



TEKNOLOGISK
INSTITUT

PSO-Elforsk projekt 343-040

Energibesparelser på industrielle køle- tunneller ved reduktion af isopbygning på køleflader

Titel:

Energibesparelser på industrielle køletunneller ved reduktion af isopbygning på køleflader

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Køle- og Varmepumpeteknik

Juli 2015

Forfattere:

Lars Reinholdt
Jóhannes Kristófersson
Tage Petersen
Jens M. Würtz, DMRI
Uffe Borup, DMRI

Resumé

Nedkøling og indfrysning af uemballerede fødevarer vil i stor udstrækning afgive fugt til proces-luften, der efterfølgende afsættes på kølefladen som rim. Rimlaget vokser med tiden og er årsag til, at kølefladens effektivitet forringes i takt hermed. Et typisk eksempel på denne effektivitets-nedgang ses ved nedkøling af slagtede svin på svineslagterierne. Rimdannelsen på kølefladerne er så massiv, at det er nødvendigt at gennemføre en systematisk afrimning af fladerne for at holde effektiviteten på et acceptabelt niveau. Afrimningen foregår ved at opvarme hele kølefladen for at smelte rimlaget og efterfølgende bringe fordampereenheden tilbage til driftstemperaturen, hvilket er meget energikrævende. I litteraturen beskrives flere alternative systemer, fx mekaniske børste-metoder og trykluft-dyser, der er undersøgt for at finde en erstatning til varmgasafrimningen, men uden held. De mekaniske børstemetoder har tendens til at fryse fast ved stilstand, og trykluft er energikrævende, har for ringe renseseffektivitet og er problematisk ved lave temperaturer. Formålet med nærværende projekt er derfor at undersøge en mulighed for at påvirke rimdannelsen og alternative måder at fjerne rimen fra kølefladen.

Den grundlæggende idé har været at undersøge, om en keramisk belagt køleflades lameller påvirker rimdannelsen og tilrimning af kølefladen. Undersøgelsen er foretaget i laboratoriskala, hvor en køleflade i miniatureudgave er indbygget i en testopstilling, i hvilken procesparametrene kan varieres, således at forholdene bliver identiske med driftsforholdene i en køletunnel for svin. Testudstyr og fremgangsmåde er beskrevet detaljeret med flere illustrationer. Kølefladens opbygning veksler mellem ubelagte og tre forskellige keramiske belægnings af lameller hen over fladen. Den første test viste, at rimen – uventet – bygger op på lamelkanten og breder sig som en "pude" af sne, der efterhånden lukker kølefladen. Forsøgene viste også, at de keramiske belægnings ikke havde nogen reducerende effekt på tilrimningen. Forsøgene er gentaget, alle med samme resultat.

Laboratorietestens troværdighed er efterfølgende undersøgt på Tican Food slagteriet i Thisted. Denne undersøgelse af køletunnelfordampernes tilrimning viser, at rimen bygges op ud fra lamellernes kant, hvilket er identisk med laboratorieforsøgene. Denne viden har dannet grundlag for en efterfølgende undersøgelse af finnegeometriens indflydelse på rimdannelsen. En ny køleflade med forskellig finnegeometri vekslede mellem med og uden affasning og tre forskellige fase-vinkler blev laboratorietestet under samme konditioner som ved tidligere forsøg og viste, at det ikke var nogen fordel at skærpe finnekanten.

Da rimopbygningen foregår ud fra finnekanten, har det været oplagt at søge en løsning, hvor rimen fanges på et gitter foran kølefladen og fjernes mekanisk. De meget lovende resultater fra laboratorieforsøgene initierede en gennemførelse af et fuldskala-gitterforsøg på laboratoriet for at afprøve forskellige gitterkonstruktioner og forskellige metoder til at fjerne rimen på gitteret "at site".

Disse resultater førte til ønsket om en fuldskalatest af systemet på en køletunnelfordamper i drift. Testen blev gennemført på slagteriet Danish Crowns afdeling i Herning. Halvdelen af en køletunnelfordampers frontareal blev forsynet med rimfang, mens den anden halvdel fortsat var uden. Testen blev gennemført over to omgange. De opnåede resultater viste at ideen var god, men at både rimfangets konstruktion og opbygning skal optimeres på en

række punkter for at opnå den maksimale effekt. For at få et billede af, hvordan konstruktionen skal være for at fange mest rim, er rimfangets konstruktion analyseret ved at simulere strømningsforholdene omkring gitteropbygning med forskellige geometrier.

