

Afslutningsrapport

Antibiofouling nanostrukturerede overflader
til slagteri- og mejerisektoren

Mejeribrugets ForskningsFond

Rapport nr. 2008-93

Juli 2008



mejeriforeningen

danish dairy board

Slutrapport for samarbejdsprojektet:

Anti-biofouling nanostrukturerede overflader til slagteri- og mejerisektoren

Projektperiode: 1/1/2006 - 31/12/2007

Finansiering fra Mejeribrugets ForskningsFond og Svineafgiftsfonden.

Projektleder:

Prof., Dr. Scient. Flemming Besenbacher
Interdisciplinært Nanoscience Center (iNANO)
Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet
Ny Munkegade, bygning 1520
8000 Aarhus C

Tlf.: 8942 3604

Fax: 8612 0740

E-mail: fbe@inano.dk

Øvrige medarbejdere:

Ved iNANO

Ph.d. Saju Pillai, Interdisciplinært Nanoscience Center, Aarhus Universitet, Ny Munkegade, bygning 1521, 8000 Aarhus C.

Ph.d. Xingfei Zhou, Interdisciplinært Nanoscience Center, Aarhus Universitet, Ny Munkegade, bygning 1521, 8000 Aarhus C.

Ph.d. Mingdong Dong, Interdisciplinært Nanoscience Center, Aarhus Universitet, Ny Munkegade, bygning 1521, 8000 Aarhus C.

Videnskabelig assistent Anders Iversen, Aarhus Universitet, Afdeling for Mikrobiologi, Biologisk Institut, Ny Munkegade, Bygning 1540, 8000 Aarhus C.

Videnskabelig assistent Jean-Francois Poulin, Aarhus Universitet, Afdeling for Mikrobiologi, Biologisk Institut, Ny Munkegade, Bygning 1540, 8000 Aarhus C.

Tilknyttet men ikke ansat på projektet:

Ph.d. Rikke L. Meyer (Steno-stipendiat), Aarhus Universitet, Afdeling for Mikrobiologi, Biologisk Institut, Ny Munkegade, Bygning 1540, 8000 Aarhus C.

Ph.d.-studerende Lone Tang, Aarhus Universitet, Afdeling for Mikrobiologi, Biologisk Institut, Ny Munkegade, Bygning 1540, 8000 Aarhus C.

Ved Teknologisk Institut

Ph.d. Claus Bischoff, Center for Materialeprøvning, Teknologisk Institut, Kongsvang Allé 29, 8000 Aarhus C.

Ph.d. Helmer Søhoel, Center for Materialeprøvning, Teknologisk Institut, Kongsvang Allé 29, 8000 Aarhus C.

Civ. Ing. Ph.d. Thomas Zwieg, Center for Materialeprøvning, Teknologisk Institut, Kongsvang Allé 29, 8000 Aarhus C.

Sammendrag

Bakterier, som hæfter til og danner biofilm på overfladen af produktionsudstyr, udgør en vigtig kontamineringsrisiko under produktion og forarbejdning af fødevarer. Bakterier i biofilm er beskyttet mod biocider og er derfor vanskelige at bekæmpe. Det er således lettere at holde overflader rene, hvis man kan forhindre det første trin i biofilmdannelsen – vedhæftning af bakterier til overfladen.

Formålet med dette projekt var at udvikle og karakterisere sol-gel-belægninger med overlegne hygiejniske egenskaber. Dette kan opnås ved at designe en overflade som 1) minimerer bakteriers evne til at hæfte sig fast, 2) slår bakterier ihjel som kommer i kontakt med overfladen, eller 3) minimerer bindingsstyrken af de fasthæftede bakterier, så de let kan fjernes under rengøring.

Vi valgte at arbejde med en glaskeramisk overfladebelægning, som ikke indeholder kemiske forbindelser, der forventes at kunne spænde ben for en senere FDA-godkendelse. Den glaskeramiske overfladebelægning er afledt ved en sol-gel-proces ('sol' er en forkortelse for solution og 'gel' for gelling, to vigtige trin i metoden, hvorved der opnås glaskeramik ud fra flydende reagenser, og ikke som konventionelt ud fra sammenblanding af faste materialer). Teknisk er belægningen et to-komponent system, formuleret ud fra hydrolyseret glycidoxypropyltrimethoxysilan og propyltrimethoxysilan og afhærdet med aminopropyltrimethoxysilan. Sol-gel-belægningen blev funktionaliseret ved at tilføje additiver, som gjorde overfladen mere hydrofob eller hydrofil, og ved at indlejre kovalentbundne nanopartikler af sølv, kobber, eller zinkoxid. Belægningen havde en ruhed (Ra) på under 1 nm, hvilket var en dramatisk reduktion i forhold til ruheden for 2B 316 rustfrit stål, som hyppigt anvendes i fødevarerproduktion. Ruheden viste sig – ikke overraskende – at have en markant effekt på bakteriers evne til at hæfte sig og danne biofilm på overfladerne. Antallet af vedhæftede bakterier på den ikke-funktionaliserede sol-gel var ca. 1/10 i forhold til 2B rustfrit stål. Funktionalisering af overfladerne med hydrofobe additiver havde ingen effekt, men indlejring af nanopartikler reducerede antallet af vedhæftede bakterier yderligere 100 gange. Blandt nanopartiklerne havde zinkoxid den største effekt, hvorimod sølv havde næsten ingen effekt.

