kontrole mikrobiološke kontaminacije u industriji suve hrane. Specifičnosti ovog sektora, uključujući nisku aktivnost vode (*aw*), prisustvo prašine i ograničenu primenu vlažnih metoda čišćenja, značajno utiču na efikasnost dezinfekcionih postupaka. U radu su prikazane savremene tehnologije dezinfekcije, uključujući hemijske, fizičke i inovativne metode kao što su UV zračenje, hladna plazma i pregrejana para. Poseban akcenat stavljen je na mehanizme delovanja, faktore koji utiču na efikasnost, kao i tehnološke izazove u industrijskoj primeni, uključujući biofilm i otpornost mikroorganizama u uslovima niske aktivnosti vode. Cilj rada je da pruži sveobuhvatan pregled savremenih tehnologija i preporuke za njihovu primenu u industrijskim uslovima.

Ključne reči: dezinfekcija, kontaktne površine, suva hrana, biofilm, UV, hladna plazma

Abstract

Disinfection of food-contact surfaces represents a critical control measure in the dry food industry. Specific conditions such as low water activity (*aw*), presence of dust and limited use of wet sanitation significantly influence the effectiveness of disinfection processes. This paper reviews modern disinfection technologies, including chemical, physical and emerging methods such as UV radiation, cold plasma and superheated steam. Special attention is given to mechanisms of action, factors affecting efficiency and technological challenges, including biofilm formation and microbial resistance under low *aw* conditions.

Keywords: disinfection, food-contact surfaces, dry food, biofilm, cold plasma

¹ Dr sci. vet. med. Jasna Kureljušić, viši naučni saradnik; dr sci. vet. med. Ana Vasić, viši naučni saradnik; dr sci. vet. med. Jelena Maletić, naučni saradnik, Naučni Institut za veterinarsvo Srbije, Janisa Janulisa 14, 11000 Beograd, R. Srbija

* e-mail kontakt osobe: jasnakureljusic@yahoo.com

UVOD

Hrana sa niskom aktivnošću vode ($a_w < 0,85$) definiše se kao hrana u kojoj dostupnost slobodne vode nije dovoljna za aktivan rast većine mikroorganizama. Iako se tradicionalno smatrala mikrobiološki bezbednom, brojna istraživanja su pokazala prisustvo i sposobnost preživljavanja patogenih mikroorganizama u ovim proizvodima [1].

U poslednjih nekoliko godina zabeležen je značajan broj povlačenja proizvoda sa tržišta usled kontaminacije različitim patogenima, uključujući brašno, kikiriki puter, tahini, sušeni kokos i chia seme. Ovi događaji ukazuju na ozbiljan problem jednog zdravlja i potrebu za unapređenjem higijenskih i dezinfekcionih procedura u industriji suve hrane. Mikroorganizmi kao što su *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* i *Staphylococcus aureus* mogu preživeti u uslovima niske aktivnosti vode [2]. Nakon rehidracije kontaminiranih proizvoda dolazi do stvaranja povoljnih uslova za njihov rast, čime se značajno povećava rizik od infekcije.

Proces desikacije (isušivanja) u industriji suve hrane dovodi do adaptivnih promena mikroorganizama, čime oni postaju otporniji na različite dezinfekcione postupke [3]. Ova povećana otpornost predstavlja ozbiljan izazov za bezbednost hrane. Unakrsna kontaminacija i neadekvatna higijena identifikovani su kao ključni faktori u nastanku epidemija prenosivih hranom. Mikroorganizmi prisutni na površinama mogu se odvojiti, kolonizovati druge površine i dovesti do kontaminacije hrane [3].

Dodatno, prisustvo tzv. perzistentnih sojeva u proizvodnim pogonima ima značajan uticaj na ponovnu kontaminaciju i dugotrajno održavanje mikrobiološkog rizika u industrijskom okruženju [4].

PUTEVI KONTAMINACIJE U INDUSTRIJI SUVE HRANE

Mikroorganizmi mogu dospeti u proizvodne pogone i industrijsko okruženje putem više različitih izvora, uključujući vazduh, vodu, sirovine, kontaktne površine i osoblje (Slika 1) [5]. Ovi putevi predstavljaju primarne izvore ulaska mikroorganizama u sistem proizvodnje i imaju ključnu ulogu u nastanku i širenju kontaminacije.

Vazduh kao izvor kontaminacije

Vazduh predstavlja značajan medijum prenosa mikroorganizama, posebno u uslovima gde dolazi do stvaranja aerosola i prašine. Tokom manipulacije sirovinama, kao što su mlevenje, transport i pakovanje, dolazi do oslobađanja čestica koje mogu sadržati patogene mikroorganizme. Ove čestice se lako šire kroz proizvodni prostor i talože na kontaktnim površinama, čime doprinose sekundarnoj kontaminaciji proizvoda [6].