Konklusion

Laboratorietesten giver et retvisende billede af de reelle forhold for fordamperen i en køletunnel påvirket af varme, fugtige produkter.

Forsøgsresultaterne viser, at rimdannelsen foregår væsentligt anderledes end forventet, idet rimen primært sætter sig på finnespidserne og vokser op mod luftens strømningsretning.

Rimdannelsen er tilsyneladende ikke påvirket nævneværdigt af de anvendte nano-belægninger på finnerne, og det må derfor konkluderes, at belægningerne ikke er en brugbar løsning i dette tilfælde.

Det var forventet, at en ændring af finnens kantgeometri med en affasning ville reducere mængden af rim, der ville sætte sig, men resultatet viste det modsatte. Fænomenet er tillige analyseret ved hjælp af simuleringsprogrammet ANSYS for at belyse, hvordan strømningsbilledet varierer med dråbestørrelse og finnegeometri.

Et rimforfang til forsøgskøleren viste stor evne til at tilbageholde vanddråberne som rim og var meget villig til at slippe rimen igen ved vibrering.

De efterfølgende fuldskalaforsøg gav ikke entydige resultater i samme omfang men indikerer dog, at et rimfang foran en fordampers indsugningsåbning, frontarealet, har reducerende indvirkning på rimmængden, der sætter sig på fordamperfladen.

Fuldskalaforsøgene har klarlagt, at for at kunne definere det optimale rimfangs udformning/design med en funktionsduelig mekanisme til rimfjernelse, er der behov for at gennemføre flere undersøgelser/forsøg for at kunne udvælge den optimale maskestruktur/konstruktion og den tilhørende mekanisme og metode til at få rimen til at slippe rimfanget.

Indholdsfortegnelse

1. Baggrund	6
2. Rimdannelse	7
3. Funktionelle overflader	7
4. Test-setup	8
5. Resultater af første test	11
6. Troværdigheden af laboratorietesten	13
7. Konklusion af første forsøg	15
8. Rimdannelse i køletunneler med varme, fugtige produkter	16
9. Finnegeometri	17
10. Løsninger til fjernelse af rim på køleflader.	20
11. Fuldskala-gitterforsøg	23
12. Fuldskala-gitterforsøg nr. 1	26
13. Diskussion	29
14. Afskrabning/rengøring af gitter	30
15. Elektrostatisk filtrering	31
16. Fuldskala-gitterforsøg nr. 2	32
17. Delkonklusion	34
18. Samlet konklusion	35
Appendix 1	36

1. Baggrund

Ved produktion af frosne/kølede fødevarer opleves det, at produkterne afgiver fugt til luften i den anvendte køle-/frysetunnel, og at den afgivne fugt sætter sig på kølefladerne i form af sne eller rim og dermed forringer fladernes effektivitet. Dette fænomen opleves specielt, hvor fødevarerne ikke er emballeret under nedkølingsprocessen.

Et eksempel på en sådan situation findes på et svineslagteri, hvor de slagtede svinekroppe ned-køles ved gennemløb i en køletunnel med en lufttemperatur på typisk -20°C . Svinekroppene har en overfladetemperatur på $+20^{\circ}\text{C}$ eller derover, og er typisk ret fugtige. Ved mødet mellem de varme kroppe og den kolde luft ses ofte, at der ligefrem opstår en tåge af fugt, der efterfølgende føres med luftstrømmen ind på kølefladen. Denne situation er derfor brugt som case i dette projekt, og slagteriet Tican, Thisted har sammen med slagteriet Danish Crown, Herning deltaget som delvist test sites.

For at bringe kølefladernes effektivitet tilbage skal rimen fjernes, hvilket gøres ved at opvarme kølefladerne, så rimen smelter og løber væk som tøvand. Dette afstedkommer et energiforbrug, dels til opvarmning af fladerne og smeltning af rimen, dels til den efterfølgende nedkøling af fladerne og fjernelse af den varme, der er tilført rummet, hvori kølefladen sidder. Desuden tager selve afrimningsprocessen en del tid, hvor fladerne ikke er aktive i køleprocessen, og derfor mistes køleeffekt under nedkølingsprocessen.

