

PREGLEDNI RAD / REVIEW

Oblaganje čestica u prehrambenoj industriji

Particle Coating in Food Industry

Maja Benković, Ingrid Bauman^{1*}*Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb*

Sažetak

Iako je primarna namjena oblaganja čestica bila proizvodnja lijekova sa zaštitnim filmom, oblaganje čestica pronalazi sve veću primjenu i u prehrambenoj proizvodnji, uglavnom radi zadržavanja funkcionalnih svojstava nutraceutika i aditiva. Glavne pozitivne strane oblaganja čestica jesu da nastaju mikrokapsule s produženim vijekom trajanja, lakoćom manipuliranja, kontroliranim oslobađanjem hranjivih tvari, boljim okusom, bojom i sveopćom prihvatljivošću za krajnjeg kupca (Dewettinck i Huyghebaert, 1999). Međutim, u usporedbi s farmaceutskom tehnologijom, prehrambena je više okrenuta smanjenju troškova proizvodnje, a time i drugačijem pristupu oblaganju čestica koje je samo po sebi jako skup proces. Iako skup, proces oblaganja čestica u prehrambenoj industriji koristi se u svrhu očuvanja dobrih svojstava pojedinih aditiva, nutraceutika, probiotičkih kultura i ostalih funkcionalnih sastojaka za koje je bitno da svoja funkcionalna svojstva zadrže tijekom proizvodnog procesa i perioda skladištenja kako bi mogli polučiti pozitivne učinke kod krajnjeg korisnika.

Ključne riječi: oblaganje, prehrambeni proizvodi, prahovi

Summary

Although the production of film tablets in the pharmaceutical industry was the primary purpose of the coating process, it is also frequently used in the food industry. The basic purpose of making coated food products is maintaining functional properties of nutraceuticals and food additives. Main positive effects of coating are products with a longer shelf life, easy to handle, with controllable substance release, better taste, color and appearance for the end customer. However, in comparison with the pharmaceutical industry, food industry is more focused on reducing production costs and therefore a different approach to an expensive particle coating process. Although expensive, particle coating process is used in food industry to preserve functional properties of additives, nutraceuticals, probiotic microorganisms and other functional properties throughout the production process and storage, in order to achieve positive effects on the end customer.

Keywords: coating, foodstuffs, powders

1. Uvod i definicija oblaganja čestica

Nakon razvitka granuliranja čestica u devedesetim godinama dvadesetog stoljeća, proizvođači prehrambenih proizvoda sve više pretendiraju zaštitu bioaktivnih komponenata hrane i aditiva oblaganjem tj. mikroinkapsulacijom. Oblaganje se često koristi i kod prehrambenih prahova kao proces u kojem se tanak sloj filma (tzv. omotač ili ljuska) nanosi na praškaste čestice, kapljice ili mjehuriće plina radi zaštite proizvoda ili njegovog boljeg izgleda. Oblaganje ili mikroinkapsulacija prehrambenih prahova može se koristiti kada se žele razdvojiti reaktivne komponente unutar mješavine, sakriti nepoželjne arome, zaštititi nestabilne spojeve od djelovanja degradacijskih faktora kao što su temperatura, vlaga, zrak ili svjetlost. Može se koristiti u kontroli otpuštanja hranjivih sastojaka i za smanjenje higroskopnosti (Teunou i Poncellet, 2002). Također dovodi do promjene fizikalnih svojstava praškastog materijala u vidu poboljšanja svojstava tečenja i kompresibilnosti praha, smanjenja prašenja i promjene gustoće (Dezarn, 1995; Werner i sur., 2007a). Oblaganje se često provodi u kombinaciji s aglomeracijom. Dok oblaganje služi za poboljšanje izgleda, okusa ili mirisa čestica te za zaštitu od vanjskih utjecaja (kisik, vlaga, svjetlost ili inkompatibilni aktivni sastojci), aglomeracija koja najčešće prethodi oblaganju koristi se za dobivanje čestica većih promjera čime se poboljšavaju svojstva tečenja prahova (Saleh i sur., 2003).

2. Ciljevi i materijali oblaganja

Prema Turtonu i suradnicima krajnji cilj oblaganja je nastanak čestica sa što ravnomjernijim omotačem i provjerenom kvalitetom, s tim da pod pojmom kvaliteta podrazumijevaju mogućnost ponovne proizvodnje čestica s istim svojstvima, kao što su, primjerice koncentracija aktivnog sastojka u mikrokapsuli, svojstva otapanja čestica, izgled i vijek trajanja (Turton i sur., 1999). Kvaliteta obloženih čestica (mikrokapsula) može se određivati na makroskopskoj i mikroskopskoj razini. Na makroskopskoj razini promatraju se svojstva i ponašanje omotača na temelju tri kriterija: kvaliteta proizvoda, iskorištenje proizvodnje i vrijeme trajanja proizvodnje (Maa i sur., 1996). Teunou i suradnici su u procjeni makroskopske kvalitete mikrokapsula koristili četiri različita kriterija: materijalnu učinkovitost, energetska učinkovitost, učinkovitost kvalitete i učinkovitost produktivnosti (Teunou i Poncellet, 2002). Naravno, ovdje je prisutan i nesrazmjer između određenih faktora jer je visoko iskorištenje, niske proizvodne troškove i kratko vrijeme proizvodnje moguće postići samo u idealnim uvjetima, dok je u realnim sustavima to nemoguće. Realni optimum proizvodnje mijenja se ovisno o tipu proizvoda. Primjerice, oblaganje praškastih materijala zahtjeva ulaz sirovina u količinama 2 - 20 tona na sat, što uvelike ugrožava neke aspekte kvalitete gotovog proizvoda (Werner i sur., 2007b).

Corresponding author: ibauman@pbf.hr



Problem predstavlja i odabir pogodnog otapala koje mora biti jeftino te pritom služiti svrsi. Otapalo u otopini za oblaganje služi samo kao transportno sredstvo materijala koji se koristi za oblaganje čestica do površine samih čestica. Kao otapalo može se koristiti voda ili neko organsko otapalo. U prehrambenoj se industriji uglavnom koristi voda kao otapalo zbog strogih propisa o sigurnosti hrane, ali i zbog visokih troškova korištenja sustava za obnavljanje organskih otapala. Materijali koji se koriste za oblaganje mogu se podijeliti u 3 skupine:

1. Polimerni materijali topljivi u vodi – proteini (mliječni, izolati iz orašastih plodova) i ugljikohidrati (škrob, derivati škroba, gume)

2. Polimerni materijali dispergirani u vodenoj fazi – lateksi (Eudragits na bazi akrilnih kopolimera) i pseudolateksi (Aqua-coat ECD na bazi etil celuloze)

3. Materijali za oblaganje topivi na visokim temperaturama - lipidi (masne kiseline, poligliceridi i derivati) i voskovi (karnauba, pčelinji i kandelila)

Prilikom odabira materijala za oblaganje potrebno je obratiti pozornost na svojstva jezgre, tj. praha koji se inkapsulira i mogućnost materijala za inkapsulaciju da zadrži komponente u mješavini odvojenima (King, 1995). Iako su svojstva materijala koji se koristi za oblaganje čestica veoma bitna, još jedan parametar na koji treba obratiti pozornost je obrada tih materijala u povoljnim uvjetima koji se bez velikog ekonomskog troška mogu postići u proizvodnom pogonu.

3. Metode oblaganja čestica

Oblaganje čestica se može podijeliti na dvije skupine, ovisno o tome koristi li se u procesu otapalo ili ne. Oblaganje uz upotrebu otapala uobičajeno se provodi u metalnim posudama, fluidiziranom sloju ili različitim kemijskim metodama koje uključuju koacervaciju i međupovršinsku polimerizaciju. Oblaganje uz upotrebu otapala u pravilu se koristi kad se želi stvoriti tanak film između jezgre i okoliša čija je svrha produženo ili odgođeno otpuštanje djelatne tvari, odvajanje nepodudarnih sastojaka, zaštita od utjecaja vlage, svjetla ili kisika, sakrivanje neugodnih okusa dodataka i slično. Danas se uz upotrebu otapala oblažu čestice, sjemenke, granule ili peleti. Primjerice, u farmaceutskoj se industriji na taj način oblažu tablete sa svrhom stvaranja filma koji će zaštititi djelatnu praškastu tvar u unutrašnjosti tablete i djelovati kao granica u kontroliranom otpuštanju te djelatne tvari te, naravno, radi prikrivanja izrazito neugodnog okusa farmaceutskih supstanci. U prehrambenoj se industriji koristi u intenziviranju okusa, poboljšanju stabilnosti i prihvatljivosti proizvoda i produljenju vijeka trajanja. U agronomiji se oblaže sjemenje i postiže se kontrolirano otpuštanje pesticida i gnojiva (Pfeffer i sur., 2001). Oblaganje uz upotrebu otapala spada u konvencionalnije metode oblaganja, dok se danas sve više koriste nove metode koje ne zahtijevaju prisustvo otapala. Kod suhog oblaganja čestice submikronskih dimenzija smještaju se na površinu većih čestica mikronskih dimenzija. Za razliku od oblaganja s otapalom, suho oblaganje temelji se na principu spajanja jezgara i čestica s kojima se oblaže djelovanjem mehaničkih sila. Budući da su čestice omotača submikronskih dimenzija, van der Waalove sile su dovoljno jake da ih zadrže vezane

na površinu jezgre. Debljina i vrsta omotača koji se može dobiti ovisi o vremenu provođenja procesa, svojstvima čestica i masenom omjeru čestica koje se oblažu i čestica koje bivaju oblagane. Neprekinuti omotač može se sastojati od jednog ili više slojeva čestica, od kojih je svaki sloj porozan, dok se tanki film na površini stvara kao neporozan omotač. Uglavnom se preferiraju neprekinuti, kontinuirani omotači. Da bi se čestice jezgre i omotača dovele čim bliže jedne drugima, tijekom procesa često se namjerno dovodi do deformacije površine jezgre ili ugrađivanja dijela čestica omotača u samu strukturu površine čestice jezgre. Ta deformacija daje veću dodirnu površinu, dovodi do jačanja privlačnih sila među česticama, a time i do stabilnijeg i čvršće prijanjajućeg omotača. Zasebnu vrstu oblaganja predstavlja elektrostatsko oblaganje koje omogućuje vezanje nabijenih čestica na površinu čestice jezgre. Takvo se oblaganje puno češće koristi u industriji metala nego u prehrambenoj industriji, iako postoje istraživanja o mogućoj primjeni i učinkovitosti primjene tog procesa i u prehrambenoj industriji (Ratanatriwong i Barringer, 2007).