Voda kao faktor rizika

Voda, iako se u industriji suve hrane koristi ograničeno, predstavlja potencijalni izvor kontaminacije, naročito tokom procesa čišćenja i sanitacije. Kontaminirana voda može dovesti do direktnog prenosa mikroorganizama na opremu i površine, ali i indirektno uticati na povećanje aktivnosti vode na površinama, čime se stvaraju povoljniji uslovi za opstanak mikroorganizama i adheziju [7].

Sirovine kao primarni izvor kontaminacije

Sirovine predstavljaju jedan od najznačajnijih izvora primarne kontaminacije. Mikroorganizmi prisutni u sirovinama mogu se preneti na opremu, površine i gotove proizvode. Posebno je značajno da određeni patogeni, kao što su *Salmonella* spp., mogu opstati u suvim sirovinama i kasnije dovesti do kontaminacije tokom daljih faza proizvodnje [1].

Kontaktne površine i prenos mikroorganizama

Kontaktne površine imaju ključnu ulogu u prenosu mikroorganizama. Površine koje dolaze u direktan kontakt sa hranom, kao što su transportne trake, radne ploče i alati, mogu postati rezervoari mikroorganizama. Mikroorganizmi koji se vezuju za ove površine mogu se odvojiti i preneti na druge proizvode ili površine, čime dolazi do unakrsne kontaminacije [3].

Higijena osoblja kao faktor kontaminacije

Higijena osoblja predstavlja još jedan važan faktor u kontroli kontaminacije. Neadekvatna higijena ruku, odeće i zaštitne opreme može dovesti do prenosa mikroorganizama sa radnika na površine i proizvode. Osoblje može delovati kao vektor kontaminacije, posebno u uslovima gde nisu primenjene adekvatne higijenske mere i kontrola pristupa [7].

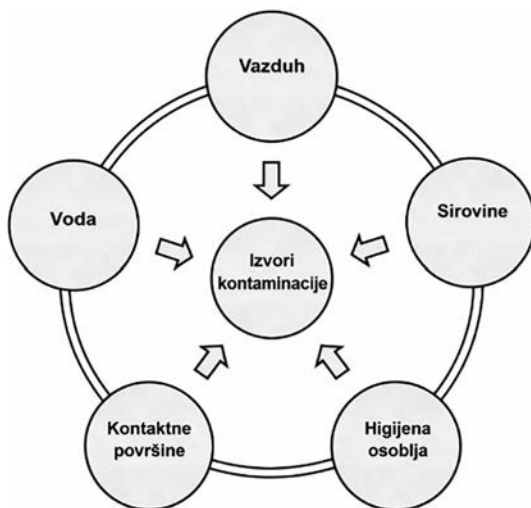
Svi navedeni putevi kontaminacije međusobno su povezani i čine kompleksan sistem prenosa mikroorganizama unutar proizvodnog okruženja. Zbog toga je neophodno primenjivati integrisani pristup kontrole kontaminacije, koji uključuje:

- kontrolu kvaliteta vazduha i prašine
- upravljanje vodom i sanitacionim procesima
- kontrolu sirovina
- dezinfekciju kontaktnih površina
- obuku i nadzor osoblja

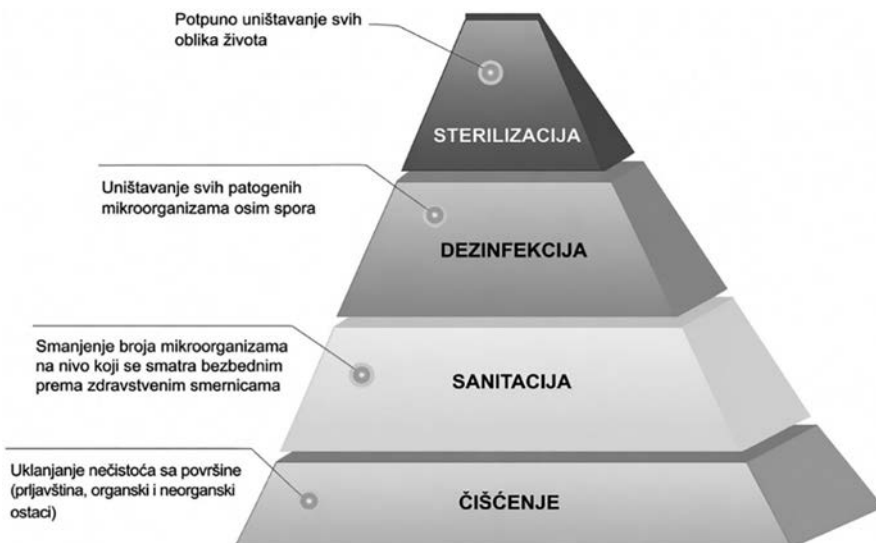
Higijensko zoniranje kao strategija kontrole

Dodatno, implementacija higijenskog zoniranja u proizvodnim pogonima predstavlja efikasan način identifikacije rizičnih zona i sprečavanja širenja kontaminacije. Zone se definišu na osnovu potencijalnog rizika, čime se omogućava efikasnije upravljanje higijenom i kontrola mikrobioloških opasnosti [5].