Der har været forsøgt andre muligheder for at fjerne rimen fra fladerne, fx ved hjælp af trykluftdyser, der blæser rimen af overfladen¹, men ingen af metoderne er særligt udbredte.

Dette skyldes formentlig en kombination af faktorer som fx:

En løsning, hvor rimen fjernes rent mekanisk, bliver nemt kompliceret. Fx kræver ovennævnte løsning med trykluft også en mekanisk bevægelse, der sikrer, at hele kølefladen overstryges af trykluftdyserne. Desuden kan det give en ekstra udfordring, at den bevægelige mekanik skal fungere ved lave temperaturer (ofte under -20°C)

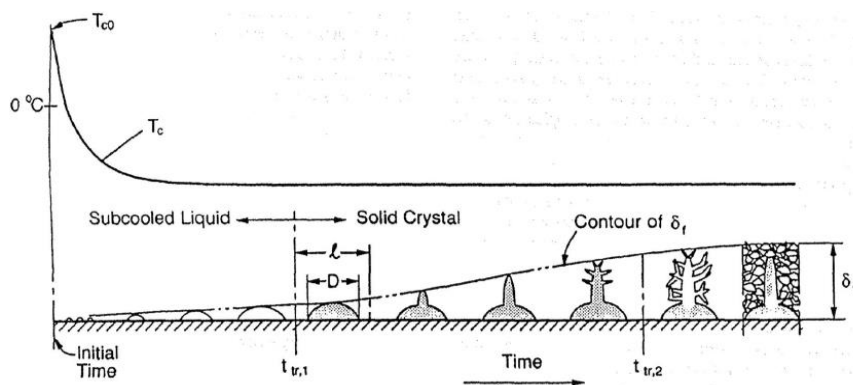
Når rimen fjernes på mekanisk vis ved hjælp af børster, trykluft eller lignende, kan det være svært at styre, hvor den fjernede rim ender. I mange tilfælde er det af hygiejnemæssige årsager vigtigt, at rimen ikke kan falde ned på produktet.

Formålet med dette projekt er derfor at undersøge en anden mulighed for at påvirke rimdannelsen og alternative måder at fjerne rimen på.

¹ Frigoscandia, US patent 4,570,447, ref: ..\Fagligt\Patenter\FrigoScandia-2.pdf

2. Rimdannelse

Når luften i en køle-/frysetunnel suges ind igennem en køleflade, vil luften afkøles, og den relative fugtighed stiger. Når den relative fugtighed når 100%, udkondenseres fugten som vil sætte sig på kølefladen som rim.



Figur 1: Rimdannelse på køleflade²

Er den relative luftfugtighed 100%, når luften rammer den kolde køleflade, vil kondensering og rimdannelse ske allerede på den første del af kølefladen. Er den relative fugtighed mindre, vil rimdannelsen starte senere, da luften først skal køles ned under dugpunktet, før den første udkondensering sker. Derfor forventes det, at den første del af kølefladen forbliver ren, mens rimdannelsen sker senere på kølefladen, hvis luftens relative fugtighed er lav.

3. Funktionelle overflader

Den grundlæggende ide bag dette projekt er at belægge kølefladerne med en belægning, der påvirker rimdannelsen. Der er et stort antal kendte belægningstyper, som beviseligt påvirker rim-dannelsen og/eller rimens vedhæftning til overflader. I dette projekt undersøges primært såkaldte sol-gel-belægninger, som er keramiske belægninger, der kan sprøjtes på en overflade og afhærdes ved høj temperatur.

Belægningerne har nogle fysiske karakteristika, der påvirker rimdannelsen:

- **Overfladespænding**

Når rimen dannes, vil det ofte starte som små, underkølede dråber, der er på flydende form, og som flyder ud på kølefladen (ref:..\Fagligt\Char of Frost Formation-copy.pdf), specielt hvis kølefladen er lidt ru eller korroderet, idet overfladespændingen da er af en natur, der kan få dråber til at flyde ud.

Hvis kølefladen belægges med en coating med meget høj overfladespænding, vil dråberne ikke så nemt flyde ud og får sværere ved at hæfte på kølefladen. Derved kan man opnå dels, at rimdråberne hænger mindre fast på fladen, dels måske undgå, at nogle af dråberne i det hele taget hæfter sig fast på fladen; med andre ord, at de blæser af fladen og føres bort med luftstrømmen.

² "Characteristics of frost growth on a flat plate...", Y. Tao, R. Besant

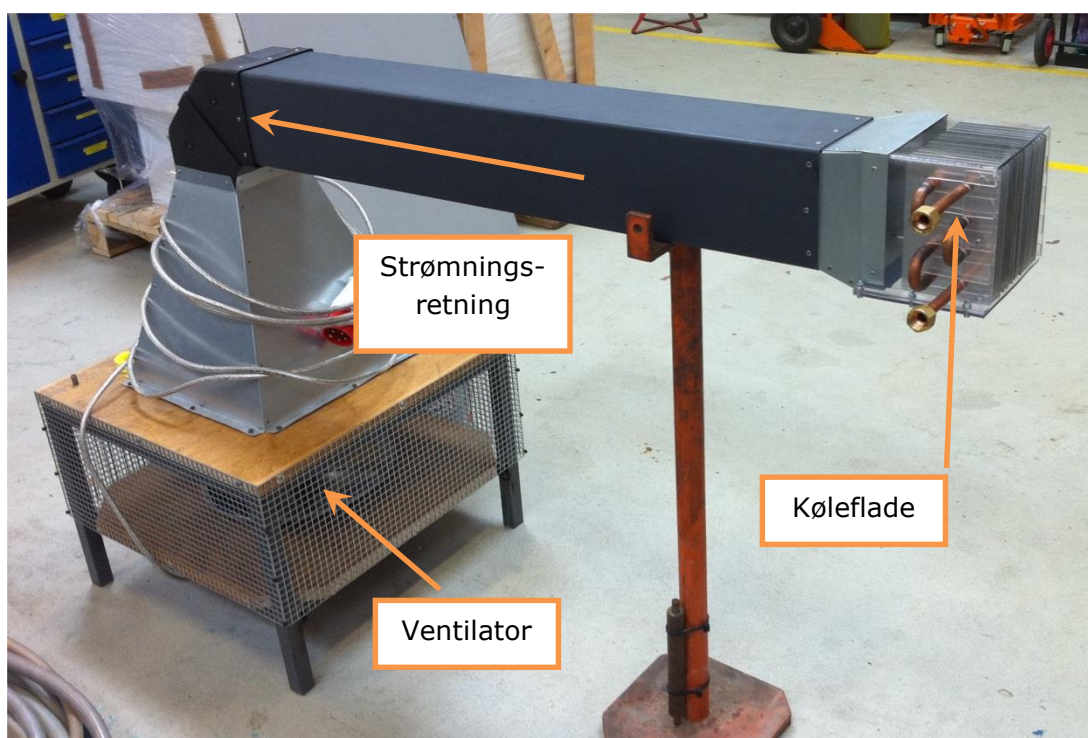
- **Overfladebeskaffenhed**

For at en underkølet rimdråbe skal begynde at fryse, skal der først dannes et iskim, hvorfra frysningen starter. Hvis overfladen, hvorpå dråben sidder, er meget blank og/eller har en krystalstruktur, der er meget anderledes end is, vil overfladen ikke kunne fungere som kimdanner, og dråberne vil have meget svært ved at fryse. Man kan derfor håbe på, at dråberne kan falde af uden at fryse fast, eller at de blæses bort af luftstrømmen, inden de fryser fast.

Der er således udført laboratorieforsøg med en køleflade i miniatureudgave. Kølefladen består af et antal kobberør, hvorpå aluminiumsfiner er krympet fast. Dette svarer nøje til den måde, hvorpå industrielle køleflader fremstilles. En del af kølefladens finer er behandlet med forskellige belægninger, dog med et antal ubelagte finer som reference.

4. Test-setup

På billede 1 ses den grundlæggende testopstilling. Kølefladen er monteret i et gennemsigtigt hus, således at rimdannelsen kan observeres, og luften suges gennem kølefladen af en meget kraftig centrifugalventilator, der blæser ud i det fri. Ventilatoren kan køre med variabel hastighed, og har vist sig at kunne producere lufthastigheder på op til 25 m/s gennem kølefladen (normal drift 3-5 m/s).



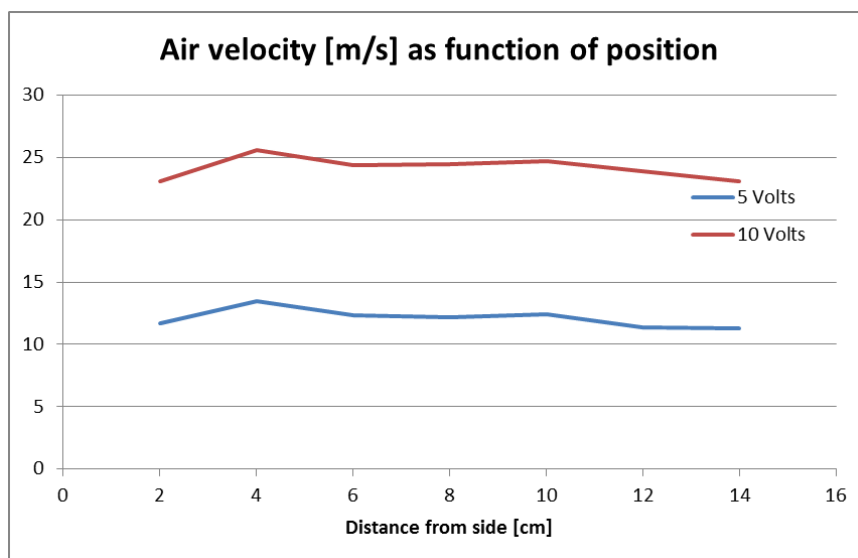
Billede 1: Grundlæggende testopstilling



Billede 2: Afrundet indløb monteret på testopstilling.

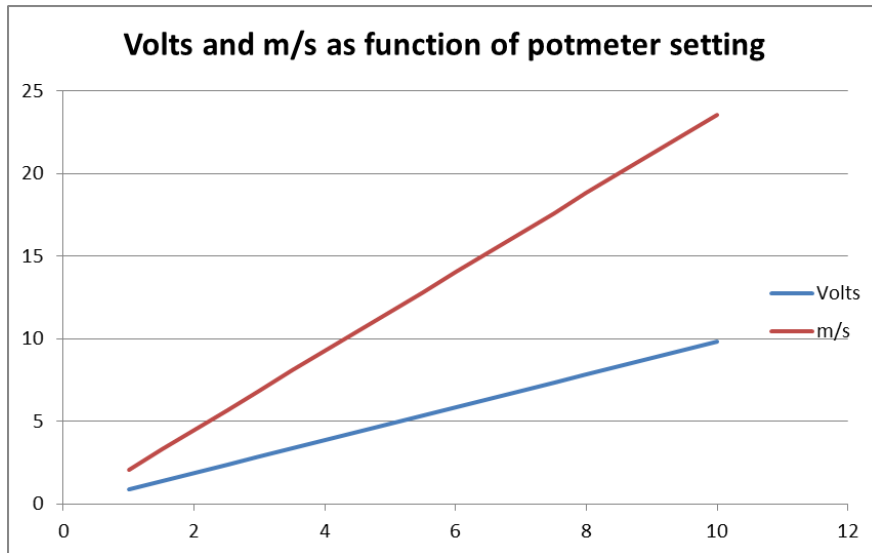
For at opnå en jævnt fordelt hastighedsprofil over kølefladen blev der monteret et afrundet indløb, som vist på billede 2. Dermed undgås, at eventuelle forskelle i rimdannelse kan skyldes forskelle i flow eller lufthastighed.

Figur 2 viser en måling af lufthastigheden midt for kølefladen i forskellig afstand til siden af kassen, hvor fladen er monteret. Målingen er lavet med to forskellige hastigheder, indstillet ved hjælp af et potentiometer med 0 – 10 Volt udgang. Som det ses, er hastighedsprofilen meget fladt.



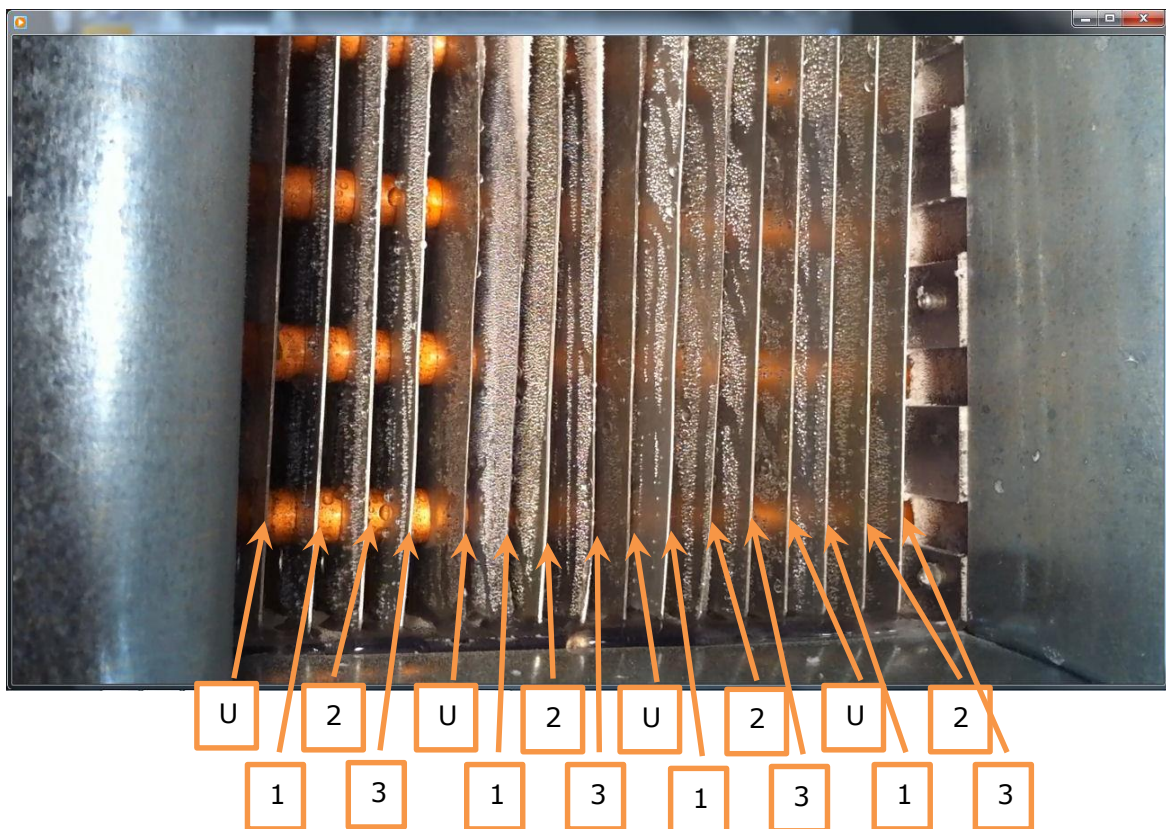
Figur 2: Måling af lufthastighed midt for køleflade i to forskellige hastigheder.

Tilsvarende viser figur 3 en måling af lufthastighed og udgangsspænding på potentiometeret som funktion af display-værdien på potentiometeret. Som det ses, er sammenhængen meget lineær.



Figur 3: Måling af lufthastighed og udgangsspænding på potentiometer.

Kølefladens finner er belagt som vist på billede 3.



Billede 3: Belægning af kølefladens finner: U = Ubelagt; 1, 2 og 3: Coating nummer.

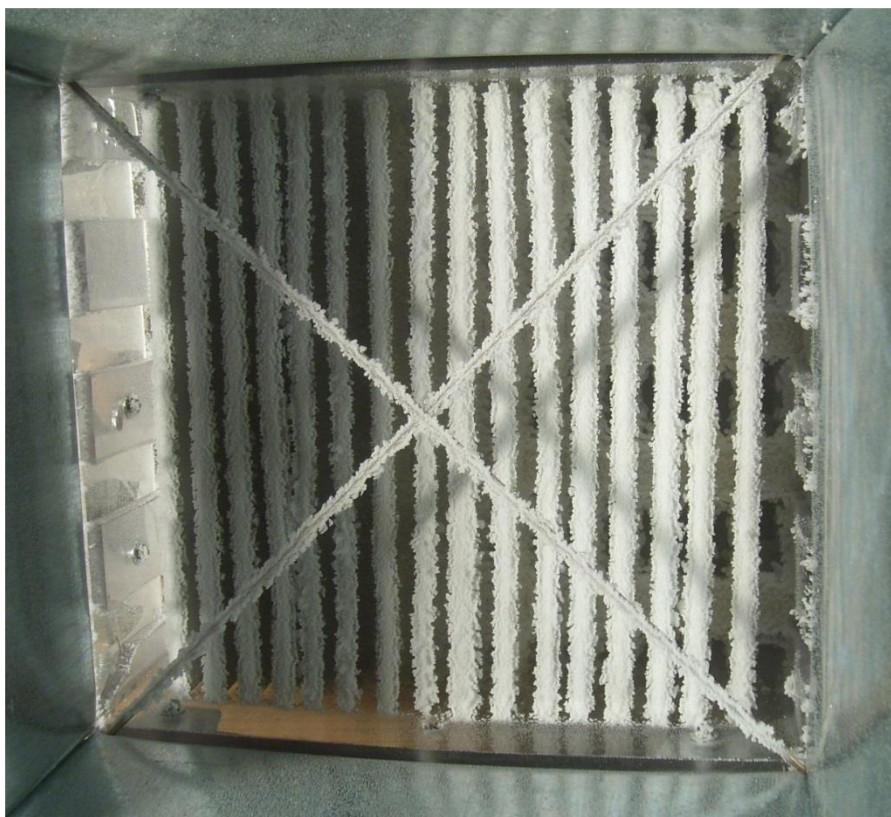
Under forsøgene blev hele opstillingen flyttet til et klimakammer, hvor der blev opretholdt en lufttemperatur på -25°C ved hjælp af et separat køleanlæg. Køleanlægget var forsynet med en meget kraftig blæser, der kunne give forhold svarende til det, man oplever i en frysetunnel på et svineslagteri.

Fugtigheden blev tilført ved hjælp af et vandkar med indbygget dyppekoger, anbragt i god afstand fra selve test-kølefladen. På grund af den kraftige blæst i klimakammeret blev den dannede damp meget hurtigt fordelt som en tynd tåge, hvor dampen ikke påvirkede lufttemperaturen nævneværdigt.

Test-kølefladen blev forsynet med CO_2 som kølemiddel i kobberrørene, ved en temperatur på -30°C .

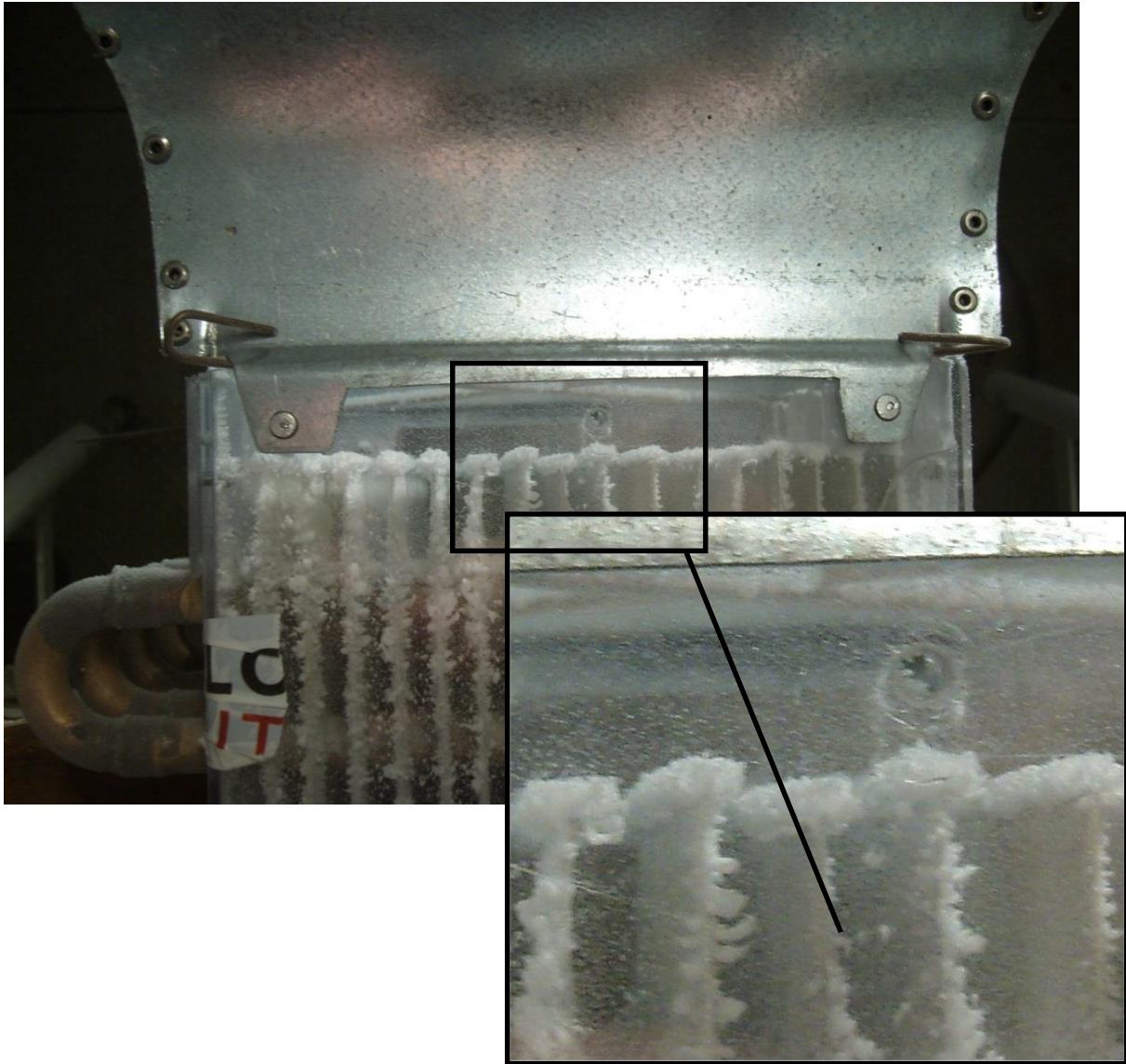
5. Resultater af første test

Billede 4 herunder viser test-kølefladen efter 30 minutters drift. Som det ses, er der ikke særlig stor forskel på rimdannelsen på de forskellige finner. Det ser således ikke ud til, at de tre typer coating har nogen nævneværdig effekt på rimdannelsen. Desuden bemærkes det, at der sidder et betydeligt rimlag på de to metaltråde, der er sat på tværs foran kølefladen. Disse to tråde er ikke afkølede; de har samme temperatur som luften, der passerer forbi på vej ind i kølefladen.



Billede 4: Kølefladen set forfra efter 30 minutters drift.

Endnu mere bemærkelsesværdigt er den måde, hvorpå rimen bygger sig op på finnerne. Billede 5 viser kølefladen set fra oven, gennem den gennemsigtige kasse.



Billede 5: Opbygning af rim på finnespidserne.

Som det ses, bygger rimen op på finnespidserne, og breder sig efterhånden som en "pude" af sne, der med tiden lukker fronten af kølefladen. Den indvendige del af kølefladen har kun en yderst begrænset mængde rim. Dog er der fanget en vis mængde sne i spalten mellem finnerne og den gennemsigtige kasse. Der er senere udført lignende forsøg, hvor der ikke er tilført kølemiddel til test-kølefladen. Rimopbygningen var her fuldstændig den samme, og det kan derfor konkluderes, at rimopbygningen ikke har noget at gøre med, hvorvidt kølefladens finner er koldere end lufttemperaturen eller ej. Dette stemmer også overens med rimopbygningen på de to metaltråde.

6. Troværdigheden af laborietesten

Der er udført en række laborietests med driftsforhold som ovennævnte, og alle med samme resultat. Da dette resultat ikke stemmer ret godt overens med det forventede (som beskrevet under "Rimdannelse"), er det naturligt at spørge, om man her måske har fået skabt nogle helt specielle forhold i klimakammeret, der giver et usædvanligt resultat, eller om de aktuelle driftsforhold faktisk stemmer med det, man ser i frysetunneler påvirket af varme, fugtige produkter.

Det blev derfor besluttet iagttage kølefladerne i en rigtig frysetunnel i eller umiddelbart efter drift. I dette tilfælde blev der set på køletunnelen på slagteriet Tican i Thisted. I praksis er det ikke muligt at komme ind i tunnelen under drift, så derfor blev afrimningscyklussen stoppet en time før produktionsstop, og tunnelen blev efterladt kold, så det var muligt at inspicere kølefladerne, sådan som de ville se ud under drift.

Billede 6 viser en køleflade, der i øverste højre hjørne er lukket til af sne, som udelukkende sidder på finnespidserne.



