



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Kontinuerlig ohmsk opvarmning af faste fødevarer

Projekt nr. ELFORSK - 353-009 - ELFOV-510291

18. maj 2023



Udarbejdet af

Martin Kjældgaard Pedersen, Alflow A/S

Lise Nersting, Teknologisk Institut

Christian Vestergaard, Teknologisk Institut

Indhold

Formål.....	3
Baggrund	3
Resume	4
Summary.....	5
Projektets opnåede resultater.....	6
Konceptformulering og kravspecifikation	6
Udvikling af procesudstyr	7
Afprøvning af udstyr og test på produkter.....	9
Udstyrets pumpefunktion.....	9
Temperaturmåling.....	10
Forsøg i produkter.....	11
Analyse af produkter.....	15
Sliceevne.....	15
Væskeudtræk.....	16
Farve	16
Tekstur	17
Sensorisk bedømmelse	18
Energi.....	21
Energiforbrug.....	21
Energipris for opvarmning med naturgas	21
Energipris for opvarmning med el	21
CO ₂ -aftryk.....	21
Cost-benefit.....	23
Kommercielt potentiale	24
Sammenfatning af projektets faglige resultater	25
Effekt, perspektivering og videre anvendelse.....	26
Formidling af resultater	27
Referencer	28
Bilag 1	29

Formål

Projektets formål har været at udvikle ohmsk opvarmningsteknologi til faste fødevarer med henblik på at foretage en markant reduktion af energiforbruget ved varmebehandling.

Næsten alle de kogeprocesser, der i dag anvendes til opvarmning i fødevarerindustrien, baserer sig på afbrænding af fossile energikilder til generering af varmt vand og damp. Med den energi, der tabes ved generering af varmen, samt det varmetab, der sker i kogeskabe, ender kun ca. 50% af kalorierne i produkterne.

Ohmsk opvarmning er en yderst hurtig og energieffektiv proces, der udnytter, at hele matricen opvarmes samtidig. Stort set al energi (virkningsgrad ca. 95%) afsættes direkte i produktet, der, uafhængig af produktdimensioner, opvarmes på få minutter.

Projektet har haft som mål at udvikle en ny, elektrisk, energieffektiv varmebehandlingsproces til faste fødevarer, idet det ville være nyskabende både nationalt og internationalt, hvis faste fødevarer kunne koges med halvt energiforbrug baseret på grøn el og på 1/10-1/20 af tiden ift. aktuel praksis.

Baggrund

Fødevarerindustriens energiforbrug tegner sig for 30% af den samlede danske industris energiforbrug, og over halvdelen af dette forbrug stammer fra fossile kilder. Klimapartnerskabet for fødevarer- og landbrugssektoren har opsat mål for en grøn omstilling af processerne i fødevarerindustrien, hvor disse skal elektrificeres og energieffektiviseres. Ohmsk opvarmning opfylder begge disse mål: Ohmsk opvarmning er el-baseret og har en virkningsgrad på 95-98%, mod en typisk virkningsgrad på 50% i de fossilt opvarmede dampkogeskabe, der anvendes i dag. I tillæg er teknologien markant (ca. 10 -20 gange) hurtigere end den aktuelt anvendte, hvilket giver mulighed for at øge produktionskapaciteten.

Teknologien er i dag udviklet og kommerialiseret til brug for *flydende* fødevarer, men bl.a. konstruktionstekniske udfordringer og en traditionsbunden fødevarerbranche med snæver profitmargin har hidtil afholdt teknologileverandører fra at udvikle udstyr til *faste* fødevarer. Det vurderes, at ohmsk opvarmning i levnedsmiddelindustrien i Danmark, ved fuld indfasning, vil kunne reducere energien til opvarmning af faste fødevarer fra ca. 38 mio. kWh til 15 mio. kWh, modsvarende en reduktion på 12 mio. kWh fossilt energiforbrug.

Teknologisk Institut har på et mindre, statisk ohmsk udstyr vist, at det er muligt at varmebehandle kødprodukter og opnå god produktkvalitet, hvorimod det var udfordrende at opnå den homogene varmefordeling, der er essentiel for fødevarerens sikkerhed. Det har været projektets mål at overkomme denne konstruktionstekniske udfordring.

Projektteamet bestod af udstyrsleverandøren Alflow, vidensinstitutionen Teknologisk Institut og Danish Crown som slutbruger.

Resume

Elforsk-projektet "Kontinuerlig ohmsk opvarmning af faste fødevarer" er udført i perioden 2021-2023, med Teknologisk Institut, Alflow A/S og Danish Crown.

I projektet er bygget verdens første pilotanlæg til kogning af faste produkter ved brug af kontinuerlig ohmsk opvarmning. Afprøvningen af anlægget har, i overvejende grad, givet resultater, der bekræfter, at det er muligt at koge kødprodukter ved brug af ohmsk opvarmning. Der kan opnås en energibesparelse på ca. 50% i forhold til traditionel varmebehandling i dampovne. Samtidig kan ohmsk varmebehandling reducere CO₂-udledningen fra kogeprocessen til omkring 1/3 ift. konventionel kogeteknologi.

Projektets hovedresultater sammenfattes som følger:

- Der er for første gang designet og bygget et kontinuerligt anlæg til ohmsk opvarmning af faste fødevarer.

Anlægget er afprøvet ad flere omgange, og resultaterne viser,

- at der ikke er observeret væsentlige kvalitetsforskelle for produkter produceret på konventionel vis i kogeskabe versus ved ohmsk opvarmning. Produkterne er evalueret både sensorisk, kemisk og i forhold til teknologiske egenskaber.
- at ohmsk opvarmning giver markante reduktioner i energiforbrug og CO₂-udledning. I takt med den forventede øgede mængde grøn el i elnettet vil CO₂-udledning stort set kunne undgås.
- at der, med aktuelle energipriser og afgifter, hverken er økonomiske fordele eller ulemper ved et teknologiskift.
- at ohmsk opvarmning, hvis anvendt i kødindustrien, byder på markante besparelser i bemanning, tidsforbrug, vedligehold og rengøring.
- at pilotanlæggets temperaturstyring ikke virker tilfredsstillende og kræver mindre ændringer. Konsekvensen har været, at det i nærværende projekt ikke har været muligt at dokumentere temperaturhomogenitet i de varmebehandlede kødprodukter.

Summary

The Elforsk project "Continuous Ohmic Heating of Solid Foods" was carried out from 2021-2023 by a consortium of the Danish Technological Institute, Alflow A/S and Danish Crown.

In the research project, the world's first pilot plant equipment for continuous cooking of solid food products by ohmic heating was developed. Testing the ohmic equipment has confirmed that it is possible to cook meat products continuously using ohmic heating. An energy saving of approx. 50% compared to traditional heat treatment in steam ovens could be obtained. In addition, ohmic heating can reduce the CO₂ emission from the cooking process to around 1/3 compared to conventional steam cooking technology.

The main results of the project are summarized as follows:

- A novel continuous ohmic cooker for solid foods was designed and built.

The equipment was tested thoroughly, and the results show that:

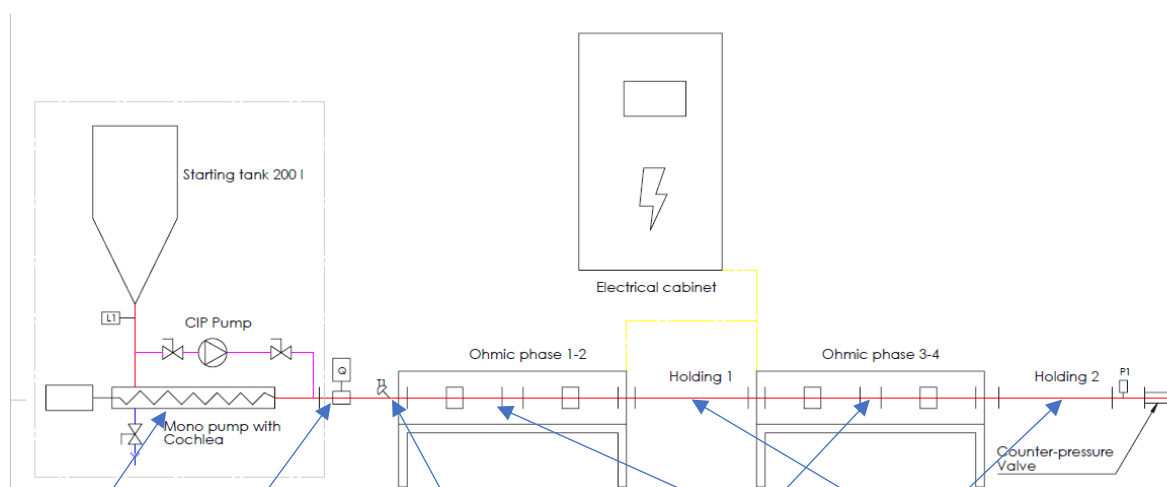
- no significant quality differences could be observed between meat products cooked conventionally in steam cabinets and products cooked by continuous ohmic heating. The products were evaluated both sensorially, chemically, and in relation to technological properties.
- ohmic heating facilitates significant reductions in energy consumption and CO₂ emissions. In a future scenario with increasing amounts of green electricity in the electricity grid, CO₂ emissions will largely be avoidable.
- with the current energy prices and taxes in Denmark, there are neither financial advantages nor disadvantages when converting from steam to ohmic heating.
- ohmic heating, if used in the meat industry, offers significant savings in staffing, processing time, production capacity, maintenance and time spent on cleaning.
- the temperature control of the test equipment did not work satisfactorily and requires minor changes. Consequently, it was not possible to document temperature homogeneity in the heat-treated meat products.

Projektets opnåede resultater

Konceptformulering og kravspecifikation

Projektets parter udarbejdede i fællesskab et koncept for et kontinuerligt ohmsk pilotanlæg samt en kravspecifikation. Heri var inkluderet definition af udformningen af udstyr samt målsætninger vedrørende energieffektivitet, varmefordeling/temperaturkrav, procestid, produktionskapacitet, variationer i produktsammensætning (fedt, kød, vand, salt m.m.) samt integration i produktionslinjer.

