

Martin Gram Christensen
Sammenfatning af ph.d.-afhandling

Formulation and validation of applied engineering equations for heat transfer processes in the food industry



Resumé

Dette studie omhandler konvektiv varmetransmission under produktion af faste fødevarer, med det specifikke fokus at udvikle nye beregningsværktøjer, der kan indbygges i regnearksløsninger. I nogle områder indenfor ”Food Engineering”, såsom produktion af procesudstyr, er brugen af prædikative beregninger, modelleringsaktiviteter og computersimuleringer meget anvendte værktøjer i forbindelse med design og optimering af udstyr. I den fødevarer producerende industri er procesberegninger dog sjældnere anvendt. Selvom beregninger på simple termiske processer ikke er en stor udfordring i forskningsverdenen er situationen noget anderledes i dele af fødevarerindustrien. Udviklingen af nye værktøjer, der kan højne anvendelsen af procesberegninger er dog en akademisk opgave, da de omhyggeligt skal valideres og udbredelsen skal sikres i form af generelle løsningsmetoder. Mens målgruppen for det præsenterede studie som helhed er forskningsverdenen er målgruppen for de udviklede ligninger fødevarerproduktion, fødevarerkontrolmyndigheder og studerende på de fødevarer videnskabelige uddannelser.

Formålet med studiet er at undersøge mulighederne for at udvikle nye analytiske metoder til beregning af opvarmning og nedkøling af faste fødevarer. Det primære mål er at muliggøre simplificering af Fourier’s serie ekspansion [Fo-exp] til Fourier’s ligning til varmetransport. Dette indeholder en non-iterativ metode til bestemmelse af nødvendige faktorer og eksponenter til [Fo-exp], og en udvidelse af en simplificeret rækkeudvikling til også at muliggøre beregninger i starten af varmeprocesser hvor Fourier-tallet [Fo] er lavt. Til denne undersøgelse er det nødvendigt med en tilbundsående undersøgelse af oprindelsen af den analytiske løsning til Fourier’s ligning og de antagelser som danner grund for generelt accepterede antagelser for de simplificerede løsninger.

En ny beskrivelse af den eksterne og interne modstand imod varmetransport er blevet formuleret i form af en normalisering af Biot-tallet [Bi]. Det normaliserede Biot-tal [Bi_{norm}] muliggør en non-iterativ bestemmelse af Fourier-eksponenter og lag-faktorer som er nødvendige til beregning af [Fo-exp]. Den foreslåede metode har stor præcision i bestemmelsen af disse faktorer og eksponenter. Derudover muliggør [Bi_{norm}] en mere gennemsigtig bestemmelse af følsomheden i de vigtigste input i [Fo-exp]; varmeovergangstallet [h] og den termiske konduktivitet [k].

En simplificeret løsning til beregninger af temperaturhistorien under opvarmning/nedkøling af fødevarer er blevet formuleret som også omfatter startforløbet, hvor [Fo] er lavt. Ligningerne er gældende ved konvektiv varmeovergang i situationer hvor varmetransport er det eneste primære fænomen. Udviklingen af de nye beregninger er muliggjort ved modellering af residualen imellem en første terms [Fo-exp] og den komplette løsning til [Fo-exp]. Beregningerne introducerer ingen nye variable, og kun en enkelt empirisk bestemt konstant. Løsningen kan bruges til beregninger af uendelige legemer og sammensatte legemer.

Beregningsmetoden, som inkluderer både bestemmelsen af de nødvendige faktorer og eksponenter samt residual-modelleringen, er præsenteret og implementeret i regneark, hvor beregningen af to case studier er valideret med numerisk modellering. Det udviklede værktøj viste sammenlignelig præcision med en numerisk løsning for nedkøling af smøreost i en pakke med headspace (isolerende luftlag i toppen af pakken), og tretrins produktion af hamburgerryg indeholdende to opvarmningstrin og et nedkølingstrin.

I studiet er også bestemmelse af varmeovergangstal[h] behandlet, da dette er en central udfordring i forbindelse med beregninger på termiske processer. Fokus har været på det konvektive varmeovergangstal [h_c] og der er udviklet metoder indenfor tre områder:

Bestemmelse af $[h_c]$ under blæstkøling for individuelle grænseflader ved at isolere en modelfødevarer konstrueret i aluminium. Under bestemmelsen blev også indflydelsen af et isolerende luftlag i emballerede fødevarer undersøgt.

Bestemmelse af varmeovergangstal fra væsker til partikler $[h_{fp}]$ under grydekogning er blevet udviklet, hvor en observeret gelatineringsfront i kartofler blev udnyttet som en non-invasiv temperatur måling til bestemmelse af $[h_{fp}]$, i processer hvor det ikke ellers er muligt at måle temperaturen i partikler på normal vis.

Derudover er det blevet undersøgt, hvilken indflydelse kogningsgraden har på varmeovergangen fra ikke newtonske væsker til partikler under grydekogning. Resultatet af undersøgelsen indikerer, at også kogningsgraden bør indføres som proceskontrolparameter i disse processer.

På baggrund af gennemgang af litteratur er det ikke lykkedes at dokumentere oprindelsen af kriteriet for brugen af "lumped capacitance" modellen for $[Bi < 0.1]$. Dog har en matematisk analyse af rækkeudviklingen resulteret i en dokumentation af usikkerheden, når dette kriterium anvendes. Oprindelsen til kriteriet for at bruge simplificerede $[Fo\text{-exp}]$ til beregning, hvor $[Fo > 0.2]$ er dokumenteret. En analyse af de implicerede usikkerheder viste, at en fejl på op til 1.8% ville fremkomme i værste tilfælde. Dog er det tankevækkende, at den maksimale fejl er for uendelige plader, som udnyttes i beregningerne af endelige simple legemer (såsom kasser), hvor fejlen i disse tilfælde vil være op til 6%. Dette er problematisk specielt fordi de største fejl observeres ved $[Bi=2]$, som er yderst normalt under produktion af fødevarer.

Denne afhandling dokumenterer en analyse og beskrivelse af $[Fo\text{-exp}]$ til beregning af opvarmning og nedkøling af faste stoffer, og præsenterer en løsning til generelle problemstillinger under opvarmning og nedkøling af fødevarer. Den præsenterede løsning har en generel anvendelse og er i et format, der kan implementeres direkte i regnearksløsninger. Dette er en fordel i forbindelse med den industrielle anvendelse, specielt i form af udførelsen af rationel produktionsplanlægning, samt til at håndtere ændringer i proces eller produkt, og er et værdifuldt værktøj til identifikation af flaskehalse.

Det er et håb, at denne afhandling kan være en assistance til, at flere beregninger udføres i forbindelse med produktion af fødevarer. Det er også et ønske, at indsigten fra dette studie og de udviklede ligninger kan blive en del af undervisningen i fødevareteknologi for studerende i fødevarerens videnskab. Og mest af alt er der ønske om at de udviklede løsninger vil finde anvendelse i fødevarerindustrien.