



Slutrapport

SAF 72 AP1 Nondestruktiv proceskontrol af kernetemperatur

Projektperiode: 2022

13. marts 2023

Proj.nr. 2009613

Version: 1.0

GLN/MT/DBN

Baggrund

Korrekt styrede opvarmnings- og afkølingsprocesser er kritiske for produktudbytter, -kvalitet og fødevarerikkerhed. Korrekt opvarmning er centralt i mange industrielle kødforædlingsprocesser. Opvarmningsprocesser som kogning, stegning og bagning virker typisk fra produktets yderside; derfor vil den laveste temperatur i produktet typisk findes i kernen. Den mest kritiske parameter for opvarmningsprocesser er derfor produktets kernetemperatur. Det er vigtigt at opnå en præcis kernetemperatur og holde den i den påkrævede tid for at sikre udbytter, optimal fødevarerikkerhed og sensorisk kvalitet af produktet. Nedkølingen, dvs. produkttemperaturens fald over tid, af såvel ferske som forædlede kødprodukter er vigtig for holdbarheden og fødevarerikkerheden. Der er fx krav til maksimale kerne- og overfladetemperaturer samt til temperaturudviklingen i forbindelse med transport af ferske produkter fra slagteriet. Kontrol af korrekt temperatur og temperaturudvikling håndteres i dag manuelt vha. stikprøver med indstikstermometre og vha. temperaturloggere. Med udviklingen inden for termografi, hvor udstyrsprisen er gået ned, og præcisionen er høj, er der grundlag for at undersøge muligheden for automatiseret 100% kontrol af temperaturforhold i både opvarmnings- og nedkølingsprocesser.

Overordnet projekt-mål

At udvikle en udstyrløsning til non-destruktiv kontrol af temperatur, som kan anvendes ved slagterierne.

Målgruppen

Slagterierne.

Valg af case (analysefasen)

Projektets første milepæl var at opsætte en række cases, hvor der var potentielle til at udvikle en værdiskabende nondestruktiv proceskontrol af temperatur for både varme og kolde produkter. I samarbejde med branchen identificerede projektet blandt andet følgende mulige cases:

1. Opvarmning på/efter stegelinje/-bånd. Produkter bevæger sig på et transportbånd forbi en række varmelegemer for at blive tilberedt. Ved at overvåge produkternes overfladetemperatur til en eller flere tider tænkes det at kunne identificere produkter med afvigende temperatur, der er for høj eller lav. Baseret herpå kunne tilberedningsprocessen optimeres.
2. Under batchopvarmning i kogeskab. Overvågning af temperaturen af produkter under en opvarmningsproces i ovn eller kogekar vil give mulighed for at identificere coldspots, produkter med afvigende temperatur og eventuelt at justere temperaturprofilen under processen.

3. Udligningstid/temperatur af slagtekroppe. Hvis opholdstiden i udligningsrummene afkortes, vil der kunne opnås en højere kapacitetsudnyttelse af de eksisterende anlæg. EU-forordning 2017/1981 kræver dog dokumentation for den efterfølgende proces.
4. Overvågning af opvarmning på skærelinjer. Produkterne vil være udlignet til den rigtige temperatur ved start af opskæringen, men afhængig af forløbet gennem produktionen kunne der opstå temperaturvariationer, inden pakningen gennemføres.

Projektets styregruppe vurderede, at der var størst potentiale til værdiskabelse for case 3. Derfor blev denne case udvalgt til det videre arbejde i projektet.