Specifikt kan nævnes, at udstyret blev planlagt til at skulle have en kapacitet på minimum 200 L/t, en effekt på 28 kW, en produktdiameter på 58-60 mm samt have fysiske mål, der muliggjorde installation i Teknologisk Instituts pilot plant.



Fødepumpe, flowmåler, temperatur- og ledningsevne måler, ohmske enheder, holdeceller, temperaturmåler

Figur 1. Skitse over anlæg til ohmsk varmebehandling af faste produkter.

Figur 1 viser en skitse af det udviklede anlæg til ohmsk varmebehandling. Råvaren fyldes i fødetanken og pumpes via en monopumpe (snekkepumpe) forbi en ledningsevne måler, en flowmåler og et termometer. Herefter passerer råvaren 4 ohmske behandlingsenheder placeret i 2 varmebehandlingskabinetter. Efter hvert kabinet findes en holdecelle på 1,2 m, i hvilken evt. temperaturinhomogenitet udjævnes delvist. Ved udmundingen er der mulighed for at placere en modtryksventil (ikke anvendt i det aktuelle forsøg).

I udstyr til flydende og semiflydende produkter er temperaturmåler efter varmebehandling placeret, så den måler i centrum af produktet. Denne placering er ikke mulig ved faste produkter, da de faste, kogte produkter ville blive flænset. I stedet er temperaturfølerne placeret langs afgangsrøret, så de har kontakt til røret og med isolering omkring. Der er placeret 3 temperaturfølere i afgangsrørets udmundning. Hele anlægget strømfødes fra et elskab, der indeholder strømforsyninger og PLC til styring.

Udvikling af procesudstyr

Alflow og Teknologisk Institut samarbejdede med maskinværkstedet Emmepiemme Srl. i Italien om udvikling og konstruktion af udstyret. Besøg på værkstedet blev foretaget i perioden med henblik på at udføre ændringer af bl.a. fyldesystem samt pumpe- og elektrodedesign.

I foråret 2022 deltog repræsentanter for Alflow, Danish Crown og Teknologisk Institut i en FAT-test i forsøgshallen på forskningsinstituttet SSICA i Parma.

DMRI producerede pølsefars til forsøgene. Forsøgene dokumenterede, at det var muligt at pumpe pølsefars igennem systemet, samt at produkterne kunne varmebehandles. Opvarmningsens homogenitet blev ikke vurderet på dette stadie.



Figur 2. Første kørsel på det nykonstruerede OH-anlæg i Parma, marts 2022. Øverst: Anlægget i sin helhed. Nederst: En operatør fylder fars i tragtten til anlægget (design af tragt senere ændret), en snekepumpe flytter farsen forbi flow-, temperatur- og ledningsevne målere, inden den passerer de to celler, hvor strøm påføres.

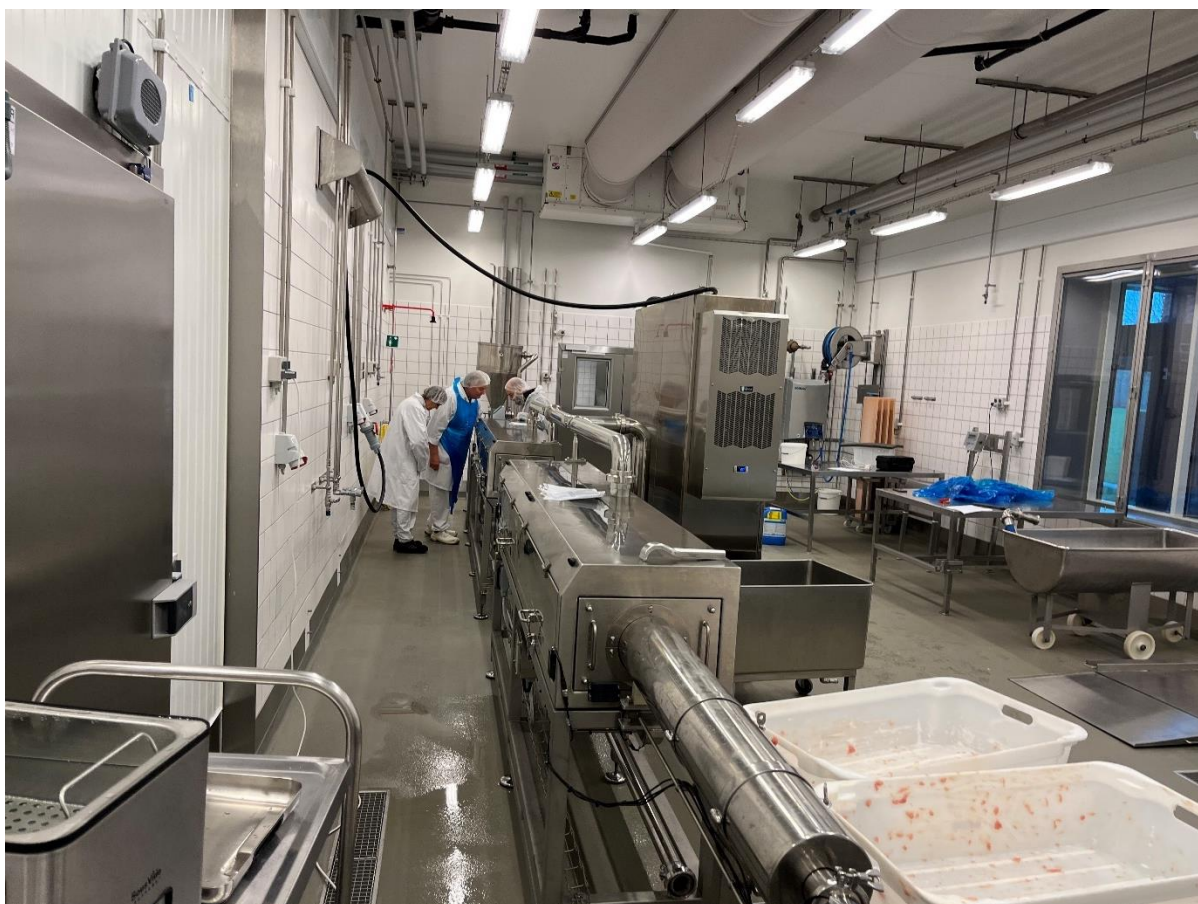
Nedenfor ses udstyrets enkelte dele. Figur 3 viser fyldeenheden, der ender i en snækkepumpe, som fører farsen frem, og herefter en flowmåler, der registrerer flowhastighed. Flowhastigheden kan indstilles og benyttes til at indstille varmebehandlingstiden i de ohmske enheder. Herefter kommer temperatur- og ledningsevne måler. Disse 2 målinger er sammenkoblet med måling af temperatur efter varmebehandling og bruges til at beregne og korrigere den nødvendig mængde energi, der skal påføres for at opnå den ønskede varmebehandling. På figur 4 ses 1 af de 2 varmebehandlingsenheder. I hver af varmebehandlingsenhederne er der 2 kamre, hvor der er placeret 2 ohmske enheder. Strømmen påsættes midt i hver af enhederne ved metalbåndene og ledes derfra igennem produkterne.



Figur 3. Fylde – snækkepumpe – flowmåler – temperatur- og ledningsevne måler.



Figur 4. Ohmsk enhed med 2 kamre uden og med fars.



Figur 5. Udstyret blev leveret til Teknologisk Institut og installeret i instituttets pilot plant i juni 2022.

Afprøvning af udstyr og test på produkter

Udstyrets pumpefunktion

Udstyret er konstrueret med en monopumpe (snekkepumpe), og denne har vist sig fuldt anvendelig til at pumpe produkter gennem udstyret. Den er imidlertid yderst vanskelig at rengøre til et passende hygiejnisk niveau for fødevarerproduktion, og på sigt vil pumpen skulle skiftes til en mere rengøringsvenlig model.

Der blev gennemført en række afprøvninger af udstyret på Teknologisk Institut, og udvalgte resultater er præsenteret herunder.

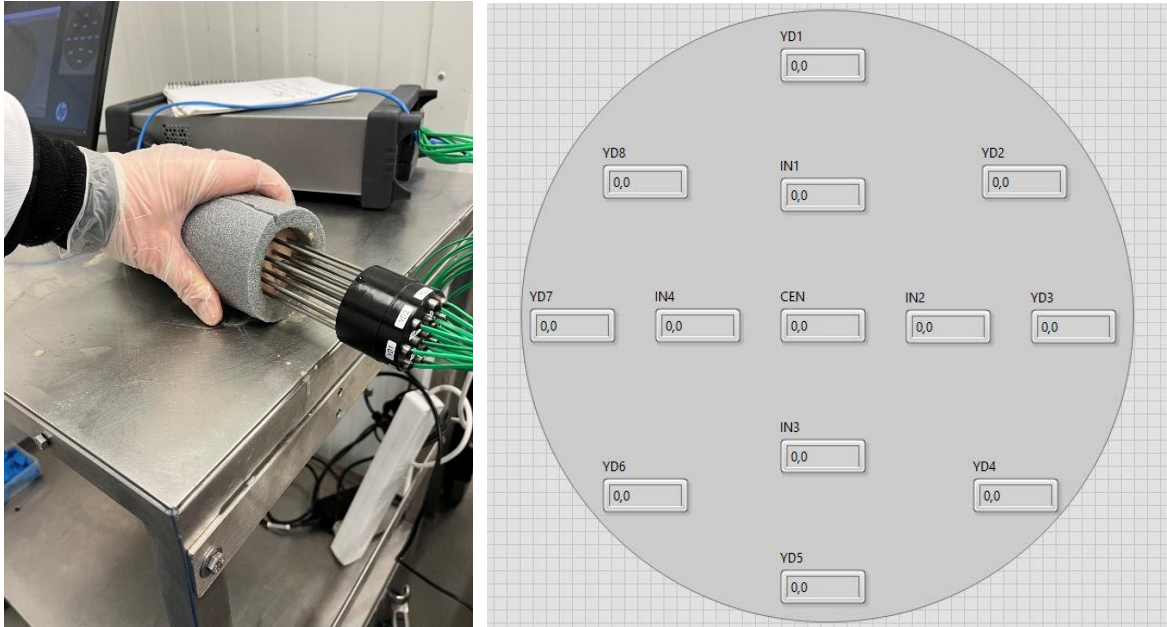
Sandwichskinke og frankfurterfars blev anvendt som modelmatricer for afprøvningen.