Osim što oblaganje stvara granicu između čestica i okoline, koristi se i za poboljšanje svojstava i funkcionalnosti polaznih čestica u vidu poboljšanih svojstava tečenja, disperzibilnosti, topivosti, močivosti, elektrostatskih, magnetskih i optičkih svojstava, privlačnijeg izgleda, okusa, arome i reaktivnosti. Osim proizvodnje materijala s drugačijim svojstvima, proces oblaganja bez upotrebe otapala ekološki je prihvatljiviji i ekonomičniji, uglavnom zbog velikog očuvanja energije s obzirom da se konačni proizvod ne mora podvrgnuti sušenju (Pfeffer i sur., 2001).

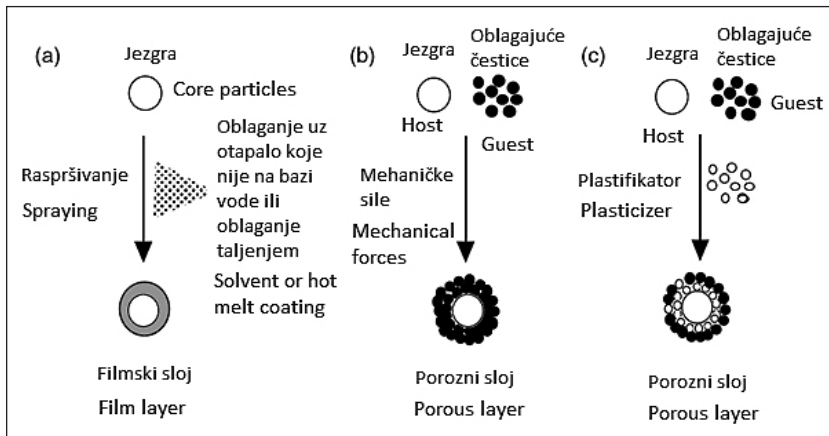
3.1. Oblaganje bez upotrebe otapala (dry coating)

Pod pojmom oblaganje bez upotrebe otapala podrazumijeva se svaki proces oblaganja u kojem se jezgra ne moči vodom tijekom obrade i koristi se za tvari koje su osjetljive na vodu kao otapalo. Zbog upotrebe materijala osjetljivih na vodu ili prisustvo vodene pare, razvijaju se nove tehnike oblaganja koje osiguravaju bolje očuvanje osjetljivih sastojaka. Njih se može podijeliti u 4 osnovne skupine:

- 1) Upotreba otapala koja nisu na bazi vode
- 2) Oblaganje taljenjem
- 3) Oblaganje s kombiniranom upotrebom mehaničkih i kemijskih metoda
- 4) Oblaganje uz upotrebu plastifikatora

U najužem smislu, oblaganje bez upotrebe otapala se odnosi na metode u kojima se jezgra okružuje česticama omotača djelovanjem sila koje nastaju prilikom sudara čestica ili upotrebom otapala koje nije na bazi vode. Šira definicija dopušta upotrebu otapala pod uvjetom da nisu na bazi vode i da ne moče jezgru koja se oblaže. Prema toj definiciji, u ovaj se tip oblaganja ubrajaju i procesi u kojima se upotrebljavaju organska otapala i oblaganje taljenjem. Na Slici 1 prikazani su osnovni principi oblaganja bez upotrebe otapala.

Primjena otapala slična je konvencionalnim metodama oblaganja, uz razliku da se ne moči jezgra nego materijal pomoću kojeg se jezgra oblaže. Pristup oblaganju taljenjem zahtijeva prisustvo materijala za oblaganje koji je pri povišenoj tempera-



Slika 1. Principi oblaganja bez upotrebe otapala : a) otapalo ili taljenje, b) oblaganje djelovanjem mehaničkih sila, c) oblaganje uz upotrebu plastifikatora (Teunou i Poncelet, 2005a)

Figure 1. Dry coating principles: a) solvent and hot melt, b) mechanical forces dry particle coating, c) use of plasticizer (Teunou and Poncelet, 2005a)

turi u tekućem stanju, a nakon završenog procesa oblaganja i tijekom skladištenja u čvrstom obliku. Za vezanje mehaničkim silama potrebna je tehnološka oprema koja razvija velike brzine kretanja čestica da bi se omogućili sudari između čestica i jake adhezijske sile koje tvore porozni sloj omotača oko jezgre, dok se u posljednjem pristupu plastifikatori upotrebljavaju da bi se pospješilo vezanje omotača oko jezgre.

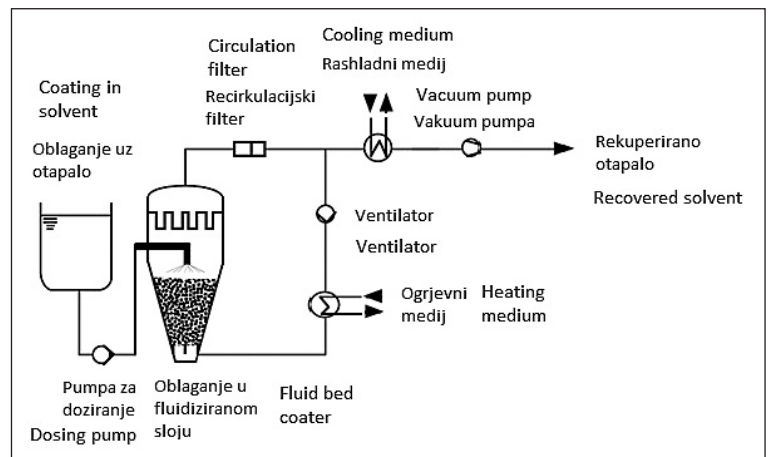
3.1.1. Upotreba otapala koja nisu na bazi vode

Lakohlapiva otapala koriste se u procesu oblaganja jer povećavaju koncentraciju čestica omotača prilikom njihovog nanošenja na jezgru. Istraživanja su pokazala da se to povećanje koncentracije čestica, tj. suhe tvari kreće u rasponu od 4% do 20% (Teunou i Poncelet, 2005). Najčešće se koriste organska otapala : alkoholi (metanol, etanol, n-propanol, n-butanol), aceton, eteri i esteri (diklormetan, etilni acetat, kloroform itd.). Proces se može provoditi u posudama za oblaganje ili u fluidiziranom sloju. Čestice omotača otapaju se u organskom otapalu koje se uklanja isparavanjem nakon što je otopina raspršena po površini jezgre. Glavni nedostaci ovog procesa su isparavanje otapala u okolni zrak, tragovi otapala zaostali u konačnom proizvodu i visok stupanj zapaljivosti organskih otapala. Dopusnene emisije organskih otapala strogo su regulirane tako da proizvodni pogon obavezno mora sadržavati sustav za recirkulaciju i ponovnu upotrebu organskog otapala. Unatoč tome 5 do 10 % otapala ostaje neobnovljeno (Teunou i Poncelet, 2005). Problemi vezani uz obnavljanje organskog otapala i eksplozivnost smjese rješavaju se upotrebom vakuum kolona za destilaciju. Na taj se način proces može optimirati do čim manjeg utroška energije, proces postaje sterilan i povoljan za osjetljive, lako oksidirajuće, higroskopne ili toplinski nepostojane tvari. Unatoč velikom napretku u upotrebi organskih otapala u oblaganju, taj se proces rijetko koristi u prehrambenoj industriji zbog gore navedenih ograničenja.

3.1.2. Oblaganje taljenjem (hot melt)

Upotreba rastaljenih masti, voskova ili polimera kao materijala za oblaganje pruža dobru granicu od vodene pare i plinova (Jozwiakowski i sur., 1990). Proces se može provoditi u svim izvedbama fluidiziranog sloja (gornji, donji i rotirajući). Čestice omotača tale se na visokoj temperaturi i u tekućem se stanju raspršuju na jezgre i stvrdnjavaju na površini jezgre pod utjecajem hladnog zraka, tako da i u ovoj izvedbi jezgra nikad ne dolazi u dodir s vodom. Tijekom procesa bitno je držati konstantnom temperaturu rastaljenog omotača. To se obično provodi na zagrijanoj ploči, na temperaturama 40 do 60°C iznad točke taljenja.

Osim taljenja čestica omotača, blago se zagrijava i zrak za raspršivanje koji pripomaže očuvanju materijala omotača tekućim prije dodira s jezgrom. Prednosti oblaganja taljenjem su sljedeće: niski troškovi, ne zahtijeva upotrebu otapala, kratko vrijeme trajanja i nema potrebe za završnim sušenjem. Bitna ograničenja



Slika 2. Procesna shema oblaganja taljenjem (Teunou i Poncelet, 2005a)

Figure 2. Hot melt coating process (Teunou and Poncelet, 2005a)

vezana uz taj tip procesa su da je neprimjenjiv ukoliko se radi o toplinski nepostojanim materijalima, konačni proizvod pokazuje izrazito loša svojstva tečenja i loš miris koji proizvod prima zbog obaveznog zagrijavanja omotača iznad temperature taljenja.