Værdiskabelsen

Den potentielle værdiskabelse ved en måleløsning til termisk proceskontrol i forbindelse med tidlig opskæring kan opdeles i fire kategorier:

- Bedre udnyttelse af fabriksfaciliteter. I dag gennemføres der en fuld udligning af slagtekroppene, efter disse er blevet skalafkølet igennem køletunnellen. Dette kræver en opholdstid på 22 timer i et udligningsrum. Hvis opholdstiden i udligningsrummene afkortes, vil der kunne opnås en højere kapacitetsudnyttelse af de eksisterende anlæg. En reduktion i udligningstiden på 5 timer fra 22 timer til 17 timer svarer til en kapacitetsforøgelse på 20-25%, uden at udvide kølekapaciteten. Dette vil betyde, at slagtekapaciteten som minimum kan øges fra fx 840/time til 1.050/time i det samme køleanlæg. Hurtigere opskæring vil give et bedre og mere fleksibelt flow på slagterierne. Da de enkelte slagtekroppe vil befinde sig kortere tid i udligningsrummene, vil det være lettere at gennemføre sorteringer ift. relevante kvalitetsparametre, samtidig med at der sikres tilstrækkelig udligning.
- Dokumentation i forhold til EU-krav. Temperaturmålinger fra systemet vil kunne understøtte eventuelle udvidede dokumentationskrav, der kan komme ved en overgang til tidlig transport ift. EU-forordning 2017/1981.
- Mere effektiv egenkontrol. Temperaturmålinger fra systemet har potentiale til at kunne assistere egenkontrollen og evt. reducere dens arbejdsbyrde. I samspil med egenkontrollen vil systemet sandsynligvis kunne reducere antallet af manuelle målinger, der skal udføres.
- Yderligere overvågning af produktion. Temperaturmålinger fra systemet vil give mulighed for overvågning af køle kvaliteten i køletunnellen. Der vil gradvist finde en tilisning sted under drift af køletunneller, som kan nedsætte deres effektivitet. Omfanget af dette vil kunne overvåges ud fra systemets temperaturmålinger. Bedre dokumentation af afkølingskvaliteten frem til kunden er desuden en relevant salgsparemet over for visse typer af kunder. Systemet kan fx anvendes til at finde outliers ifm. køling og dermed facilitere højere fødevarer sikkerhed og -kvalitet.

Overvejelser i idéfasen

Baseret på kravene til det ønskede målesystem er det muligt at opdele systemets funktionalitet i de følgende to vigtigste delfunktioner:

- Estimering af temperaturprofil. Systemet skal estimere en eller flere temperaturprofiler i delstykkerne; primært for at opfylde kravet om bestemmelse af kernetemperaturen ved transportstart, og eventuelt for at bidrage med input til den efterfølgende estimering af udligningstemperaturen.
- Estimering af udligningstemperatur. Systemet skal kunne estimere udligningstemperaturen af delstykkerne, efter disse har gennemført en periode af transporten.

For hver af disse delfunktioner har projektet gennemført en idé- og state-of-the-art-analyse med henblik på at identificere de mulige teknologiske deloplysninger, som en endelig måleløsning vil kunne benytte sig af.

Flere forskellige metoder vil være i stand til at estimere temperaturprofiler med forskellige typer af rumlig opløsning. Blandt de vigtigste identificeret af projektet kan nævnes følgende:

- Infrarød og nær-infrarød spektroskopi. Denne metode baseres på, at vibrationsabsorptionsbåndene fra vand forskydes til længere bølgelængder, når temperaturen sænkes i et materiale. Denne effekt kan udnyttes til at prædiktere temperaturen af et materiale ud fra en given kalibreringsmodel af materialets opførsel.
- Pyrometermåling. Et objekt vil altid afgive varmestråling som følge af den termiske bevægelse af dets stofpartikler. Denne stråling kan anvendes til at estimere objektets overfladetemperatur. I praksis vil det typisk være den totale intensitet af den infrarøde stråling, som anvendes til at bestemme overfladetemperaturen, selvom en spektral opløst måling også er mulig.
- Termografisk kamera. Dette er i princippet samme metode som pyrometermålingen, men hvor pyrometret typisk måler gennemsnitstemperaturen inden for et område, anvendes her en 2D-sensor, som giver et billede af objektets overfladetemperatur. Dette giver den fordel, at temperaturfordelingen over et større område kan observeres.
- Akustisk måling. Lydens hastighed igennem et objekt vil også afhænge af objektets temperatur. I princippet vil måling af denne derfor også kunne anvendes til at estimere et objekts temperatur.
- Tidsmåling og proceskontrol. Det er også muligt at forestille sig en indirekte metode til estimering af produkttemperatur, der baserer sig på en meget velkontrolleret afkølingsproces. Ved at kende tiden efter køleprocessen er gennemført, og eventuelt en række andre fysiske parametre for produktet, kan man estimere den efterfølgende temperaturprofil i produktet ud fra en række tidligere gennemførte referencemålinger.