Vi tilpassede endvidere en ny type sol-gel, som tillader hærdning ved stuetemperatur, således at den kan påføres produktionsudstyr, som ikke kan inkuberes ved høj temperatur. Sol-gel-belægningen kan sammenlignes med den ovenfor nævnte, men bl.a. indlejret med partikler der tildeler forbedrede slidegenskaber og krydsbinding. De biofilmhæmmende egenskaber af den ny belægning var sammenlignelige med den ikke-funktionaliserede udgave af den ovenfor beskrevne sol-gel. Den biofilmhæmmende effekt var dog mere udtalt for bakterier fra svinekød end for bakterier fra mælk. Det var desværre ikke muligt at opnå yderligere antibakteriel effekt ved indlejring af nanopartikler, og anvendelse af denne belægning som en effektiv biofilmhæmmende overflade vil kræve yderligere udvikling og funktionalisering.

Sol-gelen havde gode rengøringsegenskaber, og ved rengøring med en modificeret CIP-protokol opnåede vi den samme rengøringseffektivitet på sol-gel rengjort ved 50 °C, som på 2B rustfrit stål rengjort ved 90 °C.

Overordnet kan det altså konkluderes, at sol-gel-afledte glaskeramiske belægninger har egenskaber, der signifikant mindsker de indledende trin af biofilmopbygningen. De biofilmhæmmende egenskaber skyldes ikke mindst en stor reduktion af overfladeruheden, men inklusion af nanopartikler med biofilmhæmmende egenskaber er også medvirkende til at mindske den bakterielle bevoksning. Et yderligere udviklingsarbejde forestår dog endnu, førend kommercielt tilgængelige biofilmhæmmende, glaskeramiske belægningssystemer til fødevarerindustrien bliver en realitet.

Summary

Bacteria that attach and form biofilm on surfaces of process equipment constitute an important risk for contamination of food products during production and processing. Bacteria in biofilm are protected from biocides and are therefore difficult to eliminate. It is therefore easier to keep surfaces clean, if the first step in biofilm formation can be prevented, i.e. the attachment of bacteria to the surface.

The purpose of this project was to develop and characterise sol-gel coatings with superior hygienic properties. This can be achieved by designing a surface which 1) minimises the ability of bacteria to attach to it, 2) kills bacteria that come into contact with it, or 3) minimises the adhesion strength of attached bacteria, so that they are easily removed during cleaning.

We chose to work with a ceramic coating, which does not contain compounds that are likely to hinder FDA approval at a later stage. The ceramic coating was derived from a sol-gel process ("sol" being short for solution and "gel" for gelation – the two important steps in the method by which a ceramic coating can be made from solutions, rather than solids). Technically, the coating is a two-component system, formulated from a hydrolysed gycidoxypropyltrimethoxysilan and propyltrimethoxysila and hardened with aminopromyltrimethoxysilan. The sol-gel coating was functionalised by using additives that made the surface more hydrophobic or more hydrophilic, or by incorporating covalently bound nanoparticles of silver, copper or zink oxide.

The coating had an average roughness (Ra) of less than 1 nm, which was a dramatic reduction of the surface roughness compared to 2B 316 stainless steel, which is commonly used in food production. Not surprisingly, the roughness had a substantial effect on biofilm formation on the surfaces. The number of adhered bacteria on the non-functionalised sol-gel was approximately 1/10 compared to 2B stainless steel. Functionalisation of the surfaces with hydrophobic additives had no effect on bacterial adhesion, but incorporation of nanoparticles further reduced the number of adhered bacteria by two orders of magnitude. Among the nanoparticles, zink oxide was most effective, while silver had almost no effect.