Sandwichskinke produceres af mindre kødstykker, der saltes, tumles (ælttes) og koges, således at de danner et sammenhængende fast produkt. Pøsefars er et emulgeret produkt, hvor kød, fedt og ingredienser hakkes sammen og danner en ensartet blanding (fars), der stabiliseres (koagulerer) under kogning. Disse to produkter repræsenterede dels magre produkter af semi-helkød og fede /magre emulsionsfarsprodukter. Disse produktmatricer blev valgt, fordi de forventes at være forskellige i ledningsevne, viskositet, tekstur, farvedannelse, kogetab og smagsprofil.

I forsøgene fokuseredes primært på temperaturfordeling og produktkvalitet, ligesom der blev gjort en række erfaringer med udstyrets egenskaber. Herunder præsenteres udvalgte resultater, der illustrerer forskellige observationer og problemstillinger.

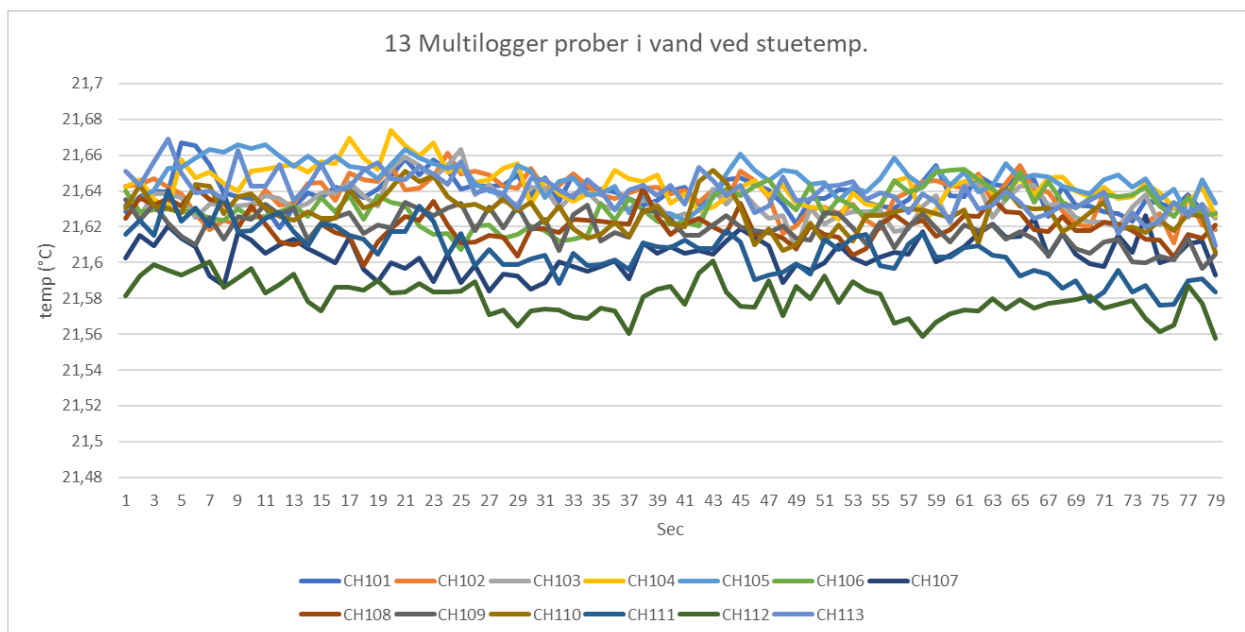
Temperaturmåling

En kendt problemstilling ved ohmsk varmebehandling af faste fødevarer er uensartet temperaturfordeling. Med henblik på at måle variationerne blev der indledningsvist konstrueret en multitemperaturlogger med 13 tynde følere. Følerne blev opvarmet i et vandbad til 70°C inden brug for at påvirke det produkt, de skulle måle på, mindst muligt. Figur 6 viser temperaturfølerne placeret i en kødpølse omsluttet af isoleringsmateriale samt placeringen af de enkelte følere.



Figur 6. Multilogger placeret i en kødpølse samt placeringen af de enkelte temperaturfølere.

Indledningsvist blev det undersøgt, hvordan de forskellige følere reagerede på nedsækning i et termostateret vandbad (Figur 7).



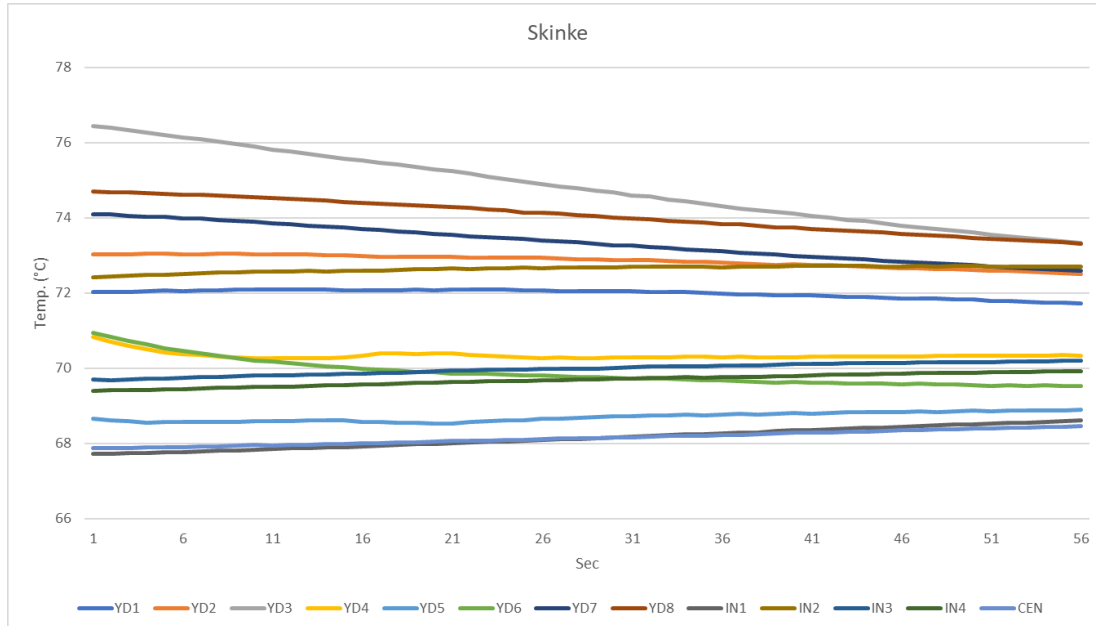
Figur 7. Variation mellem temperaturfølere i multilogger.

I figur 7 ses en måling foretaget i vand ved stuetemperatur over 79 sekunder. I gennemsnit var temperaturen 21,63°C, og standardafvigelsen på alle målingerne var 0,02°C, svarende til en variationskoefficient på 0,1%. Det bemærkes, at føler CH112 (omdøbt til YD7 i figur 6) ligger en smule lavere end de andre prøver til trods for en tidligere kalibrering af udstyret. Den mest åbenlyse forklaring herpå er, at denne føler var placeret yderst langs kanten af målebægeret med vand, der blev målt i, men det er ligeledes klart, at der er tale om en minimal forskel på op til ca. 0,04°C. Overordnet kan det derfor konkluderes, at udstyret måler ganske præcist. Det er muligt at korrigere de enkelte følere ved kalibrering. En sådan korrektion blev foretaget før måling af kødprodukterne.

Forsøg i produkter

Der blev foretaget en række testkørsler med kødprodukter, og herunder er vist 3 eksempler. Forsøgene viste, at der skal foretages vigtige ombygninger af anlægget, før dette fungerer optimalt. Dels er 3 temperaturfølere ved udstyrets afgang ikke konstrueret optimalt, hvorfor der er en stor forsinkelse på den observerede temperatur og den faktiske. Dette bevirker, at feedback-mekanismen til udstyrets elektroder kører meget ujævnt. Der mangler en ledningsevne måler ved udstyrets afgang, som kan justere for stigning i ledningsevnen ved opvarmning af produkterne. Ledningsevnesensorerne ved udstyrets afgang vil kræve ny programmering via fjernadgang fra Italien for at fungere korrekt. Dette problem er under afhjælpning, men har ikke kunnet nås inden for projektperioden. De følgende observationer skal derfor ses i lyset af, at udstyret formentlig vil kunne styres mere præcist, når disse ændringer er blevet foretaget.

Forsøg 1. Sandwichskinke

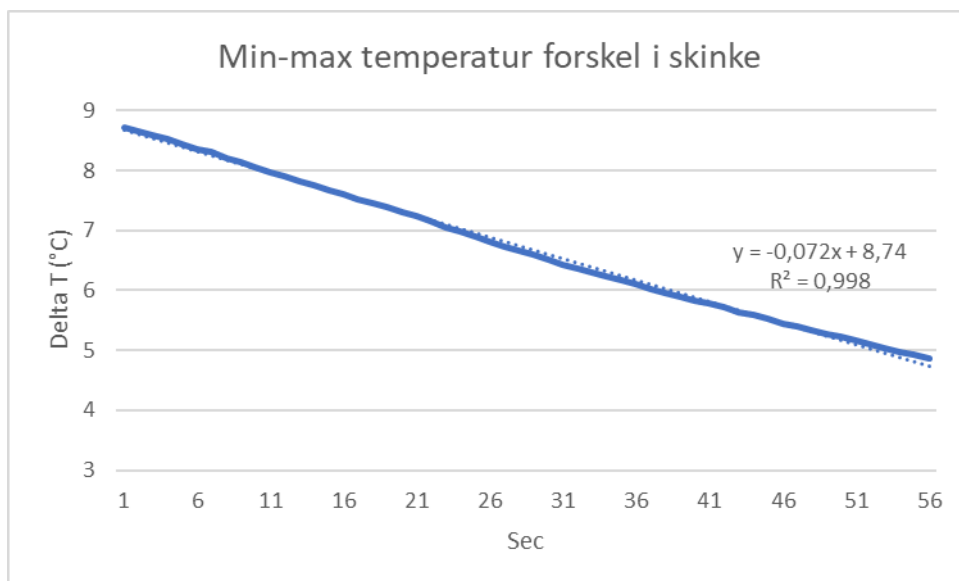


Figur 8. Temperaturfordeling i OH kogt sandwichskinke.