S obzirom na to da proizvodno okruženje ima ključnu ulogu u nastanku i širenju kontaminacije, primena koncepta higijenskog zoniranja predstavlja jednu od najvažnijih mera kontrole. Higijensko zoniranje podrazumeva podelu proizvodnog prostora na različite zone u zavisnosti od nivoa mikrobiološkog rizika, pri čemu se identifikuju kritične tačke kontaminacije i potencijalna mesta zadržavanja mikroorganizama, tzv. „niše” ili „harborage areas”. Ovakav pristup omogućava ciljanu primenu mera dezinfekcije i efikasnije upravljanje higijenom u proizvodnim pogonima [5].



Slika 1. Mogući putevi unosa i širenja mikroorganizama u postrojenju za preradu suve hrane



Slika 2. Tehnike za redukciju mikrobiološke kontaminacije u procesu prerade hrane

PROCESI ČIŠĆENJA, SANITACIJE I DEZINFEKCIJE

Smanjenje nivoa mikrobiološke kontaminacije u prehrambenoj industriji može se postići primenom različitih postupaka, među kojima su najznačajniji čišćenje, sanitacija, dezinfekcija i sterilizacija (Slika 2). Svaki od ovih procesa ima specifičnu ulogu i nivo efikasnosti u uklanjanju ili inaktivaciji mikroorganizama sa kontaktnih površina.

Čišćenje kao osnovni korak

Čišćenje predstavlja osnovni korak u procesu uklanjanja kontaminacije i podrazumeva uklanjanje vidljivih nečistoća sa površina, uključujući ostatke hrane, prašinu i druge čestice. Ovaj proces obuhvata mehaničke radnje kao što su ribanje, pranje i ispiranje kontaktnih površina, sa ciljem uklanjanja organskih i neorganskih naslaga [8]. Ostaci hrane se često akumuliraju u pukotinama, spojevima i neravnim površinama, gde predstavljaju idealno mesto za razvoj mikroorganizama. Za razliku od toga, glatke i neporozne površine omogućavaju efikasnije uklanjanje kontaminanata.

Naslage hrane koje ostaju na opremi nakon proizvodnje često su kontaminirane mikroorganizmima koji koriste prisutne nutrijente za rast i opstanak. U praksi se za uklanjanje ovih naslaga najčešće koriste voda i deterdženti, koji omogućavaju razgradnju i uklanjanje organske materije sa površina. Međutim, čišćenje samo po sebi nije dovoljno za eliminaciju mikroorganizama, već predstavlja pripremnu fazu za dalju obradu.

Sanitacija i dezinfekcija

Nakon procesa čišćenja sprovodi se sanitacija i/ili dezinfekcija, čiji je cilj smanjenje broja mikroorganizama na bezbedan nivo ili njihovo uništavanje. Sanitacija podrazumeva smanjenje broja mikroorganizama na nivo koji se smatra bezbednim u skladu sa smernicama javnog zdravlja. Dezinfekcija predstavlja viši nivo kontrole i odnosi se na uništavanje svih patogenih mikroorganizama, osim bakterijskih spora, koje pokazuju značajnu otpornost na standardne dezinfekcione postupke.

Sterilizacija i njena ograničenja

Sterilizacija predstavlja najviši nivo mikrobiološke kontrole i podrazumeva uništavanje svih oblika života, uključujući vegetativne ćelije, spore, viruse i gljivice [9]. Međutim, zbog svoje intenzivnosti i zahteva u pogledu opreme i uslova, sterilizacija se retko primenjuje na kontaktnim površinama u prehrambenoj industriji, već je ograničena na specifične procese i opremu.

Važno je istaći da trenutno ne postoji univerzalno antimikrobno sredstvo koje bi istovremeno bilo širokog spektra delovanja i posedovalo sve potrebne karakteristike za efikasnu eliminaciju mikroorganizama sa kontaktnih površina [10].

Zbog toga se u praksi primenjuje kombinacija različitih metoda i pristupa, u zavisnosti od vrste površine, tipa kontaminacije i uslova proizvodnje.

Higijensko zoniranje predstavlja ključni element u upravljanju mikrobiološkim rizicima u proizvodnim pogonima. Ovaj pristup podrazumeva klasifikaciju prostora u različite zone prema nivou rizika, od zone sa najvećim rizikom (Zona 1) do zone sa najmanjim rizikom (Zona 4), kako bi se omogućila primena strožih higijenskih mera u kritičnim područjima i racionalnije upravljanje resursima u zonama nižeg rizika [11].

Primena higijenskog zoniranja omogućava:

- identifikaciju kritičnih kontrolnih tačaka
- kontrolu kretanja osoblja i materijala
- smanjenje rizika od unakrsne kontaminacije
- efikasniju primenu dezinfekcionih procedura

SPECIFIČNOSTI DEZINFEKCIJE U INDUSTRIJI SUVE HRANE

U industriji suve hrane dominantno se primenjuju tzv. „suve metode” čišćenja i dezinfekcije. Ovakav pristup proizlazi iz činjenice da dodatak vlage može dovesti do:

- povećanja aktivnosti vode
- stvaranja grudvica proizvoda
- ubrzane degradacije proizvoda

Zbog toga se izbegava upotreba vode, a prednost se daje mehaničkom uklanjanju nečistoća, vakuumiranju i kontrolisanim metodama dezinfekcije.