We adapted a new type of sol-gel coating, which allows hardening at room temperature, so that it can be applied to process equipment that cannot be incubated at high temperature. This sol-gel coating was comparable to the coating mentioned above, but incorporation of nanoparticles gave it better cross coupling and rendered it more wear resistant. The biofilm-inhibiting properties of the new coating were comparable to the non-functionalised version of the sol-gel described above. The effect was, however, more pronounced for bacteria from pork compared to bacteria from milk. Unfortunately it was not possible to enhance the biofilm-inhibiting properties by incorporation of metal nanoparticles, and application of this coating to efficiently reduce biofilm formation would thus require further development and functionalisation.

The sol-gel coating had good cleaning properties, as the same cleaning efficiency could be obtained for sol-gel coatings cleaned at 50°C as compared to 2B stainless steel cleaned at 90°C.

We conclude that the sol-gel derived ceramic coatings have properties that significantly reduce the initial step in biofilm formation. The biofilm-inhibiting properties are to some extent caused by a substantial reduction in the roughness of coated surfaces. However, incorporation of antibacterial nanoparticles also contributed to a significant reduction in biofilm formation. Further development of coating systems lies ahead before biofilm-inhibiting ceramic coatings for the food industry become a commercial product.

Baggrund og mål

God hygiejne under produktion og forarbejdning af fødevarer er essentielt for varernes kvalitet og forbrugernes sikkerhed. Under forarbejdning af kød, mælk, og andre fødevarer kommer disse i kontakt med overflader på maskiner, transportbånd, rør, varmevekslere og andet. Få fødevarer er sterile, og bakterier fra fødevarerne og omgivelserne afsættes på disse overflader. Det er således vigtigt at holde overfladerne rene for at mindske krydskontaminering med patogene bakterier mellem kontaminerede og ikke-kontaminerede fødevarer og for at mindske overførslen af bakterier til ferske fødevarer generelt.

Bakterier, som findes på disse overflader, afsættes ikke tilfældigt. Mange bakterier er i stand til aktivt at hæfte sig fast til en overflade. Her danner de komplekse biofilm bestående af forskellige arter af bakterier indkapslet i en matrix af polysaccharider, proteiner og andre biopolymerer. Det er langt vanskeligere at bekæmpe bakterier i en biofilm sammenlignet med fritlevende bakterier i en væske. Biofilmens matrix beskytter cellerne mod ydre påvirkninger, og cellerne i biofilmen ændrer fysiologi, så de bliver mere robuste over for fx biocider. Udvikling af modificerede overflader, som minimerer bakteriers evne til at hæfte sig fast, kan derfor bidrage til at øge fødevarerens sikkerhed. Produktionsomkostningerne kan endvidere reduceres, hvis intervallet mellem rengøringer kan forlænges og rengøringstiden forkortes, eller hvis forbruget af varmt vand og kemikalier til rengøring kan sænkes.

Formålet med dette projekt var at udvikle og karakterisere sol-gel belægninger, som har bedre hygiejniske egenskaber end den type rustfrit stål, som hyppigst anvendes i mejeri- og slagterisektorerne. Sol-gel-teknologi bruges til at skabe en robust keramisk belægning, hvor overfladens nanostruktur og kemiske egenskaber kan reguleres nøje. Belægningen er mere robust end traditionelle lakker og adskiller sig fra traditionelle keramiske belægninger, ved at den hærder ved lavere temperaturer. Vi har i projektet udviklet og funktionaliseret sol-gel-belægninger ved indlejring af antibakterielle nanopartikler. Der har været fokus på at udvikle en ny type sol-gel med høj slidstyrke, som hærder ved stuetemperatur. Dette vil muliggøre anvendelse på produktionsudstyr som ikke kan varmes op under hærdeningen.

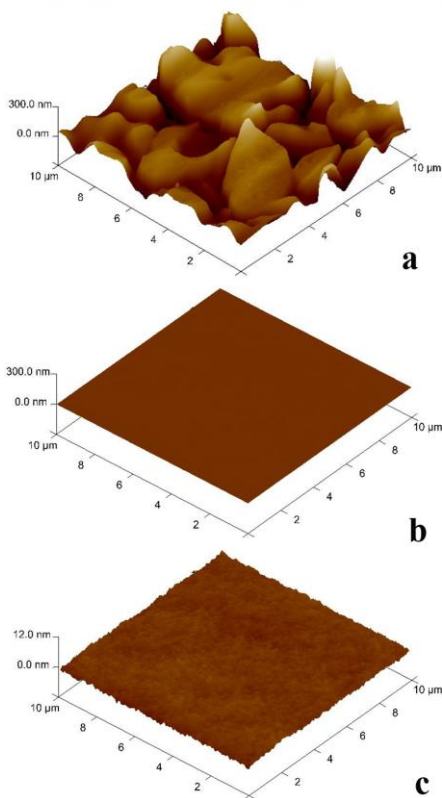
Ved brug af nanoteknologiske værktøjer har vi karakteriseret belægningernes overfladestruktur og -kemi, samt adsorption af biomolekyler og vedhæftning af bakterier til overfladerne. De bakterier som skaber problemer med biofilm i hhv. mejeri og slagterisektoren er vidt forskellige. Vi har derfor evalueret vedhæftningen af bakterier fra både mælk og svinekød, samt foretaget en detaljeret sammenligning af hvilke bakterier fra svinekød, som er ansvarlige for biofilmdannelse på hhv. rustfrie ståloverflader og sol-gel-belægninger.