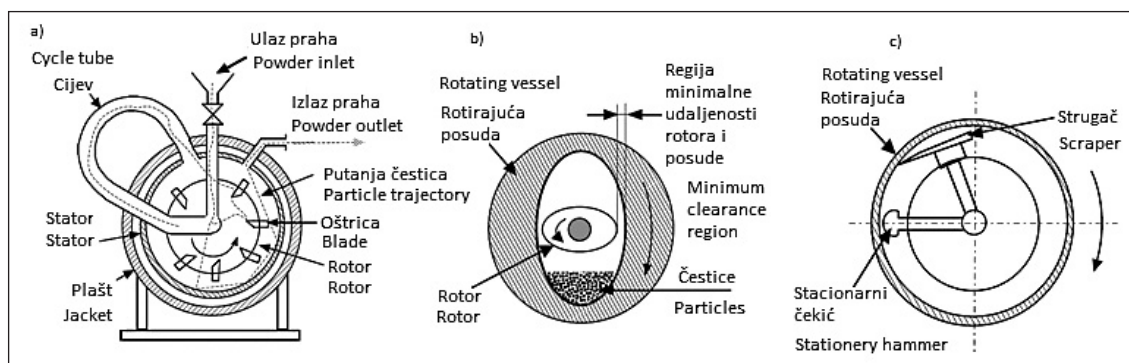
3.1.3. Suho oblaganje uz upotrebu mehanokemijskih metoda

Ovaj princip oblaganja temelji se na prisustvu velikih čestica (jezgara) na čiju se površinu vežu čestice malih promjera upotrebom mehaničkih sila. Kao rezultat nastaju visokoporozne čestice s dobrim rekonstitucijskim svojstvima. Mehanizam vezanja čestica je sljedeći: aglomerati prisutni među česticama malih promjera kojima se oblaže jezgra prije samog procesa oblaganja razbijaju se na primarne čestice. Tako nastale čestice vežu se na površinu jezgre zbog sudara između



novopridošlih čestica malih promjera i već postojećih, dijelom obloženih većih čestica (Alonso i Alguacil, 2001). Proces je sličan procesu miješanja dvije vrste praha kod kojeg dolazi do adhezije manjih čestica na površinu većih koje je nakon adhezije teško ukloniti s površine velikih čestica zbog jakih van der Waalsovih privlačnih sila. Na sličnost procesa suhog oblaganja čestica i suhog miješanja ukazao je Pfeffer, ali je isto tako naglasio i da između ta dva procesa postoje i značajne razlike koje se temelje na jačini privlačnih sila između čestica. U procesu suhog miješanja, čestice jezgre su slabije prekrivene česticama manjih promjera i privlačne sile među njima su slabije, dok su kod oblaganja privlačne sile puno jače (Pfeffer i

tor zamijeni upotrebu mehaničke sile za slijepljivanje čestica. Proces se provodi u dvije faze. Prva se faza sastoji od miješanja jezgara i oblagajućih čestica te dovođenja plastifikatora u mješavinu u obliku spreja. U ovoj fazi se stvara sloj oblagajućih čestica oko čestica jezgre. U drugoj se fazi cijela mješavina zagrijava sa svrhom pretvaranja sloja površinskih čestica u tanki film. Ovaj je proces razvila japanska tvrtka Shin-Etsu a primarna mu je namjena bila oblaganje tableta i peleta pomoću mješavine trietil citrata i acetiliranog monoglicerida kao plastifikatora (Obara i sur., 1999). Ova je metoda našla široku primjenu u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji zbog dvije bitne prednosti : 1) ne dolazi do deformacije u strukturi gotove



Slika 3. a) Hibridizator b) HEM; c) Mehanofuzijski uređaj (Teunou i Poncelet, 2005a)

Figure 3. a) Hybridizer, b) HEM, c) Mechanofusion coating machine (Teunou and Poncelet, 2005a)

sur., 2001). Da bi se postigla jača sila vezivanja čestica, suho oblaganje zahtijeva veći utrošak mehaničke energije. U svrhu postizanja jačih privlačnih sila među česticama, razvijeni su brojni tipovi uređaja za suho oblaganje prikazanih na Slici 3 (hibridizer, mehanofuzijski uređaj, HEM mikser – High Speed Elliptical Rotor Type Mixer, RFBC – Rotating Fluidized Bed Coater – rotirajući uređaj za oblaganje u fluidiziranom sloju, MAIC – Magnetically Assisted Impaction Coater).

Usporedbu procesa suhog oblaganja čestica s obzirom na svojstva dobivenih čestica istraživali su Yang i suradnici (2005). Proveli su četiri tipa procesa suhog oblaganja – MAIC, oblaganje pomoću hibridizatora, V miješalice te ručno miješanje. Uzorci dobiveni ručnim miješanjem koristili su se kao kontrolni uzorci. Kao čestice jezgre koristili su kukuruzni škrob koji su oblagali silikatnim česticama. Fotografije snimljene pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa („field emission scanning electron microscope“ – FESEM) pokazale su da se primjenom hibridizatora i MAIC uređaja dobivaju čestice s ujednačenijim slojem obloženih čestica nego je to slučaj sa V – mješalicom i ručnim miješanjem (Slika 4). Također je potvrđeno da hibridizator i MAIC omogućuju bolju prekrivenost površine čestice jezgre s česticama omotača.

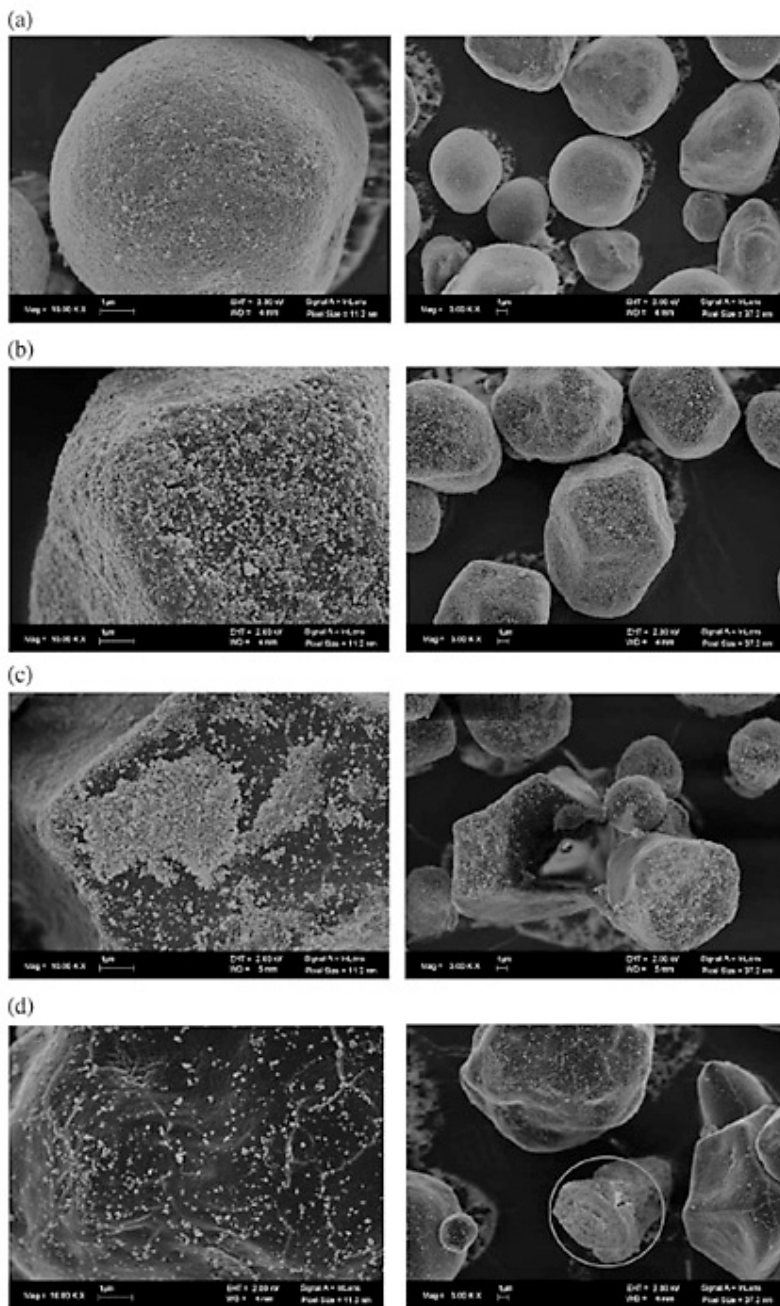
3.1.4. Upotreba plastifikatora

Iako gore opisane metode oblaganja daju stabilne čestice visoke poroznosti sa dobrim rekonstitucijskim svojstvima, cijeli proces smatra se neekonomičnim jer zahtijeva velika ulaganja u uređaje za miješanje i velik utrošak energije. Upotreba plastifikatora uvedena je s idejom da dodana suha tvar tj. plastifika-

obložene čestice i 2) ne zahtijeva ulaganja u nova mješala i veliki utrošak energije da bi se postigla mehanička sila potrebna za povezivanje čestica (Teunou i Poncelet, 2005).