Suve metode dezinfekcije

U industriji suve hrane, primena dezinfekcionih postupaka dodatno je otežana zbog ograničenja u upotrebi vode. Iz tog razloga razvijene su specifične suve metode dezinfekcije koje omogućavaju kontrolu mikrobiološke kontaminacije bez povećanja aktivnosti vode u proizvodnom okruženju.

Efikasnost procesa dezinfekcije značajno se smanjuje u prisustvu organskih i neorganskih ostataka, zbog čega je neophodno prethodno sprovesti fazu čišćenja radi uklanjanja naslaga sa kontaktnih površina. U prehrambenoj industriji mogu se primenjivati i suvi i vlažni postupci čišćenja. Međutim, u industriji suve hrane unošenje vlage predstavlja ozbiljan rizik, jer može stvoriti uslove za zadržavanje i razvoj mikroorganizama. Zbog toga se vlažni postupci čišćenja često smatraju neprihvatljivim u objektima gde se obrađuju proizvodi sa niskom aktivnošću vode, budući da dodatak vode može podstaći adheziju i rast bakterija.

Konvencionalne suve metode uključuju četkanje, metenje, struganje, vakuumsko čišćenje i izduvavanje komprimovanim vazduhom. Ove metode su efikasne u uklanjanju prašine, nečistoća i ostataka hrane sa opreme, zidova, plafona i podova. Međutim, njihova glavna ograničenja su neefikasnost u eliminaciji mikroorganizama i alergena, ograničen pristup teško dostupnim mestima, kao

i mogućnost stvaranja oblaka prašine i sekundarne kontaminacije. Iako ove metode ne obezbeđuju potpunu mikrobiološku sigurnost, one imaju važnu ulogu u smanjenju rizika i predstavljaju osnovu za primenu naprednijih dezinfekcionih tehnologija. Pored same opreme, neophodno je održavati higijenu celokupnog proizvodnog okruženja. U industriji suve hrane naročito je izražen problem formiranja prašine, koja nastaje tokom rukovanja sirovinama, mlevenja, transporta i pakovanja.

Prašina kao vektor kontaminacije

Prašina predstavlja značajan rizik jer može sadržati:

- patogene mikroorganizme
- alergene
- ostatke sirovina

Tokom manipulacije suvim materijalima dolazi do stvaranja oblaka prašine koji omogućavaju širenje kontaminacije kroz proizvodni prostor. Mikroorganizmi i alergeni mogu biti zarobljeni u česticama prašine i preneti na različite površine i proizvode, čime dolazi do unakrsne kontaminacije [12]. Neadekvatno održavanje čistoće može dovesti do kontaminacije proizvoda, čime se direktno ugrožava bezbednost hrane i zdravlje potrošača.

Dodatno, abrazivna priroda čestica prašine može izazvati:

- habanje opreme
- oštećenje površina
- probleme sa podmazivanjem

Ovi faktori mogu indirektno doprineti povećanju rizika od kontaminacije, jer oštećene površine predstavljaju pogodna mesta za zadržavanje mikroorganizama i formiranje biofilma.

Vlažno čišćenje i ograničenja

Vlažno čišćenje (wet cleaning) u prehrambenoj industriji sprovodi se primenom oksidacionih antimikrobnih sredstava, kao što su hlorni preparati, peroksiacetna kiselina, vodonik-peroksid i kvarterne amonijumske soli. Ova sredstva deluju putem oksidativnih mehanizama i omogućavaju efikasno uklanjanje mikroorganizama sa kontaktnih površina.

U praksi se vlažno čišćenje najčešće primenjuje nakon završetka proizvodnog ciklusa i pre početka naredne proizvodnje. Ovaj postupak može se realizovati kao:

- čišćenje na mestu (CIP – Cleaning in Place), koje se sprovodi bez demontaže opreme
- čišćenje van mesta (COP – Cleaning out of Place), koje podrazumeva rastavljanje opreme i njeno odvojeno pranje

Nakon sprovedenog vlažnog čišćenja, neophodno je obezbediti potpuno sušenje svih kontaktnih površina pre početka proizvodnje, kako bi se sprečilo povećanje aktivnosti vode i stvaranje uslova pogodnih za rast mikroorganizama.

Za efikasnu kontrolu patogenih mikroorganizama u prehrambenim objektima neophodno je striktno poštovanje higijenskih mera i kontrola proizvodnih procesa, koje zajedno predstavljaju osnovu bezbednosti hrane [9].