Som den anden delfunktionalitet skal løsningen være i stand til at estimere udligningstemperaturen efter fx maksimalt 16 timers transport. Følgende punkter beskriver en række af de vigtigste metoder til at udføre dette estimat identificeret af projektet:

- Direkte måling med en trådløs indstiksprobe. Ved denne løsning sættes en eller flere indstiksprober i delstykkerne, umiddelbart inden transporten starter. Proberne vil kunne kommunikere deres resultater direkte til en ekstern server via et indbygget mobilt modem eller til en central enhed monteret på transportkøretøjet. Udlæsningen fra disse prober vil da direkte kunne anvendes til at bevise, at den ønskede temperatur er blevet opnået.
- Delstykkeattrap. Denne metode er en variation af forrige løsning, hvor der i stedet anvendes en attrap, der vil gennemgå den samme køleproces som delstykkerne. Attrappen placeres et eller flere steder mellem delstykkerne under transporten. Attrappen vil have en konstruktion, der gør, at den har samme termiske opførsel som de rigtige delstykker. Indbygget i den vil der være en række termiske prober, som kan anvendes til at overvåge udligningstemperaturen til et givent tidspunkt.
- Termografisk overvågning under transport. Denne løsningsmetode vil anvende en række termografiske kameraer, som monteres i kølevognen under transporten. Ud fra disse ville det være muligt at måle overfladetemperaturen af delstykkerne. Disse målinger ville da kunne anvendes til at vurdere, om delstykkerne er fuldt udlignede.
- Prædiktion ud fra geometri, materialer og starttemperatur. Idéen bag denne metode er at benytte sig af en termisk prædiktionsmodel, der som input anvender en termisk profil, der er estimeret på hvert delstykke, inden transporten starter og evt. suppleret med yderligere information om delstykkets vævssammensætning og geometri. Modellen vil da anvende en kalorimetrisk betragtning til at estimere den tilsvarende udligningstemperatur for delstykket.

Af de beskrevne metoder udmærker en løsning sig, hvor der måles en termografisk profil af snitfladen på delstykkerne, og der anvendes en prædiktionsmodel til at forudsige udligningstemperaturen ud fra denne profil. Derfor valgte projektet at arbejde videre med denne metode i metodefasen.

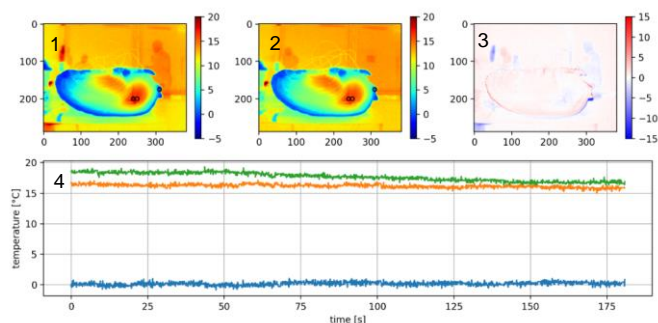
Udvikling af målemetoden

Først gennemførte projektet et pilotforsøg, der havde til formål at afprøve princippet bag idéen, der benytter sig af den termografiske profil af delstykkerne lige efter tredelingen som basis for en termisk overvågning. Det vurderes at være særligt informativt at udføre en termografisk afbildning netop her, da det giver adgang til en væsentlig større del af den temperaturvariation, grisen har, end hvis den overvåges på overfladen.

Forsøget blev gennemført i pilot plant på DMRI. To halve grise blev placeret i et kølerum med en lufttemperatur på -20°C , og der blev placeret 4 blæsere omkring disse for at simulere et kunstigt køletunnelforløb (figur 1). Bemærk, at dette vil være en væsentlig mindre effektiv afkøling end den, der finder sted i en rigtig køletunnel. Efterfølgende blev de to halve grise tredelt, og de termografiske profiler målt. Figur 2 viser de termografiske profiler, som blev målt lige efter tredeling.