3.2. Oblaganje uz upotrebu otapala

Oblaganje uz upotrebu otapala u pravilu se koristi kad se želi stvoriti tanak film između jezgre i okoliša čija je svrha produženo ili odgođeno otpuštanje djelatne tvari, odvajanje nepodudarnih sastojaka, zaštita od utjecaja vlage, svjetla ili kisika, sakrivanje neugodnih okusa dodataka i slično. Danas se uz upotrebu otapala oblažu čestice, sjemenke, granule ili peleti. Oblaganje uz upotrebu otapala uobičajeno se provodi u metalnim posudama, fluidiziranom sloju ili različitim kemijskim metodama koje uključuju koacervaciju i međupovršinsku polimerizaciju. Oblaganje uz upotrebu otapala najčešće se provodi u fluidiziranom sloju. Oblaganje u fluidiziranom sloju prehrambenoj industriji daje mogućnost razvitka novih tipova inkapsuliranih sastojaka hrane ili aditiva. Međutim, u usporedbi s farmaceutskom industrijom, u kojoj je upotreba oblaganja puno isplativija, prehrambena je industrija suočena sa stalnim zahtjevima za smanjenjem troškova a time i modifikacijom postojećih, najčešće vrlo skupih, procesa oblaganja. Nadalje, najisplativijom izvedbom čini se konvencionalno oblaganje gornjim raspršivanjem u fluidiziranom sloju koji se najviše koristi u prehrambenoj industriji. Do fluidizacije dolazi kada se postigne dovoljna brzina strujanja zraka ili fluida koja drži čestice u lebdećem stanju. Tipična primjena fluidizacije u prehrambenoj industriji može se naći u procesu smrzavanja, sušenja raspršivanjem, aglomeraciji, granuliranju, blanširanju



Slika 4. FESEM fotografije obloženih čestica kukuruznog škroba. (a) Lijevo: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog MAIC oblaganjem – povećanje 10 000x; desno: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog MAIC oblaganjem – povećanje 3 000x; (b) lijevo: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem pomoću hibridizatora – povećanje 10 000x; desno: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem pomoću hibridizatora – povećanje 3 000x; (c) lijevo: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem pomoću V miješalice – povećanje 10 000x; desno: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem pomoću V miješalice – povećanje 3000x; (d) lijevo: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem ručnim miješanjem – povećanje 10 000x; desno: čestice obloženog kukuruznog škroba dobivenog oblaganjem ručnim miješanjem – povećanje 3000x (Yang i sur., 2005)

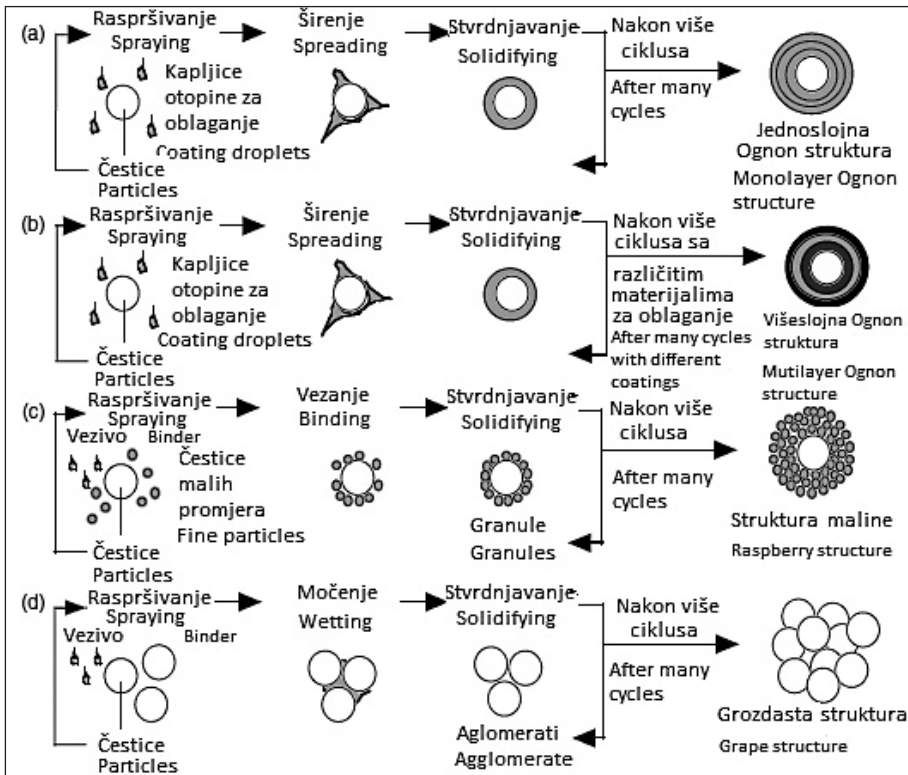
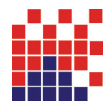
Figure 4. FESEM images of coated cornstarch. (a) Left: MAIC coated cornstarch with magnification of 10,000 ; right: MAIC coated cornstarch with magnification of 3000 ; (b) left: Hybridizer coated cornstarch with magnification of 10,000 ; right: Hybridizer coated cornstarch with magnification of 3000 ; (c) left: V-shaped blender coated cornstarch with magnification of 10,000 ; right: V-shaped blender coated cornstarch with magnification of 3000 ; (d) left: Hand mixing coated cornstarch with magnification of 10,000 ; right: Hand mixing coated cornstarch with magnification of 3000x (Yang et al., 2005)

i kuhanju (Shilton i Niranjana, 1993). Međutim, kod oblaganja u fluidiziranom sloju potrebno je poznavati veliki broj varijabla da se osigura konačna uspješnost procesa.

3.2.1. Oblaganje čestica u fluidiziranom sloju

Proces oblaganja u fluidiziranom sloju razvio je D. E. Wurster u pedesetim godinama 20. stoljeća zbog čega je cijeli proces i dobio naziv Wurster proces (Arshady, 1993). Iako se naveli primjenjivalo u farmaceutskoj industriji, oblaganje u fluidiziranom sloju u prehrambenoj se industriji u početku koristilo samo kao posljednji odabir u rješavanju problema vezanih uz stabilnost određenih komponenata hrane (Dewettinck i Huyghebaert, 1999). Međutim, s povećanjem proizvodnih kapaciteta i poboljšanjem tehnoloških postupaka velik je broj prehrambenih proizvoda dostupan u mikroinkapsuliranom obliku po prihvatljivim cijenama (Dezarn, 1995). Mehanizmi stvaranja sloja čestica omotača oko jezgre prikazani su na Slici 5.

Primjena tehnologije fluidiziranog sloja za oblaganje čestica uvijek teži proizvodnji konačnog proizvoda ujednačene kvalitete i morfologije. Izgled konačnog proizvoda u najvećoj je mjeri ovisan o fizikalnim karakteristikama kapljica otapala koja se koriste u procesu (Eichler, 1989). Do stvaranja omotača oko čestica jezgre ne dolazi prilikom samo jednog prolaza kroz zonu oblaganja, već je za potpuno prekrivanje površine čestica jezgre potrebno više prolazaka kroz zonu oblaganja. Do stvaranja kapljica, kontakta čestica, koalescencije i isparavanja dolazi gotovo istovremeno tijekom procesa (Jones, 1985). Sapnice koje se koriste kod oblaganja u fluidiziranom sloju jesu binarne ili pneumatske : tekućina se dovodi sapnici pri niskom tlaku, u sapnici se razbija na male kapljice koje zatim pod visokim tlakom izlaze iz sapnice i raspršuju se po površini čestica. Glavni razlog korištenja takvog tipa sapnica je lakša kontrola veličine izlaznih kapljica, posebice pri niskim brzinama dovođenja tekućine (Hall i Pondell, 1980). Osim tipa sapnice, na veličinu kapljica utjecaja ima i brzina strujanja i temperatura zraka u komori. Naime, zrak je, osim za fluidizaciju, odgovoran i za isparavanje otapala koje se koristi kao nositelj čestica. Veće isparavanje otapala dovodi do povećanja viskoznosti kapljica te time i do težeg širenja kapljica po površini jezgre i koalescencije (Jones, 1985). Utjecaj na viskoznost kapljica ima i udaljenost koju moraju prijeći putujući kroz fluidizirani zrak prije nego dođu u dodir sa česticom jezgre. Problem udaljenosti postaje veći ako se koriste organska otapala s puno nižom temperaturom isparavanja od vode ili prilikom upotrebe



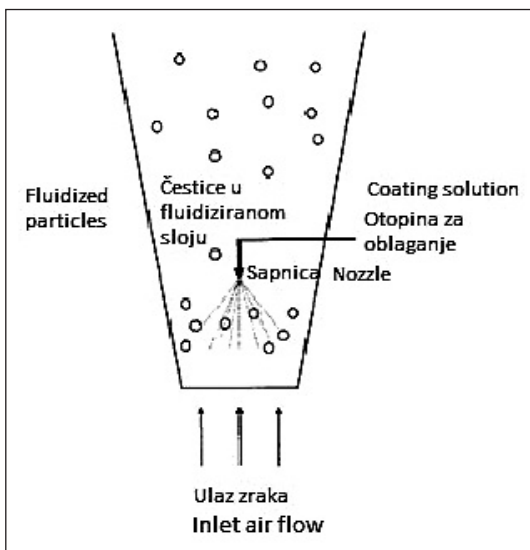
Slika 5. Mehanizmi stvaranja sloja čestica oko čestice jezgre prilikom oblaganja u fluidiziranom sloju: a) stvaranje tankog filma oko jezgre; b) stvaranje višeslojnog omotača s različitim vrstama oblagajućih čestica; c) granuliranje; d) aglomeracija (Teunou i Poncet, 2002)

Figure 5. Fluid-bed coating mechanisms: a) thin film layer, b) multilayer coating, c) granulation, d) agglomeration (Teunou and Poncet, 2002)

otopina polimera u vodi čija je viskoznost jako osjetljiva na promjene u sadržaju suhe tvari (Eichler, 1989; Jones, 1985). U većini slučajeva sapnica se smješta na što manju moguću udaljenost od čestica praha u komori.