FAKTORI KOJI UTIČU NA EFIKASNOST DEZINFEKCIJE

Dezinfekcija predstavlja ključni element svakog sistema upravljanja bezbednošću hrane. Neadekvatna primena dezinfekcionih procedura može dovesti do pojave epidemija prenosivih hranom, što dodatno naglašava značaj pravilne implementacije i kontrole ovih procesa [11].

Interakcije mikroorganizama

Prisustvo različitih mikroorganizama u proizvodnom okruženju može značajno uticati na preživljavanje i ponašanje mikroorganizama vezanih za površine. U takvim uslovima dolazi do kompleksnih interakcija između različitih bakterijskih vrsta, koje mogu imati i stimulativni i inhibitorni efekat na kolonizaciju površina.

Na primer, istraživanja su pokazala da prisustvo bakterija kao što su *Pseudomonas fragi* i *Flavobacterium* spp. može povećati kolonizaciju *Listeria monocytogenes* na različitim površinama, uključujući staklo i nerđajući čelik. Sasahara i saradnici [13] su utvrdili da povećana produkcija ekstracelularnih proteina doprinosi zadržavanju mikroorganizama u multispecijskim biofilmovima, čime se dodatno otežava njihovo uklanjanje.

Adhezija i hidrofobnost

Pored međusobnih interakcija mikroorganizama, hidrofobnost ćelijske površine predstavlja važan faktor u procesu adhezije. Mikroorganizmi sa izraženijom hidrofobnošću pokazuju veću sposobnost vezivanja za površine, što utiče na njihovu perzistenciju i otpornost na dezinfekciju. Međutim, određene studije su pokazale i suprotan efekat, odnosno smanjenu adheziju *Listeria monocytogenes* u prisustvu bakterija roda *Staphylococcus*, što ukazuje na kompleksnu i dinamičnu prirodu interakcija između mikroorganizama u biofilmu [14].

Faktori koji utiču na zadržavanje mikroorganizama na površinama

Zadržavanje i opstajanje mikroorganizama na kontaktnim površinama zavisi od više faktora, uključujući:

- vrstu i način primene dezinfekcionog postupka
- tip i fiziološke karakteristike mikroorganizama
- prisustvo organskih ostataka
- hemijski sastav i strukturu površine
- tip veze između mikroorganizama i površine
- slobodnu energiju površine i bakterijske ćelije

Ovi faktori mogu značajno smanjiti efikasnost dezinfekcionih procesa i omogućiti preživljavanje mikroorganizama čak i nakon primene standardnih sanitacionih procedura. Prisustvo vitalnih (živih) ćelija na biotičkim i abiotičkim površinama doprinosi njihovom potencijalu za biotransfer, odnosno prenos na druge površine ili proizvode. Takođe, istraživanja su pokazala da mikroorganizmi koji su osušeni na površinama (tzv. surface-dried cells) pokazuju znatno veću otpornost na dezinfekciona sredstva u poređenju sa planktonskim ćelijama, što predstavlja dodatni izazov u industriji suve hrane [15].

BIOTRANSFER I PERZISTENCIJA

Kontaminacija u industriji suve hrane može nastati putem vazduha ili preko kontaktnih površina, pri čemu oba puta predstavljaju značajne izvore mikrobiološkog rizika. Tokom rukovanja suvim sirovinama, naročito u procesima mlevenja, doziranja i transporta, dolazi do formiranja prašine i aerosola koji mogu sadržati patogene mikroorganizme. Ove čestice se lako šire kroz proizvodni prostor i mogu kontaminirati naredne serije proizvoda koji se obrađuju u istom pogonu. Pored toga, značajan mehanizam kontaminacije predstavlja i direktan prenos mikroorganizama sa kontaminiranih kontaktnih površina na hranu, što se najčešće dešava usled neadekvatne higijene opreme ili nepravilnog rukovanja proizvodima [16].

Rizik od biotransfera postoji čak i u situacijama kada su mikroorganizmi prisutni u stanju mirovanja, odnosno kada su vitalni, ali se ne razmnožavaju aktivno. Istraživanja su pokazala da prenos mikroorganizama može nastati kako u statičkim, tako i u dinamičkim sistemima. Dinamički sistemi uključuju pokretne delove opreme kao što su transportne trake, noževi i sekači, dok statički sistemi obuhvataju nepokretne kontaktne površine. Prenos mikroorganizama sa površina na hranu ne zavisi isključivo od vrste mikroorganizma niti od početnog broja ćelija prisutnih na površini, što dodatno komplikuje procenu rizika. Utvrđeno je da čak i niske koncentracije mikroorganizama mogu imati visok potencijal prenosa, naročito u uslovima gde dolazi do rehidratacije i formiranja tankog sloja vlage između površine i hrane [17]. Vlažnost proizvoda i stanje ćelija, odnosno da li su mikroorganizmi osušeni ili rehidrirani, značajno utiču na efikasnost biotransfera. Mehanizmi kao što su kapilarne sile i formiranje tečnih mostova između ćelija i površine hrane dodatno olakšavaju ovaj proces [8].