Figur 8 viser temperaturfordelingen i sandwichskinke kogt ved ohmsk opvarmning. Det første, der bemærkes, er, at gennemsnitstemperaturen i datasættet er 71,1°C, uagtet at det var intentionen at ramme 75°C. Ser man bort fra temperaturniveauet, er standardafvigelsen 2,2°C og variationskoefficienten 3,1%, hvilket må betegnes som utilfredsstillende. Dette problem skyldes mangler i placering og styring af temperatur- og ledningsevnefølerne ved udstyrets afgangsudmunding. Det er vurderingen, at feedback fra temperatur- og ledningsevnestyringen vil kunne forbedres væsentligt, når udstyret får de rette følere monteret.

En interessant observation er, at den gennemsnitlige temperatur i de yderst placerede følere (YD1-YD8) er 3,2°C højere end de øvrige følere tættere på centrum. Denne observation er tidligere gjort af maskinproducenten ved varmebehandling af andre fødevarerematrixer og forklares med, at flowhastigheden er lavere ved rørets sider end i midten. Herved øges opholdstiden i det elektriske felt for materiale langs rørsiderne, og der afsættes således mere varme her. Der tabes selvfølgelig også en smule varme fra røret, men samlet set er kødet altså en smule varmere yderst. Ved konventionel varmebehandling, hvor varmepåvirkningen sker udefra og ind, vil der generelt også være en temperaturdifference.

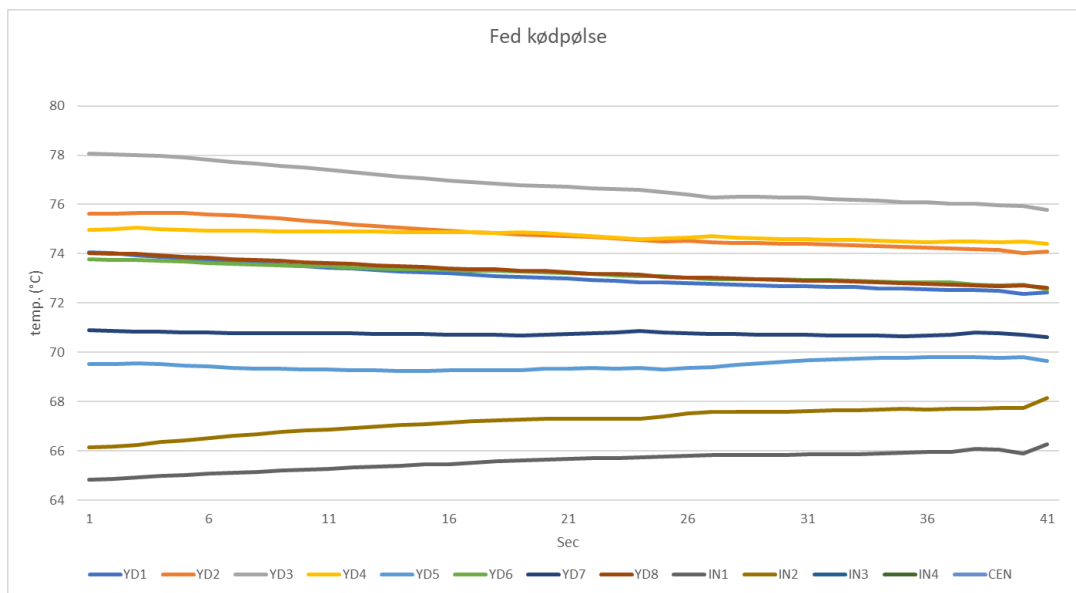
Det kan også observeres, at der sker en vis temperaturudligning over tid som illustreret i figur 9, hvor forskellen på det varmeste og koldeste punkt falder fra 8,7°C til 4,9°C i løbet af 56 sek. i et lineært forløb.



Figur 9. Forskel i temperatur i sandwichskinke som funktion af udligningstid.

Korrelationskoefficienten er tæt på optimal, og forløbet kan derfor beskrives med den lineære funktion angivet i diagrammet. Heraf følger, at temperaturudligningen teoretisk vil være fuldstændig efter 121 sec. Produkthastigheden under kogning var ca. 0,027 m/s, og dette betyder, at en holdecelle teoretisk ville skulle være 3,3 m længere end de ca. 2,4 m holdeceller, der aktuelt sidder i anlægget, for at temperaturhomogenitet kan opnås. Produkterne vil kunne betragtes som mikrobiologisk sikre, når alle områder har opnået 75°C i 15 sec., som der typisk skal til for at opnå en tilstrækkelig pasteuriseringseffekt. Det bemærkes dog, at et OH-anlæg til varmebehandling bør designes efter de specifikke produkter, det skal anvendes til, ligesom der kan optimeres på både produkthastighed og tilført effekt. Derfor kan både længere og kortere holdeceller være relevante.

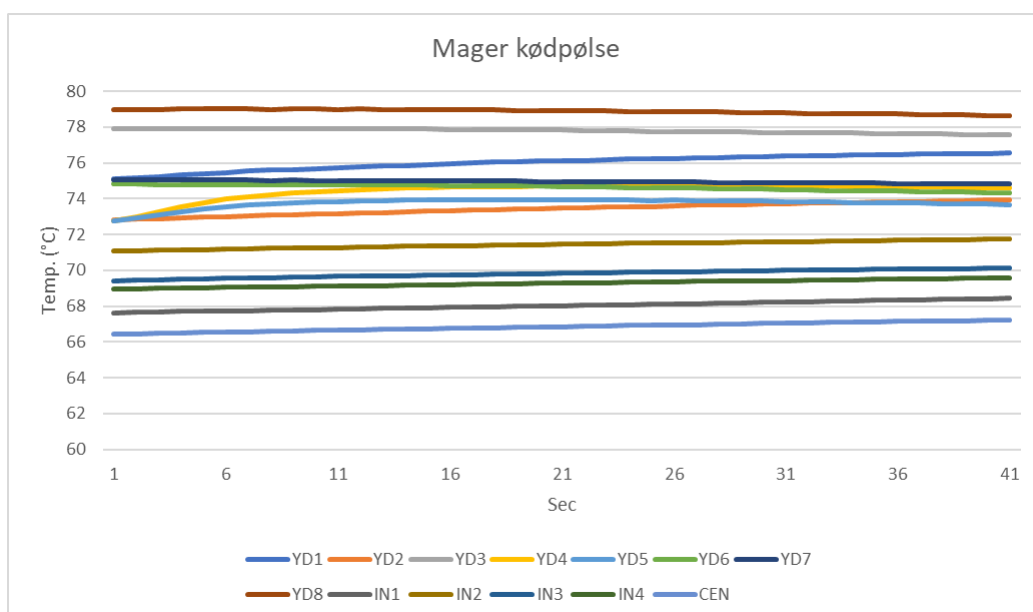
Forsøg 2. Fed kødpølse



Figur 10. Temperaturprofil i OH kogt kødpølse.

Temperaturprofilen for fed kødpølse viser samme mønster som for sandwichskinke. Temperaturniveauet (gns. 69,3°C) og temperaturspændet (std.afv. 5,65°C, variationskoefficient 8,15%) er igen uacceptable og forklares på samme vis som for sandwichskinke jf. figur 8. Igen må det formodes, at en forbedret temperaturstyring vil kunne forbedre præcision og variationen i temperaturfordelingen i produktet.

Forsøg 3. Mager kødpølse



Figur 11. Temperaturprofil i OH kogt kødpølse.