Resultater og konklusioner

Karakterisering af sol-gel-belægninger med variabel hydrofobicitet

Med udgangspunkt i allerede udviklede sol-gel-systemer, karakteriserede vi en sol-gel-belægning ("SG-A"), som blev udvalgt på baggrund af dens kemiske sammensætning, idet vi forventede, at den vil kunne godkendes til brug på overflader, som kommer i kontakt med fødevarer. Sol-gelen blev modificeret med additiver, som enten gjorde overfladen mere hydrofob eller mere hydrofil. De modificerede belægninger havde således en vand-kontaktvinkel varierende mellem 75 og 101°.

Bakteriel adhæsion til denne overflade blev udelukkende undersøgt for bakterier, som er relevante for slagteribranchen. Vi anvendte en modelorganisme, *Pseudomonas fluorescens*, og en blandingskultur af bakterier dyrket fra hakket svinekød. Vi kvantificerede mængden af vedhæftede bakterier efter inkubation i 1 time og i 16-24 timer, og fandt en generel tendens til, at der var 10 gange så mange bakterier på 2B rustfrit stål sammenlignet med de sol-gel-belagte overflader.



Figur 1. AFM billede af 2B rustfrit stål (a) og sol-gel (b og c). I (c) er z-skalaen ændret så overfladens nanostruktur ses.

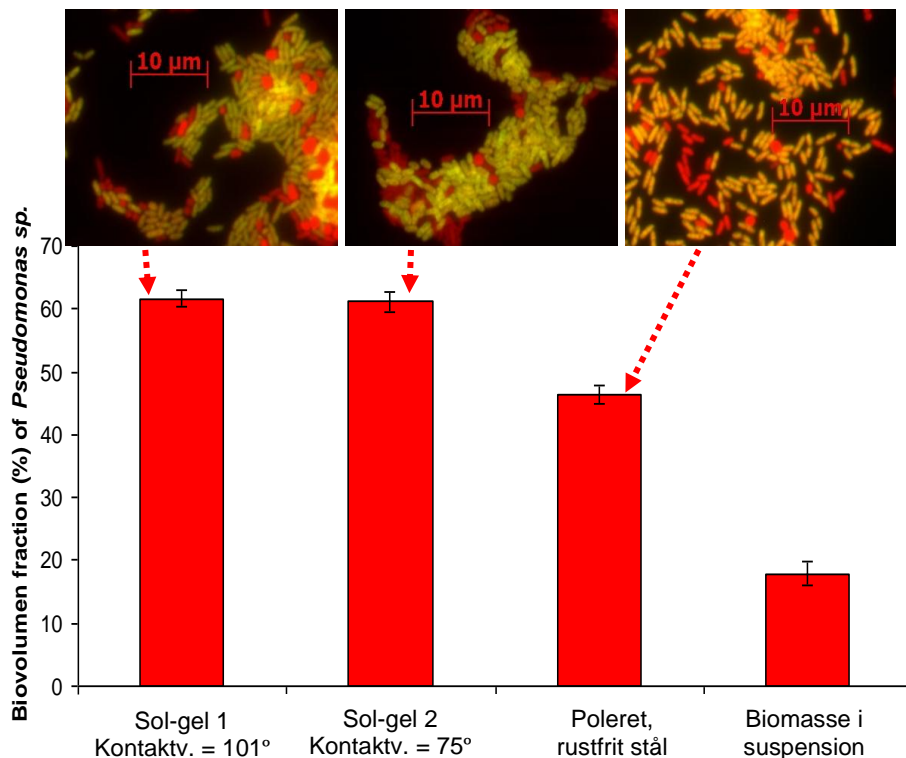
Den store forskel i overfladernes ruhed er formentlig en af årsagerne til den nedsatte biofilmdannelse på sol-gel-belægningerne. Det er velkendt, at flere bakterier hæfter sig til ru overflader i forhold til glatte. Belægning af overflader med sol-gel reducerede den gennemsnitlige overfladeruheid (Ra) fra 300 nm for 2B rustfrit stål til 0,3 nanometer for sol-gel (Figur 1). Dette var endnu lavere end hvad kunne opnås ved polering af stål, som gav en ruheid på 6 nm. Vi fandt dog ingen forskel på antallet af vedhæftede bakterier på poleret stål og sol-gel, til trods for at ruheden for poleret stål var 20 gang højere end for sol-gel. Sandsynligvis skyldes dette, at det polerede ståls ruheid i forvejen var så lav, at en yderligere reduktion ikke havde nogen effekt.

Kvantificering af proteinadsorption til overfladerne ved brug af quartz crystal microbalance (QCM) viste, at kun halvt så meget protein fra bovint serum adsorberede til sol-gel sammenlignet med poleret stål. Der var dog ingen forskel på proteinadsorption blandt sol-gel-overfladerne med variabel hydrofobicitet. Proteiner og andre organiske molekyler adsorberer til en overflade inden bakterier hæfter til den, og det adsorberede lag kan dermed potentielt påvirke bakteriers evne til at hæfte sig fast. Til trods for den store forskel i mængden af adsorberet protein, fandt vi som nævnt ingen forskel i antallet af bakterier hæftet til sol-gel og elektropoleret stål. Tykkelsen af det adsorberede proteinlag havde således ingen umiddelbar effekt på bakteriel adhæsion i dette tilfælde.

Hydrofobicitet er tidligere blevet foreslået som en vigtig parameter i forhold til bakteriel vedhæftning, men vores studier viste, at antallet af bakterier, som hæftede til sol-gel-overflader med forskellig hydrofobicitet ikke varierede.

Forskellige bakterier tiltrækkes af forskellige overflader, og for at kunne fortolke resultatet foretog vi en grundig beskrivelse af det mikrobielle samfund, som etablerede sig på overfladerne. Ved brug af fluorescerende *in situ* hybridisering (FISH) så vi, at de mest hyppige bakterier på overfladerne tilhørte slægterne *Pseudomonas* og *Acinetobacter*, og at *Pseudomonas* var overrepræsenteret på overfladerne i forhold til i den suspenderede bakteriekultur (Figur 2).

DNA-analyser viste, at disse slægter også er hyppige på rustfrie ståloverflader i det slagteri, hvor det anvendte svinekød kom fra. Vi kunne dog ikke påvise en signifikant forskel imellem de to slægters hyppighed på sol-gel-belægninger med en kontaktvinkel på hhv. 75 og 101° (for *Pseudomonas*, se Figur 2), og vi konkluderede, at sol-gel-belægningens hydrofobicitet inden for dette interval ikke påvirker hverken mængden eller typen af bakterier fra svinekød, som hæfter til overfladen. Da projektet var delvist finansieret af svineafgiftsfonden, fokuserede denne del af projektet på at karakterisere vedhæftningen bakterier som findes på overflader, der kommer i kontakt med svinekød. Bakterier fra mælkeprodukter er dog væsentligt anderledes, og muligvis vil man se en anden respons på overfladens hydrofobicitet fra disse bakterier.

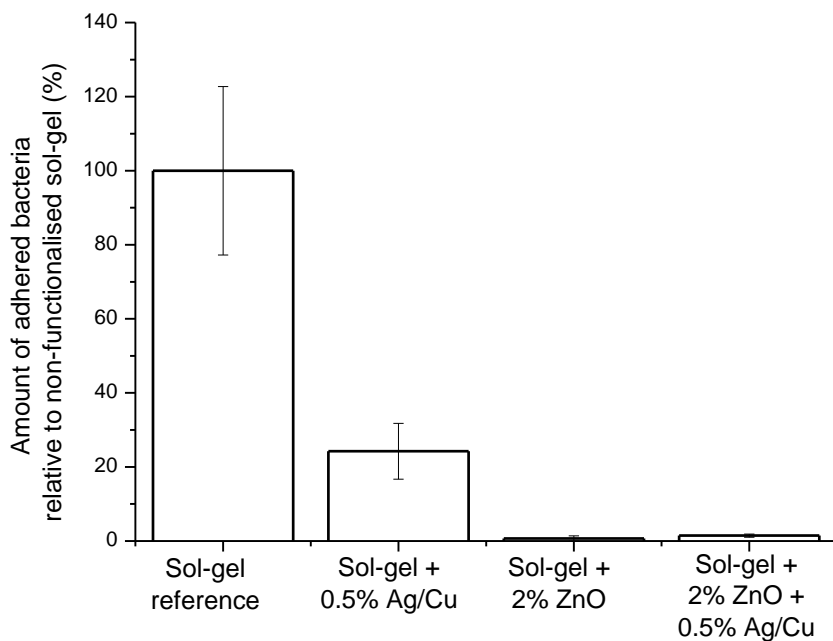


Figur 2. Biomasse-fraktionen af *Pseudomonas sp.* i biofilm på rustfrit stål og sol-gel med variabel hydrofobicitet. Biomasse-fraktionen er bestemt ud fra digital billedanalyse af ca. 50 fluorescensmikroskopibilleder. Et eksempel på de anvendte billeder er vist ovenfor. Her er alle bakterier mærket med rød og *Pseudomonas sp.* er mærket med grøn, hvorved de fremstår gule.

Karakterisering og funktionalisering af sol-gel med nanopartikler

Metalnanopartikler anvendes i dag i en række antibakterielle produkter. Det er muligt at binde metalnanopartikler kovalent til komponenter i sol-gel-belægningen. Dette er interessant i forhold til at minimere risikoen for, at nanopartiklerne vandrer fra belægningen over i fødevarer, som kommer i kontakt med den. Hvis nanopartikler skal kunne anvendes i materialer, der kommer i kontakt med fødevarer, er det afgørende, at partiklerne forbliver i materialet.

Vi indlejrede sølv (Ag), kobber (Cu), og zinkoxid (ZnO)-partikler i den ovenfor beskrevne sol-gel, og undersøgte effekten på vedhæftning af modelorganismen *Pseudomonas fluorescens* samt en blandingskultur af bakterier fra svinekød. Forsøg med modelorganismen og blandingskulturen viste samme resultat: Indlejring af sølv havde lille eller ingen effekt, hvorimod kombination af sølv og kobber førte til en ca. 80 % reduktion i antallet af vedhæftede bakterier sammenlignet med sol-gel uden nanopartikler (Figur 3). Den største effekt kunne dog opnås ved indlejring af 2 % zinkoxid, som førte til en 98 % reduktion i antallet af vedhæftede bakterier. Til sammenligning med mængden af bakterier på 2B rustfrit stål, fandt vi altså ca. 1000 gange færre bakterier på sol-gel med zinkoxid-nanopartikler, hvilket er særdeles lovende i forhold til at forhindre eller mindske biofilmdannelse på overflader i fødevarerproduktion.



Figur 3. Mængden af bakterier som hæfter til overfladen efter 1 times inkubation. Antallet er givet i % af antallet af bakterier hæftet til ikke-funktionaliseret sol-gel i samme inkubation.

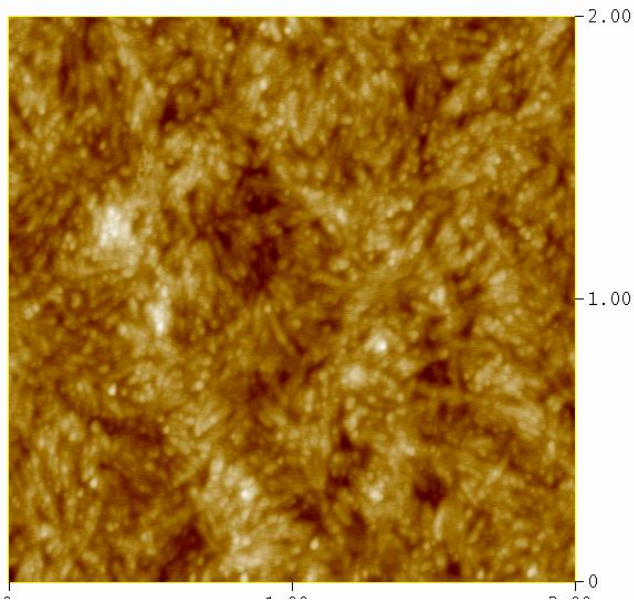
Karakterisering af en ridsefast sol-gel, som hærder ved lav temperatur

En af de største begrænsninger af sol-gelen beskrevet ovenfor er, at den skal opvarmes til 140 °C for at hærde. Dermed er det kun genstande, som er små nok til at blive inkuberet i en ovn, eller som ad anden vej kan opvarmes, der kan behandles med denne belægning. Vi ønskede derfor at anvende en nyudviklet type sol-gel, som kan hærde ved lavere temperaturer uden at gå på kompromis med hårdhed og slidstyrke.

Den nye sol-gel-belægning kan beskrives som en hybrid organisk/uorganisk sol-gel-nanokomposit. Som udgangspunkt er den opbygget analogt til det allerede beskrevne system, men er formuleret som et vandbaseret system og opnår en langt bedre slidstyrke og intern krydsbinding via metaloxid-nanopartikler. I laboratorietest har belægningen vist sig stabil i fire ugers salttågetest, fire ugers UV-test, har udvist rigtig god vedhæftning til en lang række substrater og har basale egenskaber, der gør den god at arbejde med (bearbejdnings tid, thixotropi, m.v.). Desuden hærder denne sol-gel i temperaturintervallet 4-140 °C, foreløbigt dog karakteriseret til optimal slidstyrke fra 70 °C, idet yderligere afhærdninger og slidstyrketest ved temperaturer endnu ikke er foretaget.

Den nye nanokomposit-sol-gel (SG-B) havde en markant anderledes overfladestruktur, som afspejlede belægningens indhold af nanopartikler. Overfladens samlede ruhed var dog ikke mere end 2 nm (se Figur 4).

I lighed med de andre testede sol-gel-belægninger fandt vi, at op til 90 % færre bakterier hæftede sig til sol-gel-belægningen sammenlignet med 2B rustfrit stål. Vi undersøgte adhæsionen for modelorganismen *Pseudomonas fluorescens* samt blandingskulturer dyrket fra svinekød og blandingskulturer dyrket fra mælk. Den biofilmhæmmende effekt viste sig at være mindre udtalt for bakterier fra mælk sammenlignet med bakterier fra svinekød.



Figur 4. AFM-billede af den nye sol-gel-belægning. Overfladens ruhed er 1,7 nanometer

Vi undersøgte, om den biofilmhæmmende effekt var tilstrækkelig til at mindske eller forsinke forsurelse (dvs. kontaminering) af mælk, der kommer i kontakt med overfladen. Det blev gjort ved at følge pH-udviklingen i UHT-mælk, som blev inkuberet med prøver af 2B rustfrit stål med og uden sol-gel. Prøverne havde forinden været inkuberet i pasteuriseret mælk i 30 timer for at "kontaminere" overfladerne.

Desværre var der ingen forskel på udviklingen i pH i UHT-mælk inkuberet med sol-gel-belagte prøver frem for ubelagte prøver. Forsøget giver altså ingen afklaring af, om reduktionen i biofilmdannelse observeret ved mikroskopi er tilstrækkelig til at mindske kontaminering af mælk, som kommer i kontakt med overfladen.

For at forbedre belægningens biofilmhæmmende egenskaber afprøvede vi en række additiver, som skulle gøre belægningens overflade enten mere hydrofob eller mere hydrofil. Ingen af disse additiver havde dog en effekt på belægningens hydrofobicitet, eller bakteriernes evne til at hæfte sig til overfladen. I lighed med de forsøg, som blev lavet på SG-A sol-gel-systemet, indlejrede vi en række forskellige nanopartikler. Heller ikke her fandt vi nogen effekt på mælke-bakteriers evne til at hæfte sig til overfladen.

En mulig forklaring på dette kan være, at belægningen ikke tillader den nødvendige diffusion af metalioner. Det er ioner udskilt fra nanopartiklerne, som interagerer med bakterierne, og disse skal diffundere ud af belægningen for at have en effekt. Det nye sol-gel-system er usædvanligt hårdt og ridsefast, og måske er permeabiliteten af belægningen for lav til at de anvendte additiver kunne have en effekt.

Belægningens rengøringssegenskaber blev også karakteriseret ved at gennemføre et rengøringsforløb efter etablering af biofilm over 16 timer. Belægningen kunne ikke klare kombinationen af høj temperatur (over 60 °C) og 2 % syre eller base. Vi sænkede derfor rengøringstemperaturen til 50 °C. Mikroskopi af overfladerne før og efter rengøring viste, at der procentvist blev fjernet lige så mange bakterier fra sol-gel-overfladerne under rengøring ved 50 °C, som der gjorde fra 2B rustfrit stål rengjort ved 90 °C. Med det nye sol-gel-system er der altså potentiale for at kunne sænke temperaturen under rengøring uden at miste effektivitet.

Publikationer og offentliggørelse

Publikationer i internationale tidsskrifter

Under udarbejdelse:

Meyer, R.L., A. Iversen, S. Pillai, H. Søhoel, C. Bischoff & F. Besenbacher. Functionalisation of ceramic sol-gel coatings for biofilm prevention.

Meyer, R.L., A. Iversen, S. Pillai, C. Bischoff, H. Søhoel, P. Kingshott & F. Besenbacher. Novel sol-gel coating reduce bacterial adhesion to stainless steel.

Tang, L., S. Pillai, A. Iversen, N.P. Revsbech, A. Schramm, C. Bischoff & R.L. Meyer. Bacterial adhesion and biofilm formation on surfaces with variable roughness and hydrophobicity.

Populærvideenskabelige publikationer

- Meyer, R.L., C. Bischoff & F. Besenbacher (2007). Nanoteknologi til udvikling af antibakterielle overflader. *Mælkeritidende*, 12, 280-282.
- Bischoff, C. & Zwiig, T (2007). Overfladebehandling med utallige muligheder. *Teknisk nyt special*, 5A, 16-20.
- Meyer, R. L., C. Bischoff, A. Iversen & F. Besenbacher (submitted). Antibakterielle overflader til fødevareproduktion. *Mælkeritidende*.

Indlæg ved faglige kongresser og symposier

- Meyer, R.L., S. Pillai, C. Bischoff, X. Zhou, M. Dong, L. Tang, T. Zwiig & F. Besenbacher. Development of antibacterial sol-gel surfaces. Poster, iNANO annual meeting, Aarhus, januar 2007.
- Meyer, R.L., A. Iversen, S. Pillai, C. Bischoff, H. Søhoel & F. Besenbacher. Functionalised sol-gel coatings for biofilm prevention. Poster, iNANO annual meeting, Aarhus, januar 2008.
- Tang, L., S. Pillai, A. Iversen, C. Bischoff & R. Meyer. Bacterial attachment to nanostructured surfaces. Poster, iNANO annual meeting, Aarhus, januar 2008. *Modtog posterpris*.
- Tang, L., S. Pillai, A. Iversen, N.P. Revsbech, A. Schramm, C. Bischoff & R.L. Meyer. Bacterial adhesion and biofilm formation on surfaces of variable roughness and hydrophobicity. Poster, Biofilms III, München, oktober 2008.
- Meyer, R.L., A. Iversen, S. Pillai, C. Bischoff & F. Besenbacher. Nanofunctionalised sol-gel surface coatings for biofilm prevention. Mundtlig præsentation, Nanotech Northern Europe, København, september 2008.

Mødeindlæg:

- Meyer, R. L. Nanostructured antifouling surfaces for the meat and dairy industries. Inviteret foredragsholder, Arla Corporate Research Day, oktober 2007

Forskeruddannelse

Saju Pillai, Mingdong Dong, og Xingfei Zhou har været ansat som post docs på projektet. Desuden har Rikke Meyer (finansieret af Forskningsrådet for Natur og Univers) haft tæt tilknytning til arbejdet. Dette er ligeledes tilfældet med ph.d.-studerende Lone Tang (finansieret af AU og iNANO school).

Samarbejdsrelationer

Ud over projektets partnere (Aarhus Universitet og Teknologisk Institut) har Vinnie Helle Rasmussen fra Slagteriernes Forskningsinstitut og Henrik Jørgen Andersen og Annette Baltzer Larsen, Arla Foods deltaget i projektets følgegruppe.

Det primære arbejde med udvikling af nye sol-gel-baserede belægninger har foregået på Teknologisk Institut, hvorimod Aarhus Universitet har haft ansvar for fysisk, kemisk og mikrobiologisk karakterisering af belægningerne sammen med undersøgelse af udvalgte faktoreres indvirkning på bakteriel adhæsion.

Resultaternes praktiske og videnskabelige betydning for mejeribrug, samt hvilke ny problemstillinger projektet har afdækket

Projektet har i et vist omfang afdækket potentialet for sol-gel-belægningers anvendelse i fødevareproduktion. Samtlige forsøg har dog været foretaget i laboratoriet og med forholdsvist korte inkubationer. Det ville være interessant at evaluere sol-gel-belægningernes slidstyrke og

egenskaber mht. til opbygning af organisk materiale på overfladen over længere tid efter gentagne rengøringscykler.

Projektet har været startskuddet til at videreudvikle og teste sol-gel-overflader under industrielle forhold i samarbejde med en udstyrsproducent. I slutningen af 2007 fik iNANO og Teknologisk Institut bevilget 8 mio. kr. fra Det Strategiske Forskningsråd til at fortsætte udviklingen af funktionelle sol-gel-belægninger og teste disse i samarbejde med Arla Foods og Alfa Laval. Dette 3-årige projekt er påbegyndt i januar 2008.