Pored biotransfera, značajan problem u industriji suve hrane predstavlja prisustvo perzistentnih mikroorganizama. Određeni sojevi bakterija imaju sposobnost dugotrajnog opstanka u proizvodnim uslovima i mogu se ponavljano izolovati iz istih proizvodnih pogona tokom dužeg vremenskog perioda. Ovakvi mikroorganizmi često su povezani sa epidemijama i povlačenjem proizvoda sa tržišta. Genomske analize su pokazale da isti sojevi mogu opstati u proizvodnom okruženju godinama, što ukazuje na njihovu sposobnost adaptacije i preživljavanja u nepovoljnim uslovima. Na perzistenciju mikroorganizama utiču brojni

faktori, među kojima su temperatura, relativna vlažnost vazduha i faza rasta bakterijskih ćelija. Niže temperature značajno produžavaju preživljavanje mikroorganizama, dok više temperature ubrzavaju njihovu inaktivaciju. Takođe, sporije sušenje mikroorganizama može povećati njihovu otpornost na dezinfekciju, dok brzo isušivanje dovodi do većeg oštećenja ćelija [18].

Perzistentni mikroorganizmi pokazuju izraženiju sposobnost adhezije na kontaktne površine u poređenju sa sporadičnim sojevima, što im omogućava da se zadrže u pukotinama, spojevima i drugim teško dostupnim mestima. Ova sposobnost direktno utiče na smanjenu efikasnost dezinfekcionih postupaka, jer mikroorganizmi postaju zaštićeni od dejstva hemijskih sredstava i fizičkih faktora [19]. Takođe, njihova sposobnost formiranja biofilma dodatno otežava njihovo uklanjanje, jer biofilm predstavlja kompleksnu strukturu koja štiti mikroorganizme i omogućava njihovu dugotrajnu perzistenciju.

Prisustvo organske materije na kontaktnim površinama predstavlja jedan od ključnih faktora koji utiču na efikasnost dezinfekcije. Organski ostaci, kao što su proteini, masti i ugljeni hidrati, formiraju zaštitni sloj koji sprečava direktan kontakt dezinfekcionih sredstava sa mikroorganizmima. Ovaj sloj ne samo da smanjuje penetraciju dezinfekcionih agenasa, već i obezbeđuje nutrijente koji omogućavaju opstanak i rast mikroorganizama. Studije su pokazale da prisustvo organskih ostataka značajno smanjuje efikasnost dezinfekcije, pri čemu dolazi do minimalnog smanjenja broja mikroorganizama u poređenju sa površinama koje su prethodno temeljno očišćene.

Karakteristike kontaktnih površina takođe imaju značajan uticaj na preživljavanje i adheziju mikroorganizama. Materijali kao što su plastika i laminat omogućavaju duže preživljavanje mikroorganizama u poređenju sa nerđajućim čelikom, koji zbog svojih hidrofilnih osobina omogućava brže isušivanje i smanjuje preživljavanje bakterija. Hrapavost površine predstavlja dodatni faktor, jer veća hrapavost povećava površinu dostupnu za vezivanje mikroorganizama i otežava njihovo uklanjanje. Optimalna vrednost hrapavosti za održavanje higijene u prehrambenoj industriji iznosi približno 0,8 µm za nerđajući čelik, dok odstupanja od ove vrednosti mogu značajno uticati na efikasnost čišćenja i dezinfekcije [20].

Industrija suve hrane suočava se sa brojnim izazovima u procesu dezinfekcije, uključujući prisustvo biofilma, otpornost mikroorganizama, nisku aktivnost vode i kompleksnost opreme. Zabeleženi su brojni slučajevi kontaminacije proizvoda, uključujući prisustvo patogena kao što su *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* i *Staphylococcus aureus*, što ukazuje na potrebu za unapređenjem postojećih dezinfekcionih procedura [21]. Poseban problem predstavljaju mikroorganizmi koji formiraju spore i biofilm, jer pokazuju povećanu otpornost na standardne metode dezinfekcije.

U cilju kontrole mikrobiološke kontaminacije, u industriji suve hrane primenjuju se različite metode dezinfekcije koje se mogu podeliti na suve i vlažne. Suve metode imaju prednost jer ne povećavaju aktivnost vode u proizvodnom

okruženju, čime se smanjuje rizik od rasta mikroorganizama. Međutim, njihova efikasnost u uklanjanju mikroorganizama je ograničena, jer se uglavnom zasnivaju na mehaničkom uklanjanju nečistoća, bez direktnog antimikrobnog dejstva.

SAVREMENE METODE DEZINFEKCIJE

Savremene metode dezinfekcije uključuju primenu kombinovanih hemijskih i fizičkih pristupa. Upotreba alkohola u kombinaciji sa kvarternim amonijumskim jedinjenjima predstavlja efikasnu strategiju za dezinfekciju neporoznih površina, jer alkohol denaturiše proteine, dok kvarterna jedinjenja narušavaju strukturu ćelijske membrane. Gasne metode fumigacije, uključujući primenu hlór-dioksida (ClO_2) i ozona, omogućavaju visoku penetraciju i efikasno uklanjanje mikroorganizama čak i iz teško dostupnih delova opreme. Hlor-dioksid deluje kao snažan oksidans koji oštećuje ćelijsku membranu, proteine i DNK, dok ozon generiše reaktivne kiseonične vrste koje izazivaju oksidativni stres i dovode do smrti ćelije.