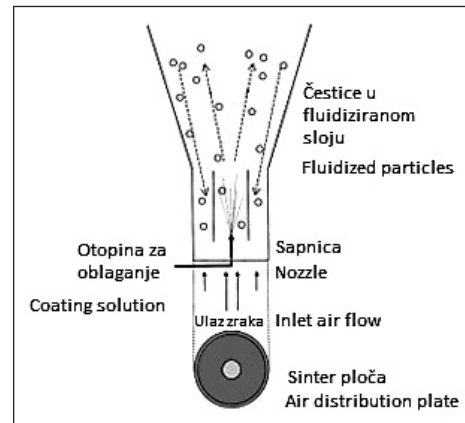
Izvedbe oblaganja u fluidiziranom sloju

Oblaganje gornjim raspršivanjem



Slika 6. Shema oblaganja gornjim raspršivanjem (Dewettinck i Huyghebaert, 1999)

Figure 6. Top spray fluidized bed coating (Dewettinck and Huyghebaert, 1999)



Slika 7. Shema oblaganja donjim raspršivanjem (Wurster proces) (Dewettinck i Huyghebaert, 1999)

Figure 7. Bottom spray fluidized bed coating (Wurster process) (Dewettinck and Huyghebaert, 1999)

Oblaganje donjim raspršivanjem, poznatije kao Wurster proces, koristi se za oblaganje čestica minimalnog promjera 100 μm . Čestice kruže u zoni oblaganja nekoliko sekundi, isto kao i u oblaganju gornjim raspršivanjem, ali je bitna razlika u tome da se parametri Wurster procesa uspješnije mogu kontrolirati (Jones, 1988). Udaljenost koju kapljice prolaze na putu prema supstratu je kratka, tako da je na taj način gotovo u potpunosti eliminirano isparavanje otapala. Oblagajuće čestice se vežu za površinu jezgre tvoreći tanak film s izvrsnim fizikalnim svojstvima (Mehta i Jones, 1985). Međutim, neka su istraživanja ukazala i na određene nedostatke Wurster proc-

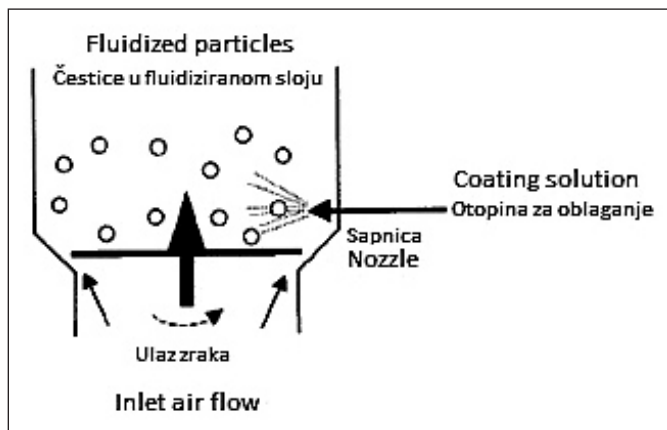
Konvencionalno oblaganje gornjim raspršivanjem slično je sušenju u fluidiziranom sloju. Čestice praha struje u fluidizacijskoj komori dok sapnica na njih raspršuje otopinu oblagajućih čestica (Slika 6). Obložene čestice putuju kroz zonu oblaganja u ekspanzijsku komoru nakon čega se vraćaju u fluidizacijski dio komore i dalje kruže kroz proces. Sustav s gornjim raspršivanjem koristi se za oblaganje čestica minimalnog promjera 100 μm (Jones, 1988). Međutim, Thiel i Nuygen razvili su primjenu procesa gornjeg raspršivanja za inkapsulaciju čestica malih promjera (2–5 μm) uz uvjet da se prethodno vežu na nosače većeg promjera koji se nakon toga inkapsuliraju na tradicionalan način – s gornjim raspršivanjem (Thiel i Nuygen, 1984). Glavni nedostatak oblaganja gornjim raspršivanjem jest nemogućnost kontrole udaljenosti koju kapljice prijeđu prije nego se vežu na čestice jezgre. Također se javlja problem vezan uz isparavanje organskog otapala (Jones, 1985).

Oblaganje donjim raspršivanjem

esa. Wesdyk i sur. zaključili su kako čestice oblagane Wurster procesom pokazuju neujednačenu debljinu filma – veće čestice bile su obložene debljim filmom nego manje čestice. Razliku u debljini filma objasnili su razlikom u putu čestica kroz fluidizacijsku komoru i zonu oblaganja (Wesdyk i sur., 1993).

Oblaganje u rotacijskom fluidiziranom sloju

Primjena centrifugalne sile u procesu oblaganja predstavlja relativno nov pristup. Tijekom fluidizacije kombiniraju se tri sile koje omogućuju strujanje po helikoidalnoj putanji. Cen-



Slika 8. Rotacijski fluidizirani sloj (Dewettinck i Huyghebaert, 1999)
Figure 8. Tangential spray fluidized bed coating (Dewettinck and Huyghebaert, 1999)

trifugalna sila nastala zbog rotacije diska na dno komore gura čestice prema stijenkama komore, zrak koji se dovodi na dnu komore odgovoran je za akceleraciju i dizanje čestica prema gore, dok gravitacija potiskuje čestice ponovno prema dnu,

točnije prema rotirajućem disku. Neposredno iznad diska, ali ispod sloja praha smještena je sapnica koja raspršuje otopinu za oblaganje tangencijalno prema toku čestica. Kvaliteta filma nastala ovim tipom procesa ista je kao kvaliteta filma nastala u Wurster procesu (Eichler, 1989).

Sva tri tipa oblaganja u fluidiziranom sloju imaju svoje prednosti i mane, ali gornje raspšivanje pokazuje najveće mogućnosti primjene u prehrambenoj industriji, uglavnom zbog prilagodljivosti, velikog volumena punjenja i jednostavnosti.

Osim gore navedenih izvedbi oblaganja u fluidiziranom sloju ta se vrsta oblaganja može podijeliti i na šaržno i kontinuirano s obzirom na način provedbe procesa. U Tablici 1 prikazana je usporedba osnovnih značajki šaržnog i kontinuiranog načina provedbe oblaganja u fluidiziranom sloju.

Šaržni proces najčešće je upotrebljavani proces oblaganja u farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji. Iako ga karakteriziraju visoki troškovi i dugotrajnost, farmaceutska i kozmetička industrija su u mogućnosti kompenzirati visoke troškove proizvodnje s visokim cijenama konačnog proizvoda. Međutim, njegova primjena u prehrambenoj industriji, koja je najčešće podređena sušenju raspršivanjem, uglavnom je ograničena na mali broj proizvoda visokih cijena. Primjerice, unatoč visokoj učinkovitosti, Wurster proces nije naišao na veliku primjenu u prehrambenoj industriji upravo zbog previsoke cijene konačnog proizvoda. Daljnim razvojem kontinuiranih procesa postiže se smanjenje troškova proizvodnje, što predstavlja privlačnu alternativu u proizvodnji obloženih čestica prehrambenih prahova, iako je još uvijek aktualno pitanje lošije kvalitete konačnog proizvoda.

Kao najveći nedostatak oblaganja uz upotrebu otapala navodi se neželjena aglomeracija tijekom procesa. Uvođenje zraka u fluidizacijsku komoru pri velikim brzinama dovodi

Tablica 1. Usporedba šaržnog i kontinuiranog oblaganja čestica u fluidiziranom sloju (Teunou i Poncelet, 2005)
Table 1. Comparison of batch and continuous coating (Teunou and Poncelet, 2005b)

	Šaržni (Wurster) Batch (Wurster)	Kontinuirani (horizontalni) Continuous (horizontal)
Volumen [L] Volume [L]	120	120
Protok [kg/h] Flow rate [kg/h]	50	100
Cijena osnovne opreme [€], podaci iz 1999. Price of the basic equipment in 1999 [€]	1 100 000	610 000
Ukupni trošak cijelog procesa [€/kg] Cost of the coating operation [€/kg]	2,1	0,6
Kvaliteta gotovog proizvoda Product quality	Izvrсна (ujednačenost raspodjele čestica) Excellent (uniform batch)	Prihvatljiva (necjelovit sloj oko čestica jezgre, heterogeni proizvod) Acceptable (presence of capsules with incomplete layer, heterogeneous product)



do velikog broja sudara čestica koji rezultiraju stvaranjem aglomerata. Isto tako, bitno je dobro prilagoditi dotok tekućine u spreju da ne bi došlo do neželjenog sljepljivanja čestica. Aglomeracija kao nuspojava oblaganja najčešće se sprječava povećanjem kinetičke energije čestica ili smanjenjem sadržaja vlage u fluidiziranom sloju. Međutim, smanjenje razine vlage produžava vrijeme potrebno za oblaganje, a time i cjelokupne troškove procesa. Istraživanja su utvrdila da je aglomeracija u procesu oblaganja ovisna o masi, higroskopnosti, kapacitetu vezanja vode i viskoznosti oblagajućih čestica te temperaturi staklastog prijelaza (Dewettinck i sur., 1999; Dewettinck i sur. 1998). Povezanost oblaganja i aglomeracije u fluidiziranom sloju te utjecaj veličine čestica i brzine rasta aglomerata s naglaskom na modeliranju i optimiranju procesa proveli su Saleh i suradnici. Stopa rasta aglomerata i obloženih čestica i učinkovitost procesa opadaju s porastom veličine čestica. Porast promjera čestica uglavnom je ovisio o stvaranju slojeva za čestice s promjerom većim od 200 μm , dok je do porasta čestica manjih promjera došlo zbog njihovog povezivanja u aglomerate. Za čestice manje od 90 μm oblaganje nije bilo izvedivo zbog nekontroliranog rasta i sljepljivanja čestica. Međutim, oblaganje čestica malih promjera može se uspješno izvesti ukoliko se u smjesu dodaju čestice većeg promjera (~ 450 μm) (Saleh i sur., 2003).