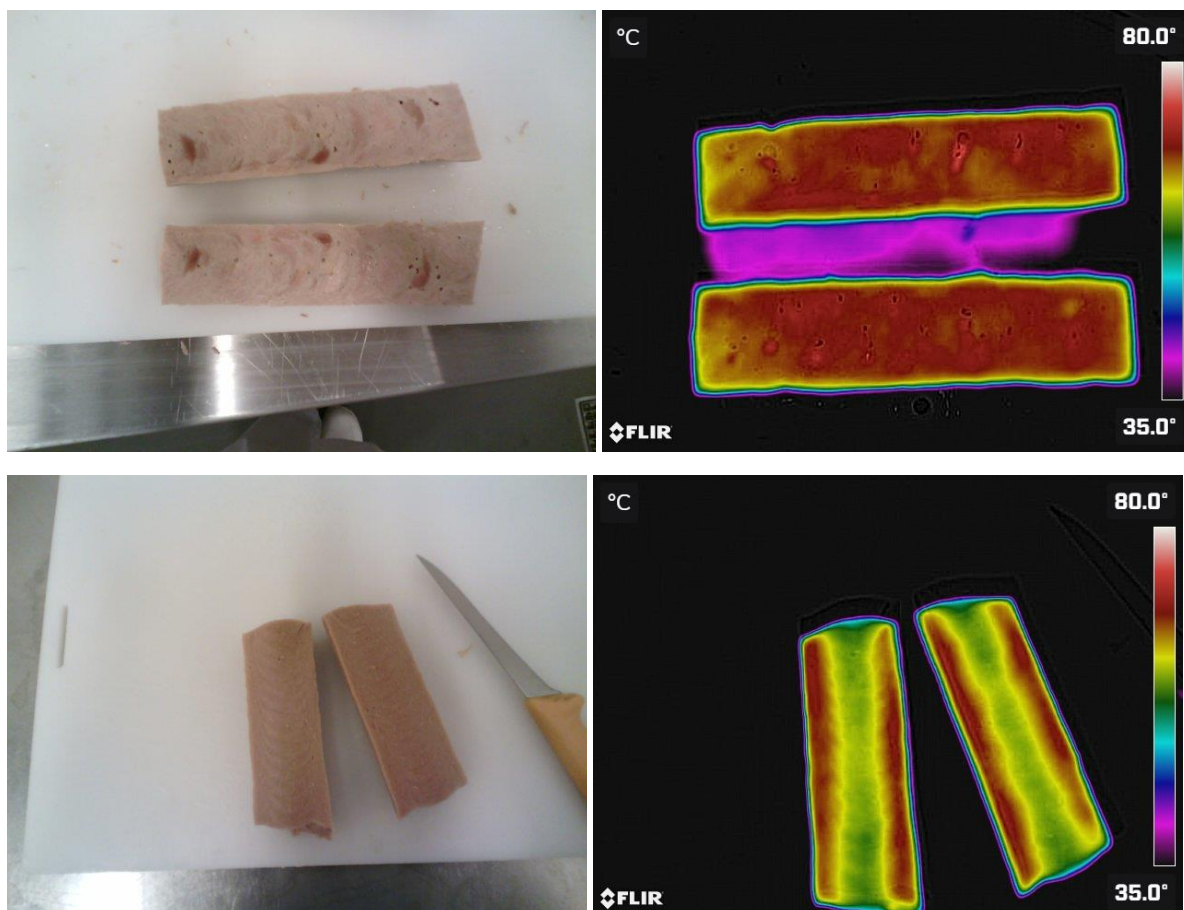
Temperaturprofilerne for mager kødpølse følger samme mønster som for sandwichskinke og fed kødpølse. I dette tilfælde ses en gennemsnitstemperatur på 73°C med en standardafvigelse på 3,6°C og en variationskoefficient på 4,9%. Igen er temperaturstyringen utilfredsstillende, men som nævnt ovenfor forventes dette korrigeret ved ombygning af temperatur- og ledningsevnefølerne. Den større std.afv. for den fede kødpølse kan måske forklares ved en lavere ledningsevne på 76 mS/m i forhold til den magre kødpølse (82 mS/m). Ledningsevnen har betydning for, hvor let produkterne kan opvarmes.

Samlet viser temperaturobservationerne således:

- at det er muligt at udføre pålidelige målinger med den konstruerede multitemperaturlogger
- at temperaturvariationerne er uacceptabelt store i målingerne
- at temperaturudligningen foregår relativt hurtigt

Meget væsentligt bemærkes det dog, at temperaturvariationerne forventes at kunne mindskes markant, når anlæggets temperatur- og ledningsevne målere ændres. Langsommere flowhastighed igennem anlægget samt en længere holdecelle i slutningen af udstyret vil også kunne sikre bedre temperaturudligning. En variation $\pm 1^\circ\text{C}$ vurderes at være acceptabel.

Infrarøde observationer



Figur 12. Infrarøde fotos og tilhørende normale billeder. Eksempler på sandwichskinkeprodukter (øverst) og pølse (nederst).

Figur 12 viser eksempler på normale samt infrarøde (IR) billeder af sandwichskinke og kødpølseprodukter taget umiddelbart (få sekunder) efter, at produkterne forlader maskinen. De røde områder i sandwichskinkeproduktet på de almindelige fotos er normale variationer i muskelpigment, og de lufthuller, der kan anes, skyldes ikkeoptimal fremstilling af skinkeblandingen og muligvis ikke optimal pumpning af samme. På begge IR-billeder er der en helt tynd kant af blå efterfulgt af gult, hvilket viser, at der med det samme sker en afkøling af den yderste kant. De rødlige områder på IR-billedet af kødpølsen viser, at den yderste del af pølsen bliver opvarmet mere end den inderste del. Dette stemmer overens med temperaturmålingerne foretaget med multitemperaturloggeren. Det er kun synligt på den fede kødpølse, hvor den største temperaturvariation blev registreret. På sandwichskinkeproduktet ses ligeledes små lyserøde områder indikerende hot spots. Da disse er jævnt fordelt, tyder det på, at en passende holdetid vil kunne sikre en ensartet og passende temperatur i produktet. Forudsætningen for det rette temperaturniveau er dog, som tidligere nævnt, en optimering af udstyrets temperaturstyring.

Analyse af produkter

Med det forbehold, at det ikke er lykkedes at ramme de temperaturer, der var planlagt, er produkterne vurdereret teksturmæssigt, farvemæssigt, kemisk og sensorisk.

Kemisk analyse

Tabel 1. Sammensætningen af de undersøgte produkter. Forsøg med samme bogstav er lavet fra samme fars. (Trad. = kogeskab)

Test nr og type	Fedt		Protein		Salt		Vand	
	g/100g	Std	g/100g	Std	g/100g	Std	g/100g	Std
A1 - Sandwichskinke - Trad.	1,7	0,0	18,3	0,7	2,2	0,1	76,0	0,5
A2 - Sandwichskinke - Ohmsk	2,0	0,0	18,7	0,7	2,2	0,1	76,1	0,5
B3 - Kødpølse - Mager - Trad.	10,6	0,0	13,6	0,5	2,2	0,1	68,3	0,5
B4 - Kødpølse - Mager - Ohmsk	10,9	0,0	13,9	0,6	2,2	0,1	67,4	0,5
C5 - Kødpølse - Fed - Trad.	21,3	0,3	11,6	0,5	2,2	0,1	59,8	0,8
C6 - Kødpølse - Fed - Ohmsk	20,7	0,3	12,0	0,5	2,2	0,1	60,2	0,8
D9 - Kødpølse - Mager - Trad.	6,7	0,0	13,7	0,5	2,1	0,1	70,7	0,5
D10 - Kødpølse Mager - Ohmsk	6,2	0,0	14,0	0,6	2,1	0,1	70,4	0,5

Tabel 1 viser sammensætningen af de undersøgte produkter. Forsøg med samme bogstav er lavet fra samme fars. For A-prøverne ses en forskel i fedtindhold, som ikke kan forklares ved forskelligt kogesvind. Selv om forskellen er lille, er den i procentuel sammenhæng stor. Fortolkningen er derfor, at der er tale om forskelle i de udtagne stikprøver og ikke i kogemetode. For de resterende prøvesæt (B, C, D) er der intet, der tyder på væsentlige forskelle i sammensætning, og produkterne er at betragte som ens, uanset om de er kogt ved brug af ohmsk opvarmning eller i konventionelt kogeskab. Der er således ikke observeret øget kogesvind ved ohmsk varmebehandling.

Sliceevne

Alle produkter, konventionelt kogte, såvel som ohmsk opvarmede, blev slicet med henblik på at vurdere sliceevne målt som andelen af defekte skiver. Alle produkter udviste 100% sliceability (ingen defekte skiver), og data er derfor ikke vist her.

Væskeudtræk

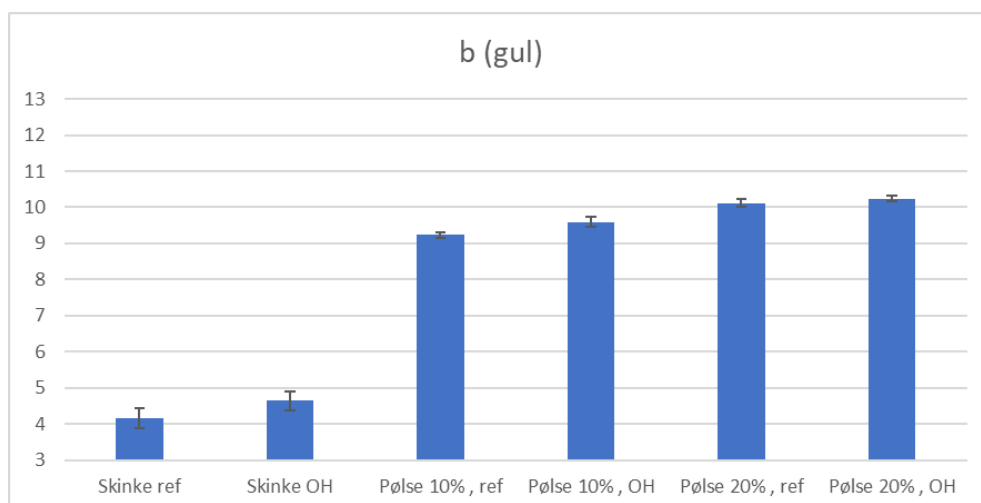
De kogte produkter blev gaspakket og lagret i 3 uger ved 5°C, hvorefter der blev evalueret på mængden af væskeudtræk, som er et kendt fænomen i saltede, kogte helmuskelprodukter og generelt i produkter med meget tilsat vand eller få vandbindende ingredienser. Hverken de konventionelt kogte eller de ohmsk varmebehandlede produkter udviste væskeudtræk. Produkt eksempeler er vist i figur 13.