Fizičke metode dezinfekcije, kao što su pregrejana para, UV zračenje i hladna plazma, predstavljaju značajan napredak u kontroli mikrobiološke kontaminacije. pregrejana para omogućava efikasno uništavanje vegetativnih ćelija, spora i biofilma bez upotrebe hemikalija. UV zračenje deluje na genetski materijal mikroorganizama, izazivajući formiranje timinskih dimera i inhibiciju replikacije DNK. Hladna plazma predstavlja inovativnu tehnologiju koja generiše reaktivne kiseonične i azotne vrste, koje oštećuju ćelijsku membranu, proteine i nukleinske kiseline.

Uprkos velikom broju dostupnih metoda, nijedna pojedinačna tehnologija nije u potpunosti efikasna u eliminaciji svih mikroorganizama, posebno u uslovima prisustva organske materije i biofilma. Zbog toga se savremeni pristupi zasnivaju na kombinaciji različitih metoda, uz adekvatno čišćenje kao početni korak, kako bi se obezbedila maksimalna efikasnost dezinfekcije i sigurnost hrane [10].

ZAKLJUČAK

Dugotrajna perzistencija i sposobnost preživljavanja patogenih mikroorganizama u uslovima niske aktivnosti vode u proizvodnim pogonima suve hrane predmet su intenzivnih istraživanja u poslednjim decenijama. Uprkos brojnim unapređenjima u tehnologijama čišćenja i dezinfekcije, kontrola bioloških opasnosti u ovim sistemima i dalje predstavlja kontinuirani izazov za prehrambenu industriju.

Efikasnost dezinfekcionih postupaka u velikoj meri zavisi od specifičnosti proizvodnog procesa, uključujući vrstu hrane koja se proizvodi, učestalost čišćenja i prisustvo organskih ostataka na kontaktnim površinama. U tom smislu, izbor adekvatne metode dezinfekcije mora biti zasnovan na proceni rizika i prilagođen konkretnim uslovima proizvodnje. Poseban značaj ima izbor metoda

koje su jednostavne za primenu, ali istovremeno i ekonomski isplative, kako bi se obezbedila njihova kontinuirana primena u industrijskim uslovima [1].

U konvencionalnoj prehrambenoj industriji dominantno se primenjuju vlažne metode dezinfekcije. Međutim, u industriji suve hrane njihova primena je ograničena zbog rizika od povećanja aktivnosti vode i stvaranja uslova pogodnih za rast mikroorganizama. Zbog toga se u ovim sistemima sve više favorizuju suve metode dezinfekcije, koje ne doprinose povećanju vlažnosti i smanjuju rizik od mikrobiološke proliferacije. Dostupne metode dezinfekcije obuhvataju širok spektar hemijskih i fizičkih pristupa, uključujući suhu toplotu, UV zračenje, dezinfekciona sredstva na bazi alkohola, gasoviti ozon, hlor-dioksid (ClO_2), peroksiacetnu kiselinu (PAA), vodonik-peroksid (H_2O_2), kvarterna amonijumska jedinjenja, kao i elektrolizovanu vodu. Svaka od ovih metoda ima određene prednosti i ograničenja, što zahteva pažljiv izbor i kombinovanje u zavisnosti od konkretne primene.

Jedan od značajnih problema u primeni hemijskih dezinfekcionih sredstava predstavlja mogućnost zaostajanja hemijskih rezidua na opremi, što može imati negativne posledice po bezbednost hrane i zdravlje potrošača. Takođe, nepravilna ili prekomerna upotreba dezinfekcionih sredstava može dovesti do razvoja rezistentnih mikroorganizama, što dodatno komplikuje kontrolu kontaminacije. Pored toga, prisustvo vlage u proizvodnim pogonima može doprineti stvaranju zapečenih naslaga organske materije na površinama opreme. Ove naslage predstavljaju idealno okruženje za zadržavanje i razmnožavanje mikroorganizama, čime se povećava rizik od kontaminacije i ugrožava bezbednost proizvoda. U tom kontekstu, postoji izražena potreba za razvojem alternativnih metoda dezinfekcije koje su ekonomičnije, efikasnije i ekološki prihvatljivije. Iako tradicionalne metode i dalje predstavljaju pouzdane opcije, njihova ograničenja ukazuju na neophodnost uvođenja inovativnih tehnologija. Budući pravci razvoja u ovoj oblasti usmereni su ka primeni kombinovanih tretmana, automatizaciji i standardizaciji dezinfekcionih procedura, unapređenju programa obuke zaposlenih, kao i edukaciji potrošača u cilju povećanja prihvatljivosti novih tehnologija. Međutim, uprkos napretku u razvoju dezinfekcionih tehnologija, efikasnost postupaka čišćenja i dezinfekcije, posebno u odnosu na mikroorganizme u suvim uslovima, još uvek nije dovoljno istražena. Takođe, dostupni podaci o genetskim mehanizmima otpornosti mikroorganizama na različite dezinfekcione procese su ograničeni, što ukazuje na potrebu za daljim istraživanjima u ovoj oblasti.