4. Elektrostatsko oblaganje

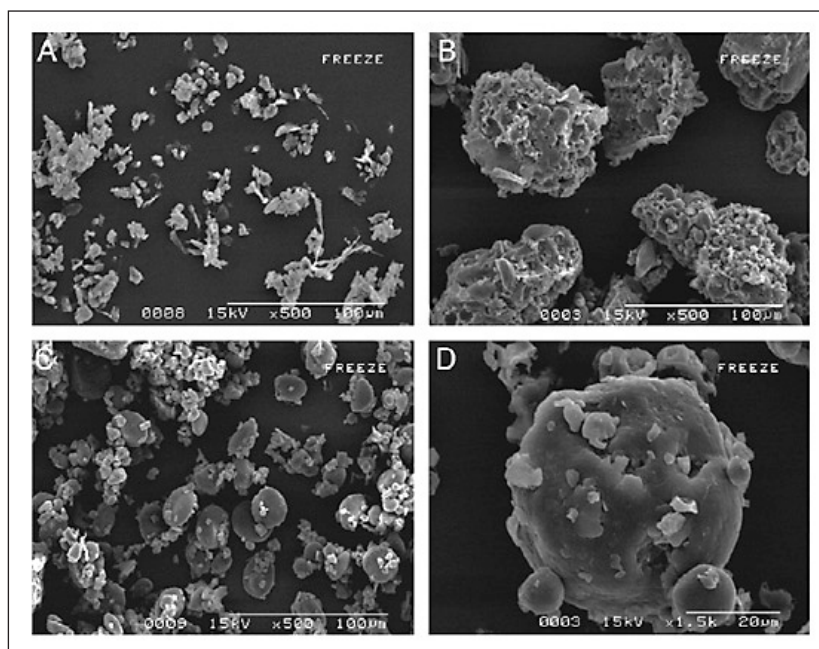
Elektrostatsko oblaganje predstavlja jednu od novijih metoda u prehrambenoj industriji. Princip na kojem se temelji jest dovođenje naboja česticama u električnom polju ili takozvanoj korona zoni, tj. zoni naboja (Bailey, 1998). Zbog istog se naboja oblagajuće čestice međusobno odbijaju i tvore oblak oko čestice jezgre. Aerodinamične, gravitacijske i Coulombove sile tada pomažu u vezivanju oblagajućih čestica na jezgru. Coulombova sila djeluje tako da ubrzava nabijene čestice prema jezgri koje se naposljetku vežu za površinu jezgre u tankom sloju. Sile adhezije koje se javljaju između čestica u procesu djeluju tako da smanjuju količinu izgubljenih čestica praha. Prednosti elektrostatskog oblaganja jesu ujednačenost konačnog proizvoda, manje prašenja, kraći period čišćenja i viša učinkovitost prijenosa čestica (transfer efficiency – TE).

Ratanatriwong i Barringer proveli su istraživanje na deset vrsta prehrambenih prahova koji su se razlikovali u sadržaju proteina, ugljikohidrata i soli i veličine čestica od 19 do 165 μm i koji su oblagani elektrostatski i neelektrostatski. Za istraživanje su odabrali prahove koji se najčešće oblažu u prehrambenoj industriji: maltodekstrin, demineralizirana sirutka, izolati proteina sirutke, obrano mlijeko u prahu, kuhinjska sol (NaCl), natrijev eritorbat, kalijev klorid, jabučna i limunska kiselina te su ih prije oblaganja samljeli do veličine čestica 19 – 165 μm . Svim je uzorcima određena veličina čestica prije i nakon oblaganja te kut otklona koji je korišten za karakterizaciju svojstva tečenja

prahova. Primjećeno je povećanje učinkovitosti neelektrostatskog oblaganja s povećanjem veličine čestica i kohezivnosti praha. Viši neelektrostatski TE postignut je s prahovima koji slobodno teku. Obrnuti je slučaj primjećen s elektrostatskim oblaganjem. Čim su čestice manjih promjera, naboj im je veći i veći je elektrostatski TE (Ratanatriwong i Barringer, 2007). Sumawi i Barringer istraživanja su proveli na 23 prehrambena praha (izolati sojinih proteina, proteini sirutke, rižini proteini, kolagen, kukuruzni škrob, celuloza, maltodekstrin, šećer uprahu, kakao prah, soda i sol – svi iz različitih izvora) u svrhu utvrđivanja utjecaja naboja na kvalitetu i svojstva gotovog proizvoda. Utvrdili su da je za postizanje najvišeg stupnja oblaganja potrebno koristiti pozitivan naboj ukoliko se radi o prahovima koji sadrže proteine, dok se negativan naboj pokazao učinkovitijim za prahove koji u sastavu imaju ugljikohidrate. Za kuhinjsku sol može se koristiti i pozitivan i negativan naboj (Sumawi i Barringer, 2005). Setyo i Barringer mijenjali su pH otopine koju su koristili u oblaganju te došli do zaključka da pH otopine ne utječe na učinkovitost oblaganja s primjenom pozitivnog naboja kod većine korištenih prahova, dok samo kod nekih uzoraka promjena pH vrijednosti može rezultirati boljom adhezijom čestica. Povećanje gustoće čestica dovodi do povećanja kohezivnosti a time i do bolje adhezije. TE i adhezija kod prehrambenih prahova može se poboljšati koristeći pozitivni ili negativni naboj (Setyo i Barringer, 2007).

5. Primjena oblaganja čestica u prehrambenoj industriji

Kim i Sur. (2008) istraživali su primjenu pšeničnog brašna obloženog mljevenim sojinim ljuskicama kao smjese za prženje krumpira sa svrhom smanjenja apsorpcije masti tijekom prženja. Sojine ljuskice samljali su i koristili kao čestice

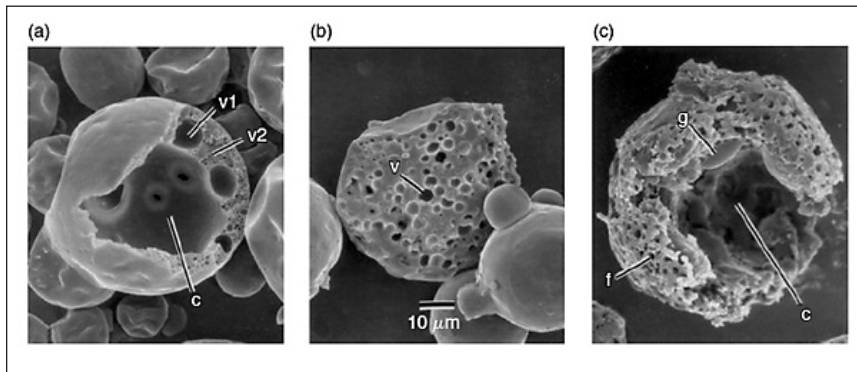


Slika 9. SEM fotografije sojinih ljuskica (A), pšeničnog brašna (B), pšeničnog brašna obloženog sojinim ljuskicama (C) te povećanja pšeničnog brašna obloženog sojinim ljuskicama (D) (Kim i sur., 2008)

Figure 9. Scanning electron micrographs of soybean hull (A), wheat flour (B), soybean hull-wheat flour composite by dry particle coating system (C), and magnification of (C) shown in (D). (Kim et al., 2008)

za oblaganje procesu suhog oblaganja pšeničnog brašna. Za oblaganje je korišten hibridizator s 12 500 okretaja u minuti pri tlaku od 0.3 Mpa. Proces oblaganja proveden je kroz 3 minute s omjerom čestica jezgre (pšenično brašno) naprama

polimera. U ovom se slučaju radi o kombinaciji dvije metode oblaganja – prvo oblaganje provedeno je uz umješavanje u otapalo i sušenje raspršivanjem, dok je vanjski omotač sastavljen od biljnog voska nanesen metodom vrućeg taljenja. Struktura dobivenih mikrokapsulica prikazana je na Slici 11.



Slika 10. SEM fotografije mikrokapsulica ulja maslaca u ugljikohidratnoj matrici - prikaz unutrašnje matrice. (a) saharoza, (b) modificirani škrob, (c) nemodificirani škrob. Sve mikrokapsulice sadržavaju 40% mliječne masti (Onwulata, 2005a)

Figure 10. Scanning electron micrographs of microcapsules of butter oil in carbohydrate matrices - internal matrices. (a) Sucrose, (b) M-Starch, (c) N-Starch. All microcapsules contain 40% milk fat. (Onwulata, 2005a)

česticama za oblaganje (sojine ljuskice) 99:1 te 99:5. Struktura pojedinačnih i obloženih čestica pračena je putem skenirajuće elektronske mikroskopije („scanning electron microscopy“ – SEM) te je prikazana na Slici 9.

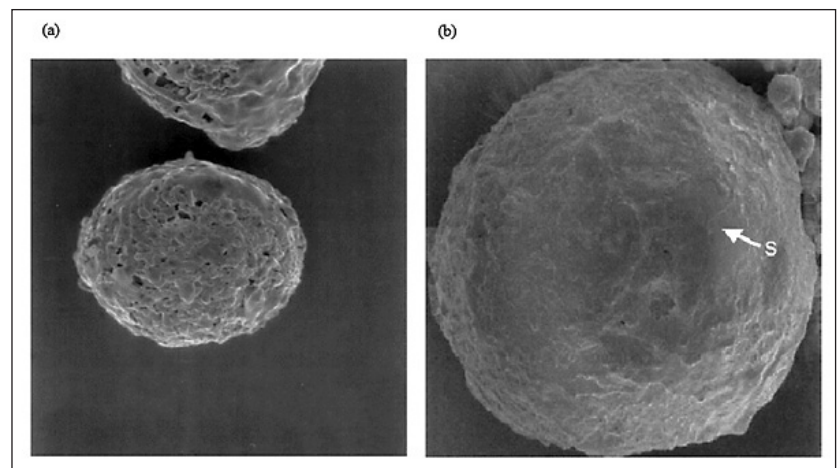
Primjenom sojom obloženih čestica pšeničnog brašna kao panade prilikom prženja krumpira utvrđeno je da je smanjena apsorpcija masti od strane krumpira. Objašnjenje koje su Kim i sur. ponudili jest da čestice brašna obložene sojinim ljuskicama stvaraju zaštitini sloj oko krumpira koji ne dopušta apsorpciju masti u sam matriks krumpira.