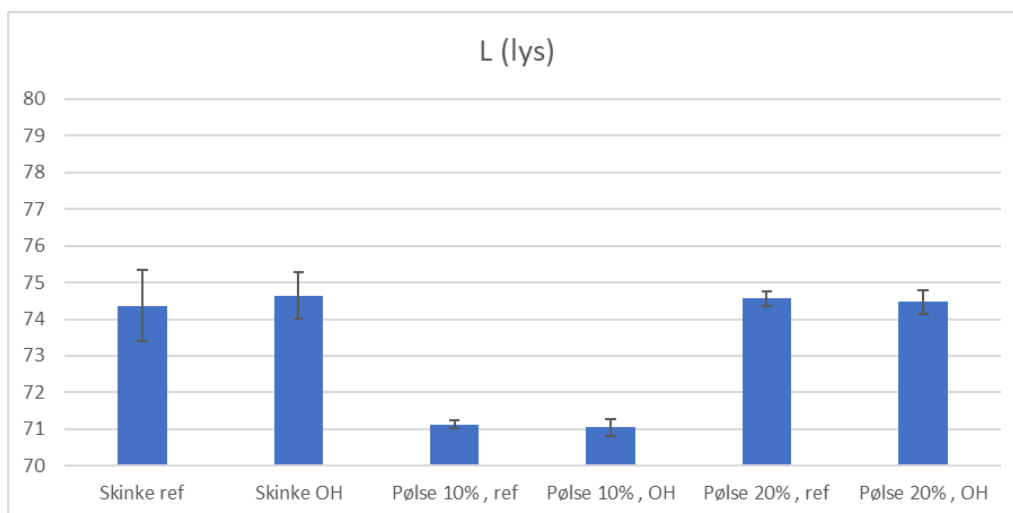
Figur 13. Produkter testet for væskeudtræk (kødpølse mager, sandwichskinke og kødpølse fed).

Farve

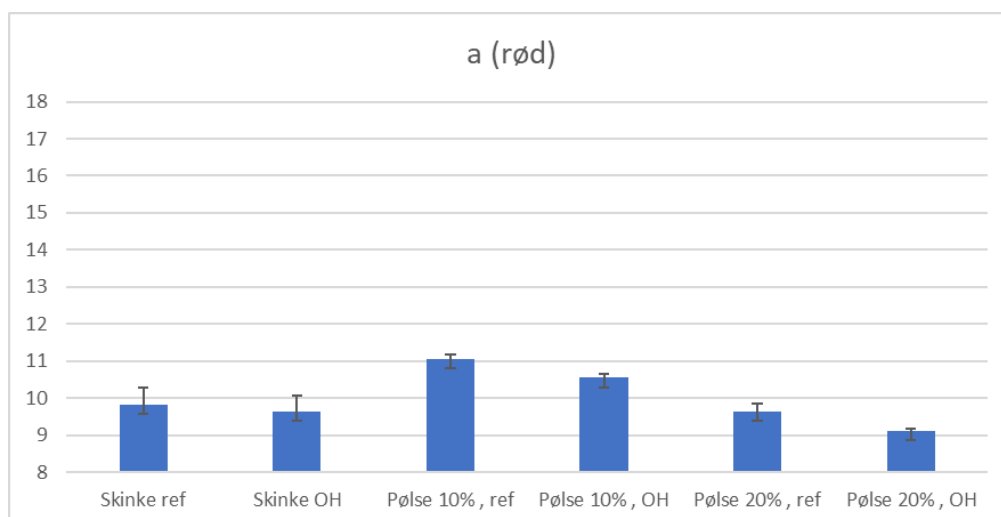
Kødpølsefarve afhænger til dels af, hvilken temperatur de har været opvarmet til, og det lykkedes som nævnt ikke at ramme de planlagte temperaturer ved ohmsk opvarmning. Med dette forbehold in mente ses farven af produkterne illustreret i diagrammer i de følgende 3 figurer (figur 14-16). Farven er med reference til CIELAB systemet, der placerer samtlige farver i et 3D-farverum udspændt af akserne lys-mørk, rød-grøn og gul-blå.



Figur 14. Gule nuancer i produkter kogt ved ohmsk opvarmning (OH) og konventionel kogning (reference).



Figur 15. Lyse nuancer i produkter kogt ved ohmsk opvarmning (OH) og konventionel kogning (reference).

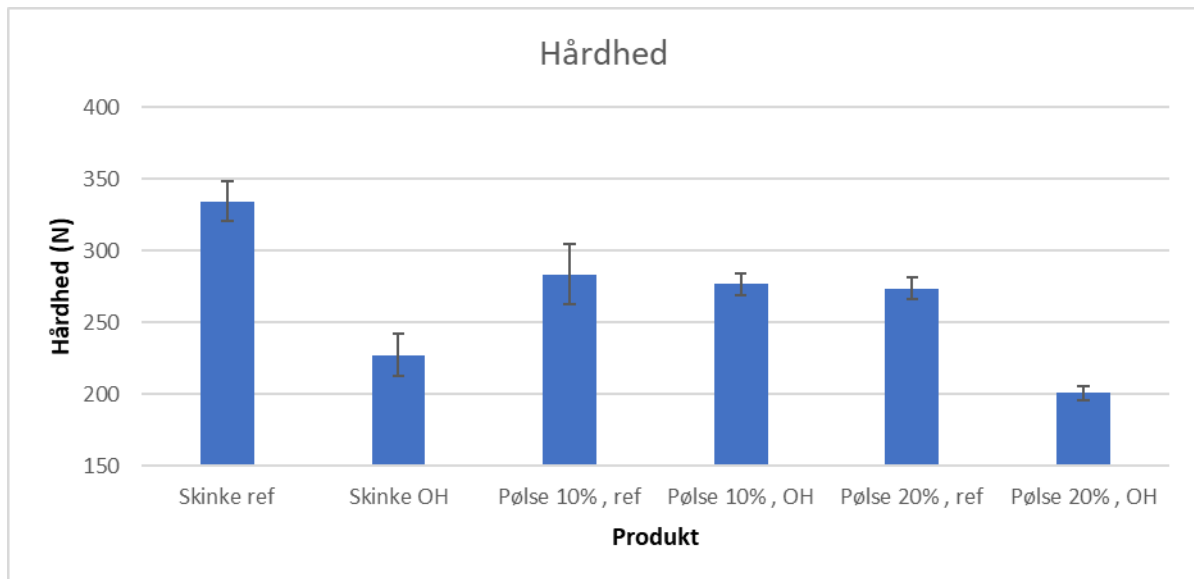


Figur 16. Røde nuancer i produkter kogt ved ohmsk opvarmning (OH) og konventionel kogning (reference).

Af farvemålingerne i figurerne ses ikke væsentlige ændringer i lyshed og gule nuancer. De OH-behandlede pølseprodukter er mindre røde end de konventionelt kogte, men det er forventeligt, at produkter, der ikke er kogt til samme temperatur, afviger i rød farve, da rød farve i kogte kødprodukter afhænger af råvarens pigmentindhold, nitritindhold og varmebehandlingstemperatur.

Tekstur

I figur 17 er vist hårdheden af produkter kogt konventionelt (ref.) og ved ohmsk opvarmning (OH). Skinkeproduktet og den fede pølse (20%) fremstår markant blødere end referencen, mens de to magre pølseprodukter (10%) ligger på omtrent uændret niveau. Produkterne kogt ved ohmsk opvarmning nåede dog ikke helt op på samme temperatur som referenceprodukterne, hvorfor sammenligningen skal tages med forbehold. Det er velkendt, at kogetemperaturen betyder meget for kødproduktets konsistens.



Figur 17. Konsistens målt som hårdhed i produkter kogt konventionelt (ref.) og ved ohmsk opvarmning (OH).

Sensorisk bedømmelse

Ni paneldeltagere fra et trænet sensorisk panel vurderede først to forskellige slags varmebehandlede sandwichskinker (OH vs. konventionel kogning) og herefter de to slags kødpølser (ligeledes OH vs. konventionel kogning) ved brug af metoden Rate All That Apply (RATA) (Ares et al., 2014).

Hver paneldeltager modtog to stykker af den samme sandwichskinke eller kødpølse kodet med et trecifret nummer. Herefter blev de præsenteret for en liste med egenskaber, der beskrev udseende, lugt, smag og tekstur. Listen med attributter var baseret på tidligere fastsat ordforråd, der beskriver hhv. sandwichskinke og kødpølse, og kan ses i bilag 1. Paneldeltagerne blev bedt om at vælge alle de egenskaber på listen, som de mente beskrev prøven, og rangere dem fra lav via medium til høj. Alle prøver blev vurderet tre gange af alle paneldeltagere, og serveringsrækkefølgen blev randomiseret mellem paneldeltagere.

Resultaterne fra RATA-analysen for sandwichskinke kan ses i tabel 2. Listen med egenskaber bestod af 31 sensoriske egenskaber, hvoraf fem af dem viste signifikant forskel mellem de to prøver.

Af tabel 2 ses, at det primært er udseende, der adskiller de to prøver. Konventionelt opvarmet sandwichskinke havde en mere fugtig overflade og et mere sammenhængende udseende, mens ohmsk opvarmet sandwichskinke havde flere huller i kødet. Den konventionelt opvarmede sandwichskinke duftede mere intenst af kogt sandwichskinkelugt og havde en mere sammenhængende struktur under tygning. Dette er ikke noget, der er observeret tidligere, og resultatet bør undersøges i fremtidige forsøg. Der blev ikke fundet forskelle i smag og farve.

Tabel 2. Signifikante sensoriske egenskaber fra RATA-analysen af sandwichskinke. Bogstaver indikerer forskel mellem prøverne, hvor A er forskellig fra B.

Udsende - Mængde af huller	Genm.	Post hoc	Udsende - Fugtig overflade	Genm.	Post hoc
Skinke ohmsk	2,12	A	Skinke traditionel	2,63	A
Skinke traditionel	1,00	B	Skinke ohmsk	2,00	B
Udsende - Sammenhængende struktur			Lugt - Kogt skinke		
Skinke traditionel	2,56	A	Skinke traditionel	2,02	A
Skinke ohmsk	1,79	B	Skinke ohmsk	1,42	B
Tekstur - Sammenhængende					
Skinke traditionel	2,78	A			
Skinke ohmsk	2,14	B			

Resultaterne fra RATA-analysen af kødpølse kan ses i tabel 3. Af 33 sensoriske egenskaber viste kun to sig signifikant forskellige. Af tabel 3 kan det ses, at det primært er lugten, der adskilte de to prøver. Konventionelt varmebehandlet kødpølse havde en højere intensitet af syrlig lugt og bi-lugt (uspecificeret). Der blev ikke fundet forskelle i smag, farve og tekstur.