Figur 1. Simuleret køleforløb anvendt i pilotforsøg.

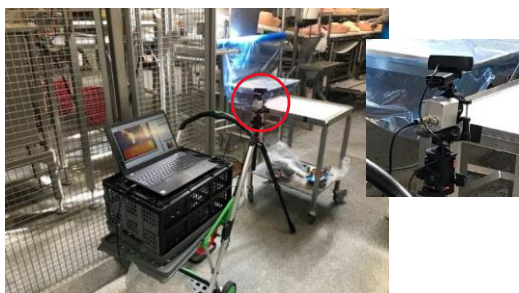


Figur 2. Termografiske profiler lige efter tredeling (1) og efter 175 sekunder (2). (3) viser forskellen mellem profil (1) og (2). De tre kurver (4) viser tidsforløbet af temperaturen i områderne markeret med de tre sorte cirkler (1+2).

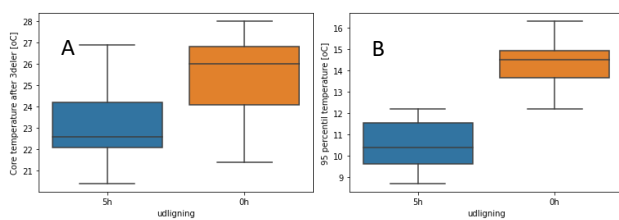
Pilotforsøget viste, at det er muligt at lave en termografisk afbildning af snitfladen på delstykkerne efter en tredelingsproces. Målingen viste sig at være stabil inden for måleusikkerheden i en periode på 50 sekunder efter overskæringen.

Dernæst blev metoden afprøvet på det ene af projektets værtsslagterier for at undersøge dens stabilitet og afklare eventuelle måletekniske udfordringer forbundet med den. Forsøget havde også til formål eksperimentelt at undersøge sammenhængen mellem temperaturprofilen af snitflader på delstykker efter tredeling og den tilsvarende kerntemperatur. En sådan sammenhæng vil være første skidt til at udvikle en måleløsning til dokumentation af tilstrækkelig nedkøling i forbindelse med transport inden fuld udligning.

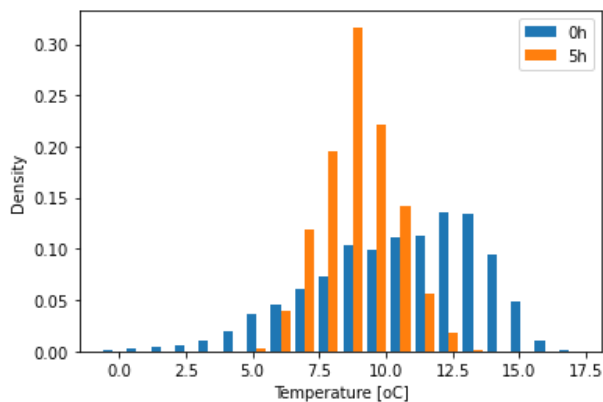
Forsøget anvendte to grupperinger. Der blev udvalgt 22 grise til gruppe "0h" og 22 grise til gruppe "5h". Grisene i gruppe "5h" blev udlignet omkring 5 timer inden tredeling, og grisene i "0h" blev ført direkte fra køletunnellen til tredelingen. Umiddelbart efter tredelingen blev kerntemperaturen målt på hvert skinkedelstykke med en indstiksprobe. Efterfølgende blev skinkerne samlet i en vogn og transporteret til en opstilling, hvor de termografiske profiler blev målt. Se den anvendte måleopstilling i figur 3.



Figur 3. Overblik over måleopstilling med computer på vogn og termisk kamera på stativ, et webkamera er monteret oven på det termiske kamera for at få mere information.



Figur 4. A: Resultaterne fra referencetemperaturmålinger, der blev foretaget af kerntemperaturen. B: Tilsvarende temperaturestimer fra de udvalgte pixelområder på snitfladeprofilerne.