Onwulata (2005) navodi metodu oblaganja uz upotrebu otapala u kombinaciji sa sušenjem raspršivanjem, koju u prvoj fazi karakterizira stvaranje emulzije koja se stabilizira pomoću emulgatora te se zatim ta smjesa suši raspršivanjem. Kao jezgru koristi ulje maslaca, dok kao čestice kojima oblaže koristi saharozu i dvije vrste škroba (N – nemodificirani i M – modificirani). Također koristi emulgator (smjesu mono- i diglicerida) te obrano mlijeko u prahu kao izvor proteina. Kao konačni proizvod nastaju mikrokapsule ulja maslaca, čija je struktura prikazana na Slici 10.

Oblaganjem su dobiveni prahovi sa 40 – 60% mliječne masti koji su pokazivali dobra svojstva tečenja. Mikrokapsulice u kojima je vanjski omotač sadržavao čestice saharoze pokazivale su najbolja svojstva. Takve se mikrokapsulice mogu koristiti u proizvodima koji uz prisustvo ulja maslaca zahtijevaju i određenu slatkoću koja je osigurana u omotaču mikrokapsulice (Onwulata, 2005a).

Onwulata (2005b) također opisuje i oblaganje masla dvostrukom ovojnicom. Unutarnji omotač čini saharoza, dok je vanjski omotač sačinjen od biljnog voska i smjese alkoholnih

oblaganja praškastih čestica, konačni su proizvod mikrokapsulice veličina od 400 μm do 1 mm koje pokazuju svojstva slična praškastim materijalima. Međutim, važno je napomenuti da se mikroinkapsulirani mikroorganizmi najčešće skladište pri temperaturama ispod nule te da su u sobnim uvjetima nestabilni. Koriste se u proizvodnji fermentiranih mliječnih proiz-



Slika 11. SEM fotografije mikroinkapsuliranog masla. (a) jednostruki saharozni omotač, (b) dvostruki omotač (saharozna i biljni vosak) (Onwulata, 2005b)

Figure 11. SEM images of (a) butter oil encapsulated in sucrose, (b) double - encapsulated butter oil (sucrose and vegetable wax) (Onwulata, 2005b)

voda kao što su jogurt ili sir. Na Slici 12 prikazana je struktura probiotičkih bakterija obloženih alginatom.

Osim gore navedenih primjera istraživanja, u prehrambenoj se industriji najčešće inkapsuliraju vitamini C i B, željezov sulfat i fumarat, natrijev askorbat, kalijev klorid i različite mješavine vitamina i minerala (Dezarn, 1995). U pekarskoj industriji inkapsuliraju se vitamin C, octena kiselina, mliječna kiselina, kalijev sorbat, sorbinska kiselina,



Slika 12. Probiotičke bakterije (*B. infantis*) obložene alginatom (Kailasapathy, 2002)

Figure 12. Probiotic bacteria (*B. infantis*) coated with alginate (Kailasapathy, 2002)

kalcijev propionat i natrijev klorid (Dezarn, 1995; De Pauw i sur., 1996). Mikroinkapsulirani vitamin C primjenjuje se kao zamjena za dosta nepopularan kalijev bromat. U industriji mesa mikroinkapsulacija se koristi za kiseline odgovorne za boju i okus krajnjeg proizvoda. Također se koriste za postizanje stalne regulacije pH mesa i skraćivanje vremena obrade mesa. Mikroinkapsulirana sol dodaje se mesnim proizvodima

Tablica 2. Sastojci hrane koji se mogu inkapsulirati (Gibbs, 1999, Barbosa-Canovas i sur., 2005)

Table 2. Various food ingredients that can be encapsulated (Gibbs, 1999, Barbosa-Canovas et al., 2005)

Sastojak hrane <i>Type of ingredient</i>
Arome <i>Flavoring agents</i>
Tvari za regulaciju pH <i>pH agents</i>
Lipidi <i>Lipids</i>
Redoks tvari <i>Redox agents</i>
Enzimi i mikroorganizmi <i>Enzymes and microorganisms</i>
Umjetna sladila <i>Artificial sweeteners</i>
Tvari za rahljenje <i>Leavening agents</i>
Konzervansi <i>Preservatives</i>
Bojila <i>Colorants</i>
Tvari za unakrsno povezivanje proteina <i>Cross-linking agents</i>
Tvari s neugodnim okusima i mirisima <i>Agents with undesirable flavors and odors</i>
Esencijalna ulja, aminokiseline, vitamini i minerali <i>Essential oils, amino acids, vitamins, minerals</i>

radi sprječavanja užeglosti kao i preranog smanjenja volumena uzrokovanog vezanjem miofibrila (Dezarn, 1995; Dewettinck i Huyghebaert, 1999). Tablica 2 predstavlja prikaz svih sastojaka koji se koriste u prehrambenoj industriji, a za koje su razvijene metode oblaganja.

Arome i začini u obliku mikro kapsulica donose mnoge prednosti proizvođačima hrane. Primjerice, aroma limuna u obliku mikro kapsula pokazuje poboljšanu stabilnost prema oksidaciji, hlapljenju i svjetlosti, kontrolirano je otpuštanje arome u prehrambeni proizvod, dobivene mikro kapsulice manje su sklone stvaranju grudica tijekom skladištenja te samim time imaju i duži rok trajanja (Shahidi i Han, 1993).

Tvari za regulaciju pH koje nisu u obliku mikro kapsula mogu dovesti do reakcije sa sastojcima hrane te promjene okusa, mirisa, izgleda ili teksture gotovog proizvoda. Takve se tvari uglavnom oblažu tankim slojem omotača koji se otapa ili tali pri određenim temperaturama i time omogućuje kontrolirano ispuštanje djelatne tvari. Omotač sprječava oksidaciju hrane koja je u dodiru s tvari za regulaciju pH, smanjuje higroskopsnost i poboljšava svojstva tečenja. Primjeri tvari koje reguliraju pH u obliku mikro kapsula su adipinska, askorbinska, limunska, fumarna i mliječna kiselina (Shahidi i Han, 1993).

Enzimima se oblaganjem omogućava zadržavanje aktivnosti kroz duže vrijeme, ponajprije zbog zaštitnog omotača koji onemogućava prolaz iona, protona i slobodnih radikala koji smanjuju njihovu aktivnost. Umjetna sladila često su izložena utjecajima vlage i temperature koji se također eliminiraju oblaganjem. U slučaju sladila oblaganje smanjuje higroskopsnost, poboljšava svojstva tečenja i omogućuje sladilu da duže vrijeme zadrži sladak okus. Od tvari za rahljenje najčešće se oblažu čestice natrijevog bikarbonata koje tijestima daju volumen i poboljšavaju teksturu (Shahidi i Han, 1993).

Prirodna bojila, primjerice β – karoten, poznata su kao prahovi sa česticama vrlo malih promjera koji prilikom transporta ili miješanja stvaraju mnogo prašine. Oblaganjem nastaju čestice većeg promjera koje su lakše za rukovanje, ne praše se, pokazuju bolju topljivost, stabilnost prema oksidaciji te se lakše umješavaju s drugim tvarima u procesu suhog miješanja. Osim toga, vijek trajanja obloženih čestica iznosi 2 godine, za razliku od neobloženog oblika čiji je vijek trajanja 6 mjeseci. Slične učinke oblaganje ima i na vitamine i minerale – veća stabilnost, poboljšana svojstva tečenja i sprječavanje stvaranja prašine u procesu suhog miješanja (Onwulata, 2005).

Također postoje i brojni patenti vezani uz oblaganje čestica u prehrambenoj industriji. Tvrtka International Flavours and Fragrances (IFF) patentirala je mješavinu polietilena i polietilen glikola kao omotača za oblaganje arome jagode u žvakačoj gumi. Tvrtka Wm Wrigley Jr Co patentirala je proces oblaganja umjetnih sladila s voštanim omotačem te miješanje takvog inkapsuliranog oblika sladila s tekućom jezgrom žvakaće gume. S obzirom da je umjetno sladilo aspartam osjetljivo na visoke temperature, razvijene su metode oblaganja etil- ili metil- celulozom, mješavinom lecitina, masnih kiselina, voskova, glicerida i sredstava protiv pjenjenja. Nabisco Brands patentirao je mikro kapsule liposoma koje se dodaju tijestu tijekom miješanja, ostaju netaknute tijekom fermentacije, ali se na određenoj temperaturi tijekom pečenja raspadaju i daju tijestu volumen i teksturu (Gibbs i sur., 1999).

6. Pozitivne i negativne strane oblaganja čestica i budući razvoj

Oblaganje, bilo da se radi o oblaganju bez upotrebe otapala, s upotrebom otapala ili elektrostatskom oblaganju karakteriziraju i pozitivne i negativne strane. Većina istraživanja rađena je na području primjene oblaganja u farmaceutskoj industriji, s vrlo malo rezultata vezanih za prehrambene prahove. Problem predstavlja biološko podrijetlo prehrambenih prahova i njihov raznoliki sastav i svojstva, što ih čini uvelike drugačijim od farmaceutskih prahova koji moraju biti točno definiranog sastava. Parametri procesa (omjer volumena čestice/zrak, stupanj raspršivanja otapala) optimiran je za primjenu u farmaceutskoj industriji, ali se isti parametri ne mogu primjeniti u prehrambenoj industriji jer nisu ekonomski isplativi. Većina literaturnih podataka vezana je uz istraživanja u laboratorijskom mjerilu, strogo je specifična za tip primjenjene aparature i često se ne može primjeniti u industrijskom mjerilu. Struktura omotača promatrana pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije ukazuje na važnost uvjeta pri kojima se provodi proces na kvalitetu omotača. Kako je naprijed spomenuto, neki procesi oblaganja ne omogućuju dobru kontrolu procesnih parametara, a samim je time teško predvidjeti kvalitetu i strukturu konačnog proizvoda. Tijekom oblaganja u fluidiziranom sloju javlja se ozbiljan problem neželjene aglomeracije kod čestica manjih od 100 μm . Za rješavanje problema primjenjuju se dva pristupa: fizikalni koji povećava silu koja razdvaja čestice te kemijski koji pogoduje što bržem povezivanju čestica jezgre i omotača, prije nego čestice omotača stignu stvoriti aglomerate.