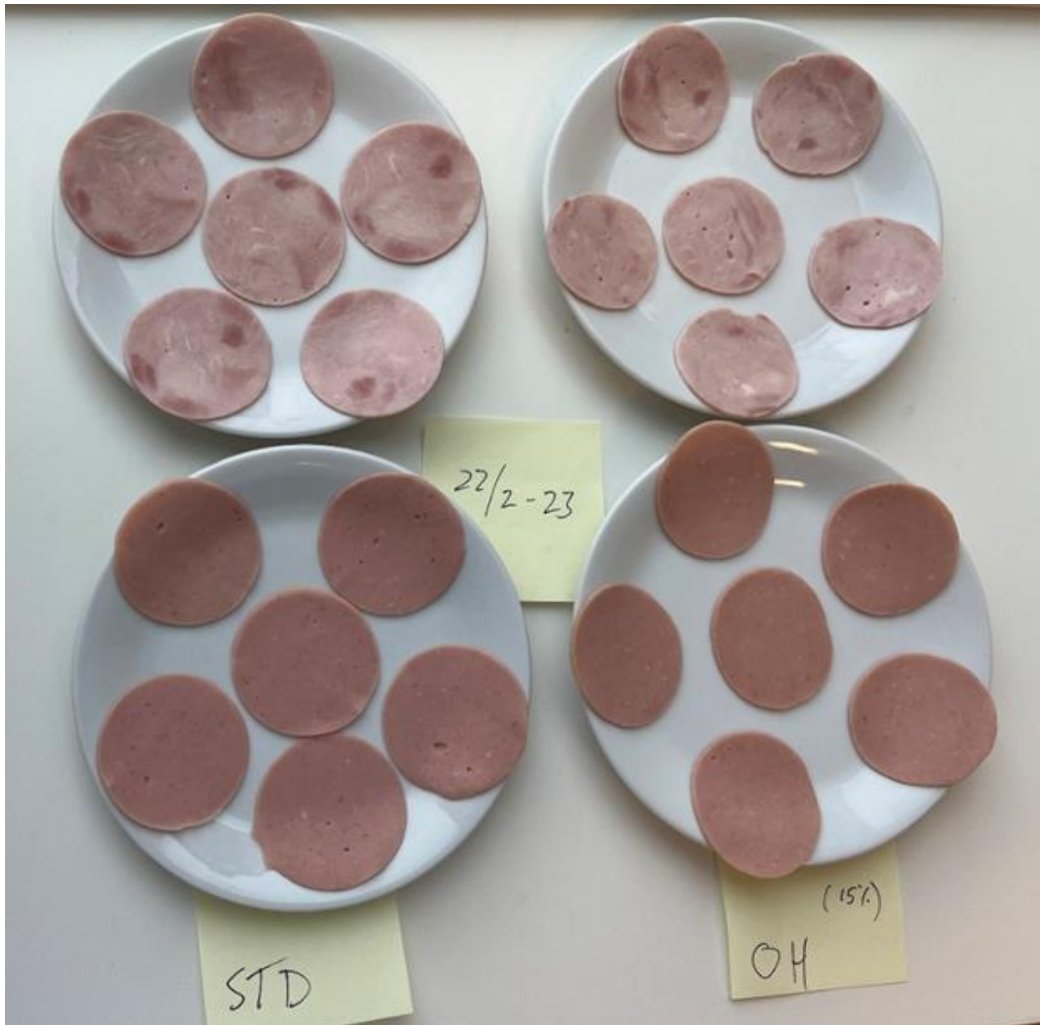
Tabel 3. Signifikante sensoriske egenskaber fra RATA-analysen af kødpølse. Bogstaver indikerer forskel mellem prøverne. A er forskellig fra B.

Syrlig lugt	Genm.	Post hoc	Bilugt	Genm.	Post hoc
Kødpølse traditionel	1,79	A	Kødpølse traditionel	2,42	A
Kødpølse ohmsk	1,00	B	Kødpølse ohmsk	1,75	B

Som ved alle ovenfor nævnte analyser er det væsentligt at holde sig for øje, at det i forsøgene ikke lykkedes at opnå samme temperatur ved konventionel og ohmsk kogning. Det er forventeligt, at forskelle i kogetemperatur bevirker forskelle i sensoriske egenskaber.

De huller i produkterne, som dommerne bemærkede, skyldes fremstilling og pumpning af skinkeblandingen, noget som vil være muligt at korrigere ved optimering af fremstillingsproceduren.

Sammenfattende for den sensoriske bedømmelse kan det konkluderes, at der næppe sker væsentlige forandringer af smagen af sandwichskinke og kødpølse ved ohmsk varmebehandling. Sammenhængsevnen kan måske påvirkes for sandwichskinke. I så fald bør recepten tilpasses for at forbedre sammenhængsevnen. Der var ikke forskel på de øvrige egenskaber for tekstur. I figur 18 er vist produktbilleder.



Figur 18. Sandwichskinke og kødpølseprodukter varmebehandlet konventionelt (STD) og ved opvarmning (OH).

Energi

Energiforbrug

Opvarmning af kød til en given temperatur vil, uafhængigt af varmebehandlingsmetode, kræve den samme mængde energi. Forskellen mellem varmebehandlingsmetoders CO₂-aftryk ligger således i energieffektiviteten for metoden.

Ved opvarmning med gas opstår der både et tab ved 1) afbrænding af gas og opvarmning af vand til damp, 2) transport af damp til kogeskabet, samt til selve kogeskabet, og til stativet produkterne hænger/ligger på, som består af store mængder stål. Teknologisk Institut har tidligere beregnet, at den samlede virkningsgrad for processen ligger på 40-60%. Det er således kun omkring halvdelen af den energi, gassen indeholder, der ender i produktet. For ohmsk opvarmning er effektiviteten betydelig højere, nemlig ca. 95%.

En fars af svinekød (20% fedt) har en specifik varmekapacitet på 3,45 kJ/kg*K, hvilket betyder, at en opvarmning fra 5 til 75°C kræver 241,5 kJ/kg.

Tabel 4. Energiforbrug til opvarmning afhængig af effektivitet.

Virkningsgrad	Energiforbrug kJ/kg	Energiforbrug kWh/kg
40%	603,5	0,168
60%	402,3	0,112
95%	254,1	0,071

Energi pris for opvarmning med naturgas

Til opvarmning i kogeskab anvendes typisk naturgas til fremstilling af damp. Med udgangspunkt i Energistyrelsens standardenergi priser fra 2020 (vurderes at være det mest realistiske normalniveau pga. ukraine krisen i 2022) antages en gaspris på 25,73 øre/kWh (Energistyrelsen, 2020). Hvis der antages en virkningsgrad på 50%, koster det således 0,134 kWh/kg at opvarme 1 kg pøsefars fra 5°C til 75°C. Dette modsvarer en udgift til gas på 3,45 øre/kg produkt.

Energi pris for opvarmning med el

Til ohmsk opvarmning anvendes el. Med udgangspunkt i Energistyrelsens standardenergi priser fra 2020 (vurderes at være det mest realistiske normalniveau pga. ukraine krisen i 2022) antages en elpris på 55,46 øre/kWh (Energistyrelsen, 2020). Hvis der antages en virkningsgrad på 95%, koster det således 0,071 kWh/kg at opvarme 1 kg pøsefars fra 5°C til 75°C. Dette modsvarer en udgift til el på 3,92 øre/kg produkt.

CO₂-aftryk

CO₂-emissionsfaktorerne for forskellige energiformer er fastsat efter Energistyrelsens årsstatistik samt basisfremskrivning 2020 og tager afsæt i de forventede udledninger i 2030 (Energistyrelsen,

2020). Naturgas angives til at have et aftryk på 205 g CO₂/kWh, mens el udleder 0,006 g CO₂/kWh. Heraf følger, at opvarmning af 1 kg pølsefars med naturgas vil udlede 27,50 g CO₂/kg, mens samme mængde produkt kan fremstilles med en CO₂-udledning på 0,00042 g CO₂/kg ved brug af ohmsk opvarmning.

Det bør dog bemærkes, at det lave CO₂-aftryk baserer sig på en fremskrivning, hvor stort set al elproduktion kommer fra vedvarende energikilder. Ser man i stedet på udledningen fra den faktisk solgte el i 2021, angives el at have haft et aftryk på 140 g CO₂/kWh i 2021 (Energistyrelsen, 2021). Anvender man i stedet dette tal, fås, at det koster 9,89 g CO₂/kg at fremstille 1 kg pølsefars.

Nedenstående tabel sammenfatter energi, pris og CO₂-beregningerne for konventionel vs. ohmsk kogning af 1 kg fars fra 5-75°C.

	Varmebehandlingsmetode	
	Ohmsk	Konventionel
Virkningsgrad	95%	50%
Energi (kWh/kg)	0,071	0,134
CO ₂ (g CO ₂ /kg)	9,89 ^A 0,000042 ^B	27,50 ^A
Pris (øre)	3,92 ^C	3,45 ^A

- A. Energistyrelsen (2020)
- B. Energistyrelsen, fremskrivning 2030, (2020)
- C. Energistyrelsen (2021)

Hvis man ser isoleret på opvarmningsmetoden, reduceres CO₂ med en faktor 3 ved anvendelse af ohmsk opvarmning fremfor konventionel kogesopsopvarmning. Fremtidige udvinding af energi vil influere på CO₂-aftrykket, og anvendes Energistyrelsens fremskrivning til 2030, vil CO₂-aftrykket stort set forsvinde ved brug af ohmsk opvarmning. Med de anvendte priser på el og gas er der ingen økonomisk fordel ved skifte fra gas til el. Det bør dog erindres, at energipriserne er meget fluktuerende og i øvrigt stærkt påvirkede af politisk bestemt beskatning, ligesom beskatning af CO₂-udledning kan influere på cost-benefit. I tillæg har ukrainekrisen vist, hvordan forsyningssikkerhed af importeret energi kan være uforudsigelig.

Cost-benefit

Fordele

Fordelen ved ohmsk varmebehandling er, at det er en meget hurtig proces. Generelt vil varmebehandling tage ca. 2-5 minutter uanset produkt diameter. Processen er elektrificeret og meget energieffektiv (ca. 95%), og dermed vil der også kunne opnås en reduktion i CO₂-emission. Der er ingen opvarmning eller eftervarme ved processen, og da overfladerne i udstyret ikke bliver varme, er der ingen risiko for påbrændinger. Processen er automatiseret, og der anvendes CIP-rengøring I tabel 5 er estimeret tids- og mandskabsbesparelse angivet. Det vurderes at ohmsk opvarmning vil være 10-20 gange hurtigere end traditionel opvarmning og at der kan opnås en mandskabsbesparelse på 4-6 personer. I tillæg frigives ovnkapacitet svarende til ca. 1000kg/t.

Tabel 5. Besparelse i procestid, bemanning ved produktion og rengøring samt frigivet ovnkapacitet.

Proces	Traditionel proces	Ohmsk opvarmning	Besparelse
Estimeret produktionstid Kødpølse Ø:6 cm Toppingskinke Ø:11 cm	60 min 110 min	2-5 min. 2-5 min.	55-58 min 105-108 min
Mandskabsbesparelse (Fra fylder til kølerum)	Manuelle processer 4-6 personer	Fulldautomatisk proces 2 personer	2-4 personer
Rengøring	Manuel: 3 personer	CIP fulldautomatisk: 1 person	2 personer
Frigivelse af ovnkapacitet	Dampovne	1000 kg/t	Frigivet kapacitet ca. 1000 kg/t

Begrænsninger

Ohmsk opvarmning kan kun anvendes til pumpbare produkter. Det er vigtigt, at ledningsevnen er den samme i hele produktet, og der må eksempelvis ikke være store udsving i saltindholdet i produktet, hvor der skal være sikkerhed for ensartet varmebehandling.

Investering

De primære omkostninger ved ohmsk opvarmning vil være investerings- og implementeringsomkostninger. Investeringsomkostningerne til et ohmsk anlæg med en kapacitet på 1.000 kg/t anslås til 1,5 mio. kr. I tilfælde af at kapaciteten skal forøges, vil det kræve en mindre omkostning at få tilføjet flere enheder. Det er muligt at tilføje flere enheder, så længe strømenhederne kan trække den ekstra belastning. Det er strømenheden, der er omkostningstung. Implementeringsomkostningerne kendes p.t. ikke.

Forventet vedligehold

Ohmsk udstyr kræver ikke meget vedligehold, da hele processen forgår in-line, uden nogen former for bevægelige komponenter, der kræver regelmæssigt vedligehold, på nær fødepumpen.

Kommercielt potentiale

Der ses et kommercielt potentiale for ohmsk varmebehandling af pumpbare faste fødevarer og sidestrømme til dyrefoder, idet processen både er elektrificeret og energieffektiv. Samtidig er ohmsk opvarmning meget hurtig og kan automatiseres.

De segmenter, hvor der ses potentiale for ohmsk opvarmning af faste produkter, er fx følgende:

- Kødindustrien (gris, kylling og kvæg), produkter som fx kødfars, færdigretter, sandwichskinke/toppingskinke, pølser uden skind og patéer/leverpostej.
- Fiskeindustrien, fx patéer
- Plantebaserede produkter, fx patéer, pølser, farsprodukter
- Sidestrømme fra kød- og fiskeindustrien
- Plantebaserede restprodukter/fermenterede produkter

Sammenfatning af projektets faglige resultater

I projektet "Kontinuerlig ohmsk opvarmning af faste fødevarer" kan de opnåede resultater sammenfattes som følger.

- Der er for første gang designet og bygget et kontinuert anlæg til ohmsk opvarmning af faste fødevarer.

Anlægget er afprøvet ad flere omgange, og resultaterne viser,

- at der ikke er observeret væsentlige kvalitetsforskelle for produkter produceret på konventionel vis i kogeskabe versus ved ohmsk opvarmning. Produkterne er evalueret både sensorisk, kemisk og i forhold til teknologiske egenskaber.
- at ohmsk opvarmning giver markante reduktioner i energiforbrug og CO₂-udledning. I takt med den forventede øgede mængde grøn el i elnettet vil CO₂-udledning stort set kunne undgås.
- at der, med aktuelle energipriser og afgifter, hverken er økonomiske fordele eller ulemper ved et teknologiskift.
- at ohmsk opvarmning, hvis anvendt i kødindustrien, byder på markante besparelser i bemanning, tidsforbrug, vedligehold og rengøring.
- at pilotanlæggets temperaturstyring ikke virker tilfredsstillende og kræver mindre ændringer. Konsekvensen har været, at det i nærværende projekt ikke har været muligt at dokumentere temperaturhomogenitet i de varmebehandlede kødprodukter.
-

Effekt, perspektivering og videre anvendelse

Projektets hovedresultat er, at der, så vidt det vides, er bygget verdens første pilotanlæg til kontinuerlig kogning af faste produkter med ohmsk opvarmning. Afprøvningen af anlægget har, i overvejende grad, givet resultater, der bekræfter, at det er muligt at koge kødprodukter ved brug af ohmsk opvarmning.

Projektets begrænsning har været, at der viste sig at være problemer med anlæggets temperaturstyring, hvorfor det ikke endeligt har været muligt at demonstrere, at der kan opnås en homogen varmfordeling i produktet og dermed ikke en tilstrækkelig mikrobiologisk sikkerhed ved varmeinaktivering. Der er således ikke udviklet et endeligt produkt, der kan sendes på markedet efter projektet.

Projektet har dog demonstreret potentiale i en sådan grad, at der har kunne samles et konsortium af Teknologisk institut, DTU og 5 store danske virksomheder (Danish Crown, DAKA, FF Skagen, Fermentation Experts og Alflow), der i fællesskab har søgt og fået bevilliget et Grand Solution-projekt af Innovationsfonden. Flere af disse virksomheder er storforbrugere af energi og er blandt dem, der risikerede begrænsninger i gas tilførslen under energikrisen i 2022. Ultimativt vil ohmsk opvarmning, ved fuld implementering, kunne halvere mængden af den energi, der anvendes til opvarmning i foder- og fødevarerindustrien, modsvarende 1500 TJ/år.

Hidtil har ingen udstyrsproducenter villet udvikle teknologien uden sikkerhed for afsætning, og ingen fødevarerproducenter har villet ordre teknologien, før den har bevist sit værd i praksis. Eلفorsk-projektet har derfor bidraget til, at producenter og aftagere er kommet hinanden nærmere og lagt grunden til det bevilligede Grand Solution-projekt. Det er forventningen og forhåbningen, at Eلفorsk- og Grand Solution-projekterne ultimativt vil demonstrere potentialet i ohmsk opvarmning i en sådan grad, at danske foder- og fødevarerproducenter implementerer teknologien. Ud over reduceret energiforbrug og bedre bæredygtighed muliggør ohmsk opvarmning markante besparelser på mandetimer, kapacitetsbelastning, lagerbinding samt vedligehold og afskrivning på kogeskabe; alle faktorer, der bidrager til implementering.

Formidling af resultater

1. Vestergaard C. "Ohmsk opvarmning kræver mindre energi – og gas. [Fødevaremagasinet nr. 10 november 2022.](#)
2. Nersting L., Vestergaard C. Ohmsk varmebehandling af kødprodukter hjælper den grønne omstilling. [Elfokus, maj 2022.](#)
3. Nersting L., Vestergaard C. Ohmsk varmebehandling af kødprodukter er energieffektivt. [Fødevarefokus, maj 2022.](#)
4. Malmberg A. Ohmsk varmebehandling af kød er et klimavenligt alternativ. [Klimafokus, april 2022](#)
5. [LinkedIn Teknologisk Institut: Fremtidens fødevarer. April 2022.](#)
6. Kaasen, M. O. Med Ohm kan gas fordrives. [Maskinmesteren nr. 9. 09.2022.](#)
7. Vestergaard C.: "[Elforsk sætter strøm til pølserne](#)". Indlæg på Energy Cluster Denmark's netværksmøde "InnoNet Energieffektivitet".

Referencer

Ares, G., Bruzzone, F., Vidal, L., Cadena, R. S., Giménez, A., Pineau, B., et al. (2014). Evaluation of a rating-based variant of check-all-that-apply questions: Rate-all-that-apply (RATA). *Food Quality and Preference*, 36, 87–95.

Energistyrelsen (2020): [CO₂-emmissionsfaktorer og standardenergi priser](#).

Energistyrelsen (2021): [Nøgletal om energiforbrug og forsyning](#).

Bilag 1

Samlede lister over sensoriske egenskaber

Samlet liste over sensoriske egenskaber for sandwichskinke

Udseende:	Smag	Lugt	Tekstur
Lyserød farve	Metal	Kogt sandwichskinke	Mørhed
Mængden af huller	Umami	Saltagtig	Fedt mundfornemmelse
Fugtig overflade	Salt	Syrlig	Sammenhængende
Sammenhængende struktur	Syrlig	Bilugt	Kogt æggehvite
Grov struktur	Sød		Gummiagtig
	Bitter		Smuldrende
	Smagen af fedt		Grynet
	Kemisk smag		Trevlet
	Bismag		Tyggetid
	Fasthed		Tyggerest
	Saftighed		

Samlet liste over sensoriske egenskaber for kødpølse

Udseende	Smag	Lugt	Tekstur
Rosa farve	Kødpølse	Kødpølse	Fasthed
Brun farve	Metal	Saltagtig	Saftighed
Mængden af huller	Umami	Syrlig	Mørhed
Fugtig overflade	Salt	Krydret	Fedt mundfornemmelse
Sammenhængende struktur	Syrlig	Bilugt	Sammenhængende struktur
Grov struktur	Bitter		Kogt æggehvite
	Smagen af fedt		Gummiagtig
	Krydret		Smuldrende
	Kemisk		Grynet
	Bismag		Trevlet
			Tyggetid
			Tyggerest