Česta pojava perzistentnih i rezistentnih sojeva u uslovima niske aktivnosti vode dodatno naglašava kompleksnost problema i potrebu za razvojem efikasnijih strategija kontrole. Stoga je izbor adekvatnih dezinfekcionih tehnologija ključan za prevazilaženje navedenih izazova i unapređenje bezbednosti hrane u industriji suve hrane.

Zahvalnica

Rad je podržan sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor broj 451-03-33/2026-03/200030).

LITERATURA

1. Beuchat, L.R. Influence of water activity on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Int. J. Food Microbiol.* 1981, 14, 1–21.
2. Podolak, R.; Enache, E.; Stone, W.; Black, D.G.; Elliott, P.H. Sources and risk factors for contamination, survival, persistence, and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods. *J. Food Prot.* 2010, 73, 1919–1936.
3. Carpentier, B.; Cerf, O. Review—Persistence of *Listeria monocytogenes* in food industry equipment and premises. *Int. J. Food Microbiol.* 2011, 145, 1–8.
4. Ferreira, V.; Wiedmann, M.; Teixeira, P.; Stasiewicz, M.J. *Listeria monocytogenes* persistence in food-associated environments: Epidemiology, strain characteristics, and implications for public health. *J. Food Prot.* 2014, 77, 150–170.
5. Giaouris, E.; Heir, E.; Desvaux, M.; Hébraud, M.; Møretrø, T.; Langsrud, S.; Doulgeraki, A.; Ny-chas, G.J.E.; Kačániová, M.; Czaczyk, K.; et al. Attachment and biofilm formation by foodborne bacteria on food contact surfaces. *Food Res. Int.* 2015, 78, 1–13.
6. Galié, S.; García-Gutiérrez, C.; Miguélez, E.M.; Villar, C.J.; Lombó, F. Biofilms in the food industry: Health aspects and control methods. *Front. Microbiol.* 2018, 9, 898.
7. Holah, J. Hygienic design of food factories and the prevention of contamination. *Food Control* 2014, 42, 1–8.
8. EHEDG. Hygienic Design Principles and Guidelines. *EHEDG Guidelines* 2018.
9. Russell, A.D. Principles of antimicrobial activity and resistance. *J. Appl. Microbiol.* 2003, 92, 1S–10S.
10. McDonnell, G.; Russell, A.D. Antiseptics and disinfectants: Activity, action, and resistance. *Clin. Microbiol. Rev.* 1999, 12, 147–179.
11. World Health Organization (WHO). Foodborne Disease Outbreaks: Guidelines for Investigation and Control; WHO: Geneva, Switzerland, 2008.
12. Tang, J. Airborne contamination in food processing environments. *Food Eng. Rev.* 2009, 1, 1–10.
13. Sasahara, K.; et al. Influence of *Pseudomonas* spp. on *Listeria monocytogenes* biofilm formation. *J. Food Prot.* 2013, 76, 1–7.
14. Van Houdt, R.; Michiels, C.W. Role of bacterial interactions in biofilm formation and adhesion. *Res. Microbiol.* 2010, 161, 1–7.
15. Finn, S.; Condell, O.; McClure, P.; Amézquita, A.; Fanning, S. Mechanisms of survival, responses, and sources of *Salmonella* in low-moisture environments. *Front. Microbiol.* 2013, 4, 331.
16. Miranda, R.C.; et al. Transfer of microorganisms from surfaces to foods. *Food Microbiol.* 2016, 58, 1–10.
17. Kusumaningrum, H.D.; van Asselt, E.D.; Beumer, R.R.; Zwietering, M.H. A quantitative analysis of cross-contamination of *Salmonella* and *Campylobacter* spp. via domestic kitchen surfaces. *J. Food Prot.* 2004, 67, 1892–1903.
18. Chaitiemwong, N.; et al. Effect of environmental conditions on *Listeria monocytogenes* survival. *Food Control* 2014, 42, 1–8.
19. Lunden, J.M.; Miettinen, M.K.; Autio, T.J.; Korkeala, H.J. Persistent *Listeria monocytogenes* strains show higher adhesion and resistance. *Appl. Environ. Microbiol.* 2000, 66, 1–6.
20. Abban, S.; Jakobsen, M.; Jespersen, L. Influence of organic matter on microbial adhesion and disinfectant efficacy. *J. Appl. Microbiol.* 2011, 111, 1–10.
21. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Foodborne outbreaks linked to low-moisture foods. *CDC Reports* 2021.