Da bi se bolje predvidjela svojstva i struktura obloženih čestica, bitno je razviti matematičke modele s pristupom na mikroskopskoj razini. Takvi bi dali rezultate neovisne o tipu uređaja koji se koristi i time bitno olakšali optimiranje procesa u industrijskom mjerilu (Werner i sur., 2007a). Na mikroskopskoj razini Werner i suradnici proces oblaganja podijelili su na 10 faza: kretanje čestica, raspršivanje, sudar čestica/otapalo, adhezija kapljice otapala koja sadrži oblagajuće čestice sa česticom jezgre, širenje kapljice, infiltracija, sušenje, formiranje filma, formiranje slojeva i aglomeracija. Od svih ovih faza sušenje, širenje kapljica, sudari kapljica i aglomeracija definirane su kao 4 ključna faktora čije poznavanje predstavlja ključ u razvoju novih proizvoda i procesa oblaganja. Međutim, istraživanja na mikroskopskoj razini još nisu u potpunosti dovršena (Werner i sur., 2007b).

Podatci o ekonomičnosti samog procesa oblaganja u prehrambenoj industriji nisu poznati ponajprije zbog činjenice da većinu primjenjenih metoda proizvođači drže u tajnosti. Tijekom razvoja tehnologije oblaganja postalo je vidljivo da inkapsulirani sastojci uvelike povećavaju troškove proizvodnje i cijenu gotovog proizvoda, tako da je sama primjena uzimana sa dosta rezerve među prehrambenim tehnologizima. Poznato je da oblaganje udvostručuje cijenu proizvoda. Međutim, pri izračunu isplativosti mora se uzeti u obzir veća produktivnost procesa, bolja iskorištenja, produljeni vijek trajanja namirnice i bolja kvaliteta i konzistentnost gotovog proizvoda. Također, s razvojem novih metoda oblaganja čestica proizvodni se kapaciteti povećavaju uz smanjenje troškova proizvodnje i cijene konačnog proizvoda (Spooner, 1994).

7. Literatura

- Alonso, M., Alguacil, F.J. (2001): Stochastic modeling of particle coating, *AIChE Journal*, br. 47, str. 1303 – 1308.
- Arshady, R. (1993): Microcapsules for food, *Journal of Microencapsulation*, br. 10, str. 413-435.
- Bailey, A.G. (1998): The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating, *Journal of Electrostatics*, br. 45 (2), str. 85-120.
- Barbosa-Canovas, G., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H. (2005) *Food Powders. Physical Properties, Processing and Functionality*. Kluwer Academic/Plenum publishers, New York, USA.
- De Pauw, P., Dewettinck, K., Arnaut, F. and Huyghebaert, A. (1996): Microencapsulation improves the action of bakery ingredients, *Voedingsmiddelentechnologie*, br. 29, str. 38-40.
- Dewettinck, K., Huyghebaert, A. (1999): Fluidized bed coating in food technology, *Trends in Food Science and Technology*, br. 10, str. 163 – 168.
- Dewettinck, K., Messens, W., Deroo, L., Huyghebaert, A. (1999): Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gelatin and starch hydrolysate, *LWT – Food Science and Technology*, br. 32, str. 102-106.
- Dewettinck, K., Deroo, L., Messens, W., Huyghebaert, A. (1998): Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gums. *LWT – Food Science and Technology*, br. 31, str. 576-584.
- Dezarn, T.J. (1995) Food ingredient encapsulation. U: Risch, S.J., Reineccius, G.A. (ed): *Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients*, str. 74-86, American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Eichler, K. (1989) *Principles of fluid-bed processing*, Glatt GmbH, Binzen, Germany
- Eichler, K. (1989) *Process selection*, Glatt GmbH, Binzen, Germany
- Gibbs, B.F., Kermasha, S., Alli, I., Mulligan, C.N. (1999): Encapsulation in the food industry: a review, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, br. 50, str. 213 – 224.
- Jones, D.M. (1985): Factors to consider in fluid-bed processing, *Pharmaceutical Technology*, br. 9, str. 50-62.
- Jones, D.M. (1988) Controlling particle size and release properties. U: Risch, S.J., Reineccius, G.A. (ed): *Flavor Encapsulation*, str. 158-175, American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Jozwiakowski, M.J., Reanz, R.M., Jones, D.M. (1990): Characterization of hot – melt fluid bed coating process for fine granules, *Pharmaceutical Research*, br. 7 (11), str. 3-10.
- Kailasapathy, K. (2002) : Microencapsulation of Probiotic Bacteria: Technology and Potential Applications, *Current Issues in Intestinal Microbiology*, br. 3, str. 29 – 48.
- Karel, M., Langer, R. (1988) Controlled release of food ingredients. U: Reineccius, G.A.,
- Risch, S.J. (ed): *Flavor Encapsulation*, str. 177-191, American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Kim, B.K., Lee, J.S., Lee, C.H., Park, D.J. (2008): Preparation of low-fat frying batter composite by dry particle coating of microparticulated soybean hull, *LWT – Food Science and Technology*, br 41, str. 34 – 41.



- King, A.H. (1995) Encapsulation of food ingredients. A review of available technology, focusing on hydrocolloids. U: Risch, S.J.; Reineccius, G.A. (ed): Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients, str. 26–37, American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Maa, Y.F., Nguyen, P.A., Hsu, C.C. (1996): Spray coating of rhDNase on lactose: effect of system design, operational parameters and protein formulation, *International Journal of Pharmaceutics*, br. 144, str. 47–59.
- Mehta, A.M., Jones, D.M. (1985): Coated pellets under the microscope, *Pharmaceutical Technology*, br. 9, str. 52-60.
- Obara, S., Maruyama, N., Nishiyama, Y., Kokubo, H. (1999): Dry coating: an innovative enteric coating method using a cellulose derivative, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, br. 47, str. 51 – 59.
- Onwulata, C. (2005a) Milk Fat Powders Encapsulated in Sugars and Starches. U: Onwulata, C. (ed): Encapsulated and powdered foods, str. 495 – 505, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Onwulata, C. (2005b) Single- and Double Encapsulated Butter Oil Powders. U: Onwulata, C. (ed): Encapsulated and powdered foods, str. 485 - 494, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Pfeffer, R., Dave, R.N., Wei, D., Ramlakhan, M. (2001): Synthesis of engineered particulates with tailored properties using dry particle coating, *Powder Technology*, br. 117, str. 40 – 67.
- Ratanatriwong, P., Barringer, S. (2007): Particle size, cohesiveness and charging effects on electrostatic and nonelectrostatic powder coating, *Journal of Electrostatics*, br. 65, str. 704 – 708.
- Saleh, K., Steinmetz, D., Hemati, M. (2003): Experimental study and modelling of fluidized bed coating and agglomeration, *Powder Technology*, br. 130, str. 116 – 123.
- Setyo, D., Barringer, S. (2007): Effect of hydrogen ion concentration and electrostatic polarity on food powder coating transfer efficiency and adhesion, *Journal of Food Science*, br. 72 (6), str. 359 – 361.
- Shilton, N.C., Niranjana, K. (1993): Fluidization and its applications to food processing, *Food Structure*, br. 12, str. 199-215.
- Spooner, T.F. (1994): Encapsulation worth looking into, but check out economics, *Milling and Baking News*, April, str. 50 – 51.
- Sumawi, H., Barringer, S.A. (2005): Positive vs. negative electrostatic coating using food powders, *Journal of Electrostatics*, br. 63, str. 815 – 821.
- Teunou, E., Poncelet, D. (2002): Batch and continuous fluid bed coating – review and state of art, *Journal of Food Engineering*, br. 53, str. 325 – 340.
- Teunou, E., Poncelet, D. (2005a) Dry coating. U: Onwulata, C. (ed): Encapsulated and powdered foods, str. 179 – 195, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Teunou, E., Poncelet, D. (2005a) Fluid bed coating. U: Onwulata, C. (ed): Encapsulated and powdered foods, str. 197 – 212, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Thiel, W.J., Nguyen, L.T. (1984): Fluidized bed film coating of an ordered powder mixture to produce microencapsulated ordered units, *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, br. 36, str. 145 – 152.
- Turton, R., Tardos, G.I., Ennis, B.J. (1999): Fluidized bed coating and granulation. U: Yang, W.C. (ed): Fluidization, Solids Handling and Processing, str. 331 – 434, Noyes Publications, Westwood, USA.
- Werner, S.R.L., Jones, J.R., Paterson, A.H.J., Archer, R.H., Pearce, D.L. (2007a): Air – suspension particle coating in the food industry: Part 1 – State of the art, *Powder Technology*, br. 171, str. 25 – 33.
- Werner, S.R.L., Jones, J.R., Paterson, A.H.J., Archer, R.H., Pearce, D.L. (2007b): Air – suspension particle coating in the food industry: Part 2 – micro-level process approach, *Powder Technology*, br. 171, str. 34 – 45.
- Wesdyk, R., Joshi, Y.M., De Vincentis, J., Newman, A.W., Jain, N.N. (1993): Factors affecting differences in film thickness of beads coated in fluidized bed units, *International Journal of Pharmaceutics*, br. 93, str. 101 – 109.
- Yang, J., Silva, A., Banerjee, A., Dave, R.N., Pfeffer, R. (2005): Dry particle coating for improving the flowability of cohesive powders, *Powder technology* br. 158, str. 21 – 33.

Autori/Authors

Maja Benković, dipl.ing.

University of Zagreb

Faculty of Food Technology and Biotechnology

Pierottijeva 6

10 000 Zagreb

prof. dr.sc. Ingrid Bauman¹

University of Zagreb

Faculty of Food Technology and Biotechnology

Pierottijeva 6

10 000 Zagreb