Figur 5. Den totale fordeling af temperaturen af de udvalgte pixelområder for alle de målte skinker for de to grupper af udligningstider.

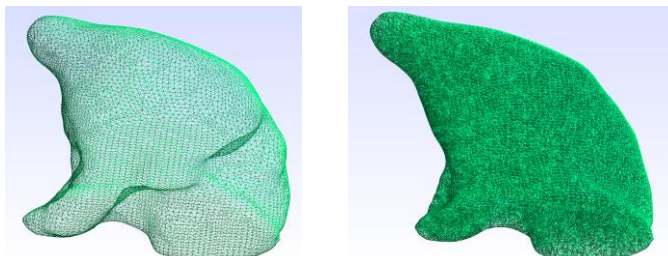
Forsøget viste en betydelig separation af de to grupper af udligningstider. Fx ses det tydeligt, hvordan fordelingen i figur 5 bliver centreret om en gennemsnitstemperatur med lavere densiteter af både høje og lave temperaturer. At der observeres en tilsvarende, men dog lidt forskudt separation i kerntemperaturerne, indikerer metodens potentiale som en målemetode til termografisk kontrol (se figur 4).

FEM-simulering af termiske profiler

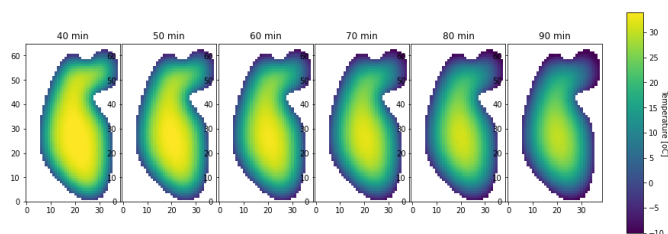
Projektet gennemførte simuleringer, der primært havde til formål at påvise en teoretisk sammenhæng mellem udligningstemperaturen af skinkedelstykker og temperaturprofilen af deres snitflader umiddelbart efter tredelingen. Denne sammenhæng vil kunne danne basis for en måleløsning til dokumentation af tilstrækkelig nedkøling i forbindelse med transport inden fuld udligning.

En fordel ved at undersøge denne sammenhæng teoretisk via FEM-baseret simulering er, at det er muligt at undersøge, om der findes en fundamental sammenhæng ved at fastlåse alle parametre relateret til geometri, materialsammensætning og nedkølingsforløbet, der vil kunne reducere den ønskede korrelation. FEM-simuleringer giver desuden mulighed for at undersøge de individuelle effekter af kilder til variation, der normalt vil være svære at styre eksperimentelt.

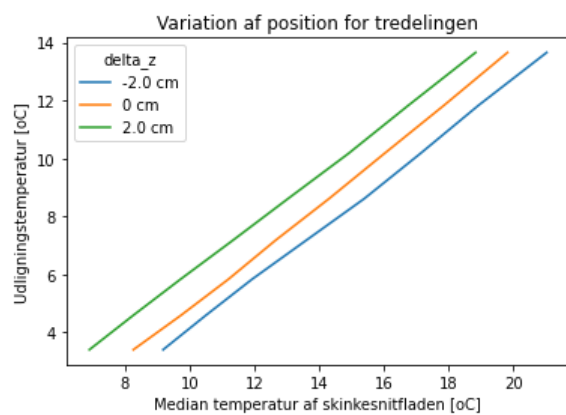
Simuleringerne gennemføres ved at finde numeriske løsninger af varmeligningen med open source finite element solver. De numeriske simuleringer blev defineret ud fra tre delelementer: (1) geometrien af det domæne, simuleringen gennemføres på, (2) den termiske diffusivitet af hvert del element i dette domæne og (3) randbetingelserne, der beskriver domænets interaktion med omgivelserne. Til at estimere en typisk geometri af en skinke anvendes en CT-skanning af en midtflækket gris, der blev segmenteret og trianguleret. Se figur 6 for resultatet heraf.



Figur 6. Det endelige resultat af triangulering af en skinnes geometri fra en CT-skanning.

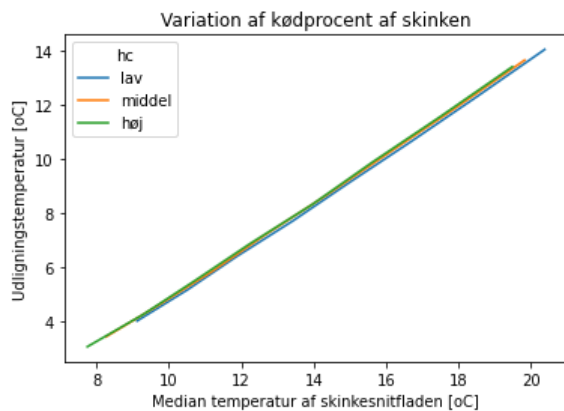


Figur 7. Simulerede termiske profiler af snitfladen på skinnesiden lige efter tredelingen for varierende tid i køletunnelen.



Figur 8. Sammenhæng imellem den simulerede mediantemperaturen af snitfladen på skinken lige efter nedkølingen som funktion af tilhørende udligningstemperatur. Variation af positionen af tredelingen angivet med delta_z, hvor 0 svarer til den anatomisk optimale position, -2 svarer til en to centimeter kortere skinke, og +2 svarer til en 2 centimeter længere skinke.

Kommenterede [MT1]: Sammenhæng mellem mediantemperaturen og hvad?



Figur 9. Sammenhæng imellem den simulerede mediantemperaturen af snitfladen på skinken lige efter nedkølingen som funktion af tilhørende udligningstemperatur med variation af materialesammensætningen af grisen, hvor middel svarer til en kødprocent på 62%, lav svarer til 52%, og høj svarer til 72%.

Kommenterede [MT2]: Sammenhæng mellem mediantemperaturen og hvad?

Kommenterede [MT3]: Kan man sige det om en gris?

Ud fra figur 7 ses en tydelig sammenhæng mellem mængden af køling og temperaturprofilen af snitfladen. Som forventet ses mere afkøling af overfladen, jo længere køling der foretages. Mere interessant er det, at kurverne i figur 8 viser en lineær sammenhæng imellem den simulerede mediantemperaturen af snitfladen på skinken som funktion af den tilhørende udligningstemperatur. Simuleringer bekræfter dermed, at der kan findes en korrelation imellem den simulerede snitfladetemperatur på skinken som funktion af den tilhørende udligningstemperatur. Der observeres en forskydning af denne korrelation, hvis placeringen af snitfladen rykkes, så skinken bliver 2 centimeter kortere eller længere, hvorfor dette kunne være en væsentlig fejlkilde for metoden. Omvendt antyder modellen ikke, at der ses nogen betydelig effekt på den ønskede korrelation, hvis kødprocenten varieres med plus/minus 10 procentpoint i forhold til en normalværdi.

Kommenterede [MT4]: Sammenhæng mellem mediantemperaturen og hvad?

Prædiktion af udligningstemperaturen

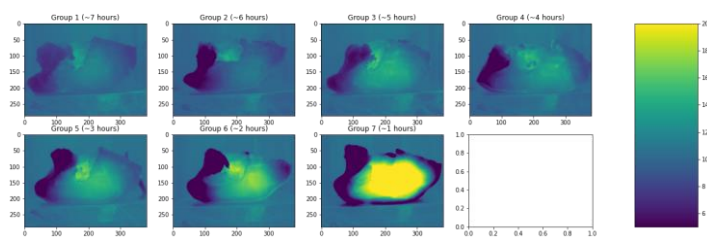
Til slut udførte projektet et forsøg, der havde til formål eksperimentelt at undersøge sammenhængen mellem temperaturprofilen af snitflader på delstykker efter tredeling og den efterfølgende udligningstemperatur. En sådan sammenhæng ville kunne udnyttes til at udvikle en måleløsning til dokumentation af tilstrækkelig nedkøling i forbindelse med transport inden fuld udligning.

For at undersøge sammenhængen mellem temperaturprofilen og udligningstemperaturen var det nødvendigt at lave et eksperimentelt design, hvor der opnås variation i udligningstemperaturen. Dette blev gjort ved at inddele forsøget i en række grupper, hvor grise gradvist udlignes i kortere tid, hvorved der gradvist fjernes mindre varme fra skinkedelstykket, som forsøget beskæftiger sig med. Ved efterfølgende at lave en adiabatisk udligning vil der være varie-

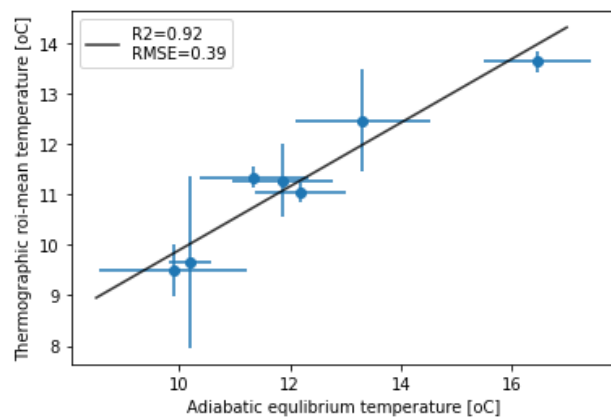
rende mængder varme i skinkedelstykker og dermed varierende udlignings-temperaturer. Det vil typisk være den samme proces, der fører til variationer, som skal håndteres ifm. transport af ikke fuldt udlignede delstykker.



Figur 10. Opstilling anvendt til at udføre den termografiske måling.



Figur 11. Termografiske profiler af de 7 anvendte grupperinger.



Figur 12. Sammenhæng mellem den adiabatiske udligningstemperatur og mediantemperaturen af målte termografiske profiler for de 7 grupperinger.

Resultaterne fra de målte termografiske profiler af de 7 anvendte grupperinger fremgår af figur 11. I figur 12 er mediantemperaturen af ROI på snitfladerne blevet plottet som funktion af udligningstemperaturen. De angivne errorbars angiver en standardafvigelse af de tre målinger indenfor den tilhørende gruppe.

Det vigtigste resultat fra forsøget ses i figur 12, hvor der observeres en høj korrelation med en R^2 på 0,92 og en RMSE på 0,39 for en lineær sammenhæng imellem udligningstemperaturen og anvendt prædikator fra den termografiske profil inden for de 7 grupperinger. Denne sammenhæng giver en stærk indikation for, at det er muligt at udvikle en måleløsning til dokumentation af tilstrækkelig nedkøling i forbindelse med transport inden fuld udligning.

Konklusion/ Opsummering

Projektet har i samarbejde med branchen udarbejdet en liste af cases, hvor en non-destruktiv termisk overvågning kunne være værdiskabende, samt udvalgt den vigtigste af disse. Den udvalgte case har til formål at lave en måleløsning til termisk proceskontrol i forbindelse med tidlig opskæring, dels for at sikre bedre udnyttelse af produktionsfaciliteterne, dels for at understøtte eventuelle udvidede dokumentationskrav. Der blev gennemført en idé- og state-of-the-art-analyse og på basis heraf udvalgt en metode, hvor der måles en termografisk profil af snitfladen på delstykkerne, og hvor der anvendes en prædiktionsmodel til at forudsige udligningstemperaturen ud fra denne profil.

Først blev målemetodens princip afprøvet i DMRI's pilot plant, og dernæst blev den afprøvet på det ene af projektets værtsslagterier for at undersøge dens stabilitet. Dernæst udførte projektet en række FEM-simuleringer, der påviste en teoretisk sammenhæng mellem snitfladetemperaturen og udligningstemperaturen. Endelig blev denne sammenhæng også påvist eksperimentelt med en R^h på 0,92 og en RMSE på 0,39 på projektets andet værtsslagteri. Denne sammenhæng vil kunne danne fundamentet for at lave en færdig måleløsning i et eventuelt videre arbejde.

Kontaktinformation

Glenn Gunner Brink Nielsen
Mail: gln@teknologisk.dk