



Om forfatterne



Jon Tofteskov er ph.d. fra Institut for Naturvidenskab og Miljø, RUC. Han er også kandidatuddannet fra RUC i matematik og fysik. jontoft@ruc.dk



Mari Ann Tørngren er seniorkonsulent ved Danish Meat Research Institute (DMRI), Teknologisk Institut. Hun er specialist i fersk køds kvalitet, pakningsteknologier, farvestabilitet m.m. matn@teknologisk.dk



Mogens Larsen Andersen er professor MSO ved Institut for Fødevarevidenskab, Københavns Universitet. Hans forskningsområde er fysisk og kemisk stabilitet af fødevarer. mola@food.ku.dk



Nicholas Patrick Bailey er lektor i fysik ved Institut for Naturvidenskab og Miljø, RUC, hvor han primært forsker i seje væskers dynamik og glasovergangen. nbailey@ruc.dk



Jesper Schmidt Hansen er professor MSO i integreret naturvidenskab ved Institut for Naturvidenskab og Miljø, RUC, hvor han primært forsker i matematisk modellering og nanovæskers dynamik. jschmidt@ruc.dk

NATURVIDENSKAB I KØDPAKKEN

Hvad foregår der egentlig i en pakke fersk kød, der ligger i køledisken i supermarkedet? Det har forskere nu beskrevet i to matematiske modeller, hvilket kan bidrage til at udvikle mere optimale metoder til at pakke fersk kød.

Ser du på en pakke fersk kød fra dit lokale supermarked, er det faktisk et yderst aktivt, dynamisk system, du betragter – her forløber mikrobiologiske, fysiske og kemiske processer. På varedeklarationen vil du ofte kunne læse, at kødet er pakket i en beskyttende atmosfære. Den beskyttende atmosfære er typisk en gasblanding bestående af ilt, kuldioxid og nitrogen – altså blot gasser, der allerede findes i den luft, vi indånder. Alt afhængig af fødevaren vil blandingsforholdet være forskelligt. For eksempel er frugt pakket i en atmosfære med lavt iltindhold, idet man ønsker at hæmme oxidationsprocesserne, det vil sige de biokemiske reaktioner i frugten, som giver misfarvning og sænker holdbarheden. Man må på den

anden side heller ikke pakke frugten ved for lave iltkoncentrationer, da dette leder til anaerob respiration, og det vil fordærve frugten hurtigt.

I pakning af kød er der andre processer på færde, og en anden strategi benyttes derfor. Fersk kød pakkes ved høje iltkoncentrationer – omkring 60 til 80 % af atmosfæren – da dette giver kødet den ønskede røde farve i hele holdbarhedsperioden. Den røde farve fremkommer ved, at ilten bindes til kødets pigmentstof myoglobin. Ved disse iltforhold vil aerobe iltforbrugende bakterier trives, og for at hæmme bakterievæksten udgøres den resterende atmosfære i pakningen typisk af kuldioxid.

Den optimale fødevarerpakning er

altså betinget af en række biologiske og kemiske processer i fødevarer. Det er et kompliceret system, hvis forståelse involverer en række forskellige fagligheder som biologisk, kemi og fysik. Ved at optimere pakketeknologien vil man øge den tid fødevarerproduktet, i dette tilfælde kød, kan opbevares i butikkerne, og det vil derfor bidrage til at reducere madspild. Hvis kødets mikrobiologiske og kemiske processer kortlægges, vil man på sigt kunne forudsige og delvist kontrollere kvaliteten af kød. Det vil gøre det muligt at designe intelligente fragtkontainere beregnet til eksport af dansk fersk kød til fjerntmarkeder.

Vores forskningsgruppe, bestående af medlemmer fra Roskilde Universitet, Danish Meat Research

Processer i kødpakken

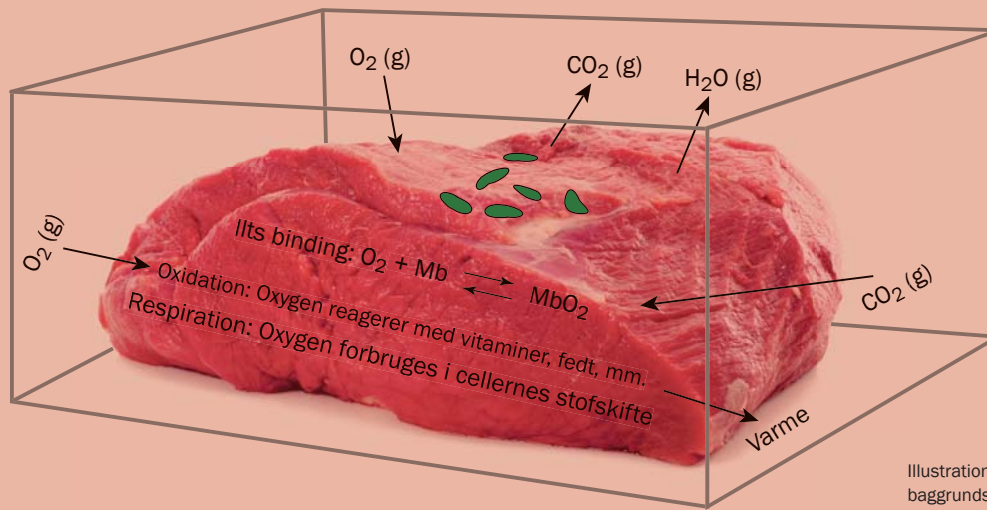
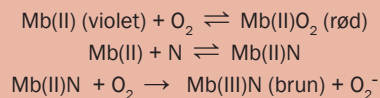


Illustration: AN,
baggrundsfoto:
Colourbox

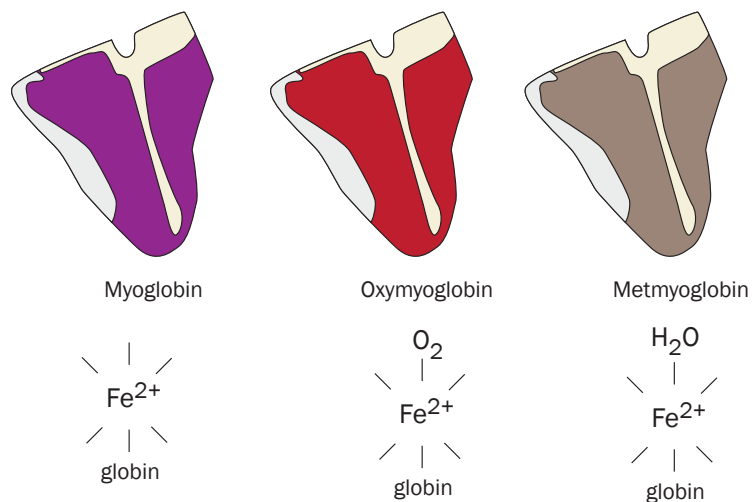
Figuren illustrerer nogle af de mange processer, der foregår på og i kødet efter slagting og pakning. Herhjemme pakkes fersk kød i dag i en beskyttende atmosfære, som består af 20-30 % kuldioxid og 70-80 % ilt. Den høje iltkoncentration giver kødet den røde farve, mens kuldioxid hæmmer bakterievæksten. Bakterierne findes på kødets overflade, og deres vækst er den primære årsag til iltforbruget i den beskyttende atmosfære. Når et dyr slagtes, vil der stadig være aktive stofskifteprocesser i det ferske kød, hvilket også forbruger ilt og producerer kuldioxid, varme og vand. I kødet forekommer også andre processer som oxidation af vitaminer, fedt, strukturproteiner samt myoglobin, som

kontinuerligt vil ændre kødets smag, tekstur og farve. Specielt interessant er her, at myoglobin, Mb(II), kan binde ilt og give kødet dens røde farve. Myoglobinen oxideres også til det gråbrune metmyoglobin, Mb(III). Parenteserne indikerer myoglobins oxidationstrin. Det overordnede reaktionssskema kan skrives som



hvor N er en nukleofil (det vil sige et molekyle, der donerer elektroner til et andet molekyle), muligvis vand, og O_2^- er superoxid.

Institut og Københavns Universitet har netop afsluttet et 3-årigt ph.d.-projekt, hvor den biologiske, kemiske og fysiske viden, der findes på området, er integreret i to matematiske modeller. Den første model beskriver myoglobins forskellige former, det vil sige kødets farve, som funktion af tid og afstand fra kødets overflade. Den anden model beskriver dynamikken af pakkens atmosfære. Projektets formål har ikke være at angive en produktionsopskrift på et design af den optimale pakning, men via modellering at belyse processerne, der er relevante for et sådan design. Projektet er eksemplarisk idet det tydeligt illustrerer, hvordan flere naturvidenskabelige fag skal i spil for at give svar på et konkret spørgsmål.



Uden binding til ilt er myoglobin violet (til venstre). I en iltoldig atmosfære vil kødets myoglobin binde ilt (oxymyoglobin), hvilket giver en rød farve (i midten). Ilden vil endvidere kunne oxidere myoglobinen, og det resulterer i grå-brunt metmyoglobin (til højre). Metmyoglobin er også tydelig, når man tilbereder kød ved stegning eller kogning.

Reaktions-diffusionsligningen

Modelleringen af kødet og gasserne i den beskyttende atmosfære er baseret på den såkaldte reaktions-diffusionsligning. Den beskriver basalt set, at ændring per tid af et kemisk stof i et givet punkt og på et givet tidspunkt er en sum af ændringer på grund af kemiske reaktioner og diffusion. Diffusion forekommer, når der eksisterer koncentrationsforskelle i kødet. Når man benytter reaktions-diffusionsligningen, antager man, at der ikke er væskestrøm i systemet.

Matematisk kan dette skrives som en partiel differentiaalligning. For koncentrationen c_1 i et punkt vil det være

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = f(c_1, c_2, \dots) + \nabla \cdot (D \nabla c_1).$$

Venstre side er altså den afledte af koncentrationen c_1 med hensyn til tiden, det første led på højre side beskriver de kemiske reaktioner, og sidste led diffusionen. I diffusionsleddet indgår den såkaldte 'del'-operator, ∇ , som indeholder de afledte med hensyn til position og D , som er diffusionskoefficienten. Gradienten, $D \nabla c_1$, fortolkes som strømningen (eller fluxen) af stof c_1 , som forekommer på grund af koncentrationsforskelle. Hvis der er samme koncentrationsforskel overalt, er gradienten

konstant, og der vil ikke være nogen ændring i koncentrationen: Stof vil strømme ind i punktet med samme hastighed, som stoffet vil strømme ud. Dette beskrives via divergensen af fluxen, $\nabla \cdot (D \nabla c_1)$, som altså er et mål for, hvor meget stof, der strømmer ind i et punkt i forhold til, hvor meget der strømmer ud. Læg også mærke til, at de kemiske reaktioner kan være afhængige af koncentrationerne af andre kemiske stoffer end blot c_1 .

Vores to modeller består af tre og fire koblede reaktions-diffusionsligninger. Under visse antagelser kan diffusionsleddet i den ene model forenkles og ligningerne er ordinære differentiaalligninger. Da de generelt er ikke-lineære, kan man ikke finde en analytisk løsning. Generelt bruger vi derfor numeriske metoder til at løse dem.

Reaktions-diffusionsligningen benyttes ikke kun i fysisk-kemiske problemstillinger, men er brugt som modeller for sygdomsspredning, i økonomiske systemer og meget andet. Ligningen blev også brugt af matematikeren Allan Turing i 1950'erne, da han fik et gennembrud i forskningen i morfogenese, det vil sige struktur- og mønsterdannelser i biologiske systemer.

Resultaterne præsenteret her i artiklen stammer fra et 3-årigt ph.d.-projekt i vores forskningsgruppe bestående af medlemmer fra Roskilde Universitet, Danish Meat Research Institute (DMRI), og Københavns Universitet. DMRI er en del af Teknologisk Institut og udvikler løsninger til og rådgiver både den nationale og internationale kødindustri. Eksperimenterne i projektet blev foretaget på DMRI. Projektet er blevet støttet af Norma og Frode Jacobsens Fond.

Hvorfor bliver kødet brunt?

I enhver modelleringsproces skal der foretages en systemafgrænsning. I den første model har vi valgt at fokusere på de fysisk-kemiske processer indeni kødet. Iltten vil binde sig til pigmentmolekylet myoglobin i muskelvævet og give den ønskede røde farve. Ilt kan også oxidere myoglobin, hvilket giver kødet en kedelig grå-brun farve, som forbrugerne ikke finder appetitlig. Det interessante her er, at den brune farve ikke starter ved kødets overflade, hvor iltkoncentrationen er højest, men under overfladen, hvor iltkoncentrationen er lav. Dette må nødvendigvis være et ikke-lineært reaktionsfænomen, der er forbundet med diffusion af ilt: Ilt nær kødets overflade bindes til myoglobinen og giver den røde farve, men noget diffunderer videre ind i kødet, hvor iltkoncentrationen så er lavere. Her vil ilt oxidere myoglobinen til den brune farve.

Med ord kan dette matematisk udtrykkes sådan, at i ethvert punkt i kødet vil: (ændring i koncentrationen af et kemisk stof) = (ændring

på grund af kemiske reaktioner) + (ændring på grund af diffusion).

Dette kaldes *reaktions-diffusionsligningen*, og den formuleres matematisk som en såkaldt partiel differentiaalligning (se faktaboks). Reaktions-diffusionsligningen er et specielt tilfælde af massebevarelsesloven. Leddet, der beskriver ændring på grund af kemiske reaktioner, kan være ikke-lineært – det er faktisk tilfældet for de fleste kemiske systemer – og kan beskrive oxidationen af myoglobin ved lave iltkoncentrationer.

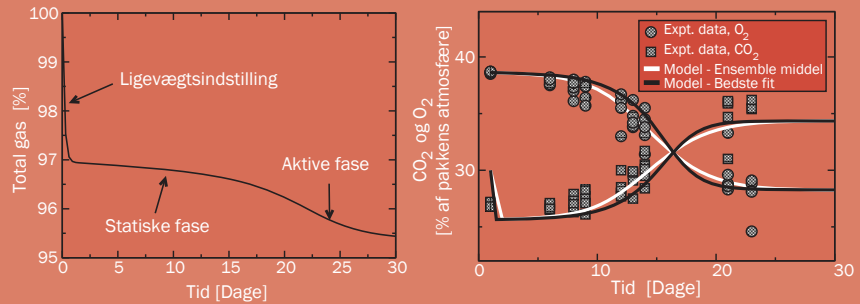
Med hjælp fra litteraturen og gennem revisioner af de eksisterende kemiske modeller har vi nu en fysisk-kemisk-matematisk model, der redegør for, hvordan dannelsen af den uønskede brune farve afhænger af iltkoncentrationen på overfladen af kødet. Det er interessant, at modellen forudsiger, at fortsat respiration i mitokondrierne i kødets celler efter slagtning bestemmer iltforbruget indeni kødet. Det skal derfor inkluderes i den kemiske reaktion, hvis farven skal kunne

bestemmes. Faktisk er myoglobins iltforbrug så lille, at man kan se bort fra det i beskrivelsen af iltens dynamik. Modellen er dynamisk, hvilket betyder at man kan studere systemet, hvis for eksempel iltkoncentrationen ved kødets overflade ændres pludseligt. Det kan ske ved transportskader, hvor der går hul på pakningen eller atmosfæren ændres på anden vis. Endvidere er den mekanisk: Den beskriver de underliggende processer, der er styrende for den dynamiske opførsel.

Hvad sker der i den beskyttende atmosfære?

I den anden model har vi fokuseret på gassernes dynamik, da dette både påvirker mikrobiologien, altså kødets holdbarhed, og kødets farve. Når kødet pakkes og forsegles, kan man med tilnærmelse antage, at kødet og atmosfæren tilsammen udgør et lukket system – dette er dog ikke helt korrekt, da gasserne vil kunne trænge igennem emballagen. Med denne antagelse vil der være to iltforbrugende processer i systemet: bakterievæksten på kødets overflade og bio-kemiske reaktioner

indeni kødet. Begge disse processer skal inkluderes i den matematiske model. Systemet kompliceres yderligere af, at koblingen mellem den beskyttende atmosfære og kødet skal medtages – for eksempel vil bakterievæksten forbruge betydelig mængder af ilt i pakningen, hvilket ændrer overfladebetingelsen på kødet. Dette system har vi igen kunne formulere matematisk via reaktions-diffusionsligningen, og modelparametrene er blevet bestemt ud fra data fra forsøg med svinekød foretaget på Danish Meat Research Institut. Fra modellens resultater kan vi konkludere, at dynamikken i den beskyttende atmosfære er bestemt af to processer, nemlig bakterievæksten og diffusion af kuldioxid ind i kødet. Kuldioxid bliver produceret og ilt forbrugt i takt med, at bakteriekolonien vokser, og da kuldioxid har en høj opløselighed i kødet end ilt, vil mere gas opløses i kødet og den totale gasmængde i den beskyttende atmosfære falde med tiden. Dette fænomen kan du observere i kødpakningen, ved at den gennemsigtige plastik på toppen buer mere og mere ned mod pakkens bund.



Diagrammet til venstre viser sammenligning af eksperimentelle data og modelforudsigelser for koncentrationen af kuldioxid og ilt i den beskyttende atmosfære i pakken. Temperaturen er 5 grader Celsius. Til højre ses de tre faser for gassens dynamik i pakkens beskyttende atmosfære. I den første fase vil kuldioxid opløses i kødet – dette ses også på resultatet til venstre. I anden fase er gasmængden stort set konstant. I den tredje fase efter cirka 15 dage er bakterievæksten høj, hvilket forbruger ilt og producerer kuldioxid. Kuldioxid har en høj opløselighed i kød i forhold til ilt, hvilket medfører at gas forsvinder fra atmosfæren i pakken og ind i kødet. Dette fænomen kan ses i køledisken i supermarkedet, ved at filmen buer ned mod pakkens bund.

Denne model kan også forudsige gassammensætningen på kødets overflade, altså beskrive den korrekte randbetingelse for modellen for kødets farve. På den måde skal begge modeller i spil, når kødets farve skal kunne forudsiges.

Fremtidens pakketeknologi

Når man benytter pakning i beskyttende atmosfære, er det i dag ikke muligt at ændre på gassammensætningen, efter pakken er forseglet, og systemets dynamik er derfor

bestemt af de biologiske, kemiske og fysiske processer, der er i og på kødet. I næste generations pakketeknologi vil det derimod blive muligt løbende at kontrollere atmosfæren i pakken. Det kan ske via specialdesignet film til emballagen eller ved at frigøre ilt løbende til pakkens atmosfære via små kemiske ampuler indeni pakken. Da vores modeller som nævnt er både dynamiske og mekaniske, vil de også kunne bidrage til forståelsen og optimeringen af denne fremtidige pakketeknologi. ■

ASTRONOMI

Ny specialisering på SDU

13,7 mia. år efter Big Bang sker det endelig.

Nu kan du læse Astronomi på SDU og fordybe dig i studier af Universet – fra solsystemet til sorte huller og fra kosmologi til mørkt stof.

Astronomi er en specialisering inden for Fysik. Så vil du være astronom fra SDU, skal du søge ind på bacheloruddannelsen i Fysik og følge kurser inden for Astronomi, Astrofysik og Kosmologi. Du kommer til at arbejde med SDUs helt nye teleskoper og skal på kandidatuddannelsen på studietur til La Palma og benytte et af Europas største teleskoper.

Som studerende bliver du en del af et særdeles dedikeret forskningsmiljø. SDU ligger helt i top inden for fysikforskning i Norden, og vi er

verdensledende inden for forskning i teorier om, hvad universet består af, og hvordan det er opstået. SDUs forskere og astrofysikere Anja Andersen er undervisere på specialiseringen.

Mange karrieremuligheder

Specialiseringen i Astronomi giver dig undervisningskompetence i Astronomi, Fysik og evt. også Matematik i gymnasiet. Du får også karrieremuligheder i robotindustrien, finansverdenen, IT-branchen og andre områder, som arbejder med problemløsning på højt niveau. Eller du kan vælge at blive forsker og være med til at gøre nye spændende opdagelser inden for de mange områder af universet, som stadig er ukendte. Endelig kan du arbejde med vidensformidling.

Læs mere om specialiseringen i Astronomi på sdu.dk/Fysik

SDU

DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET

Ansøgningsfrister: **Kvote 2:** 15. marts · **Kvote 1:** 5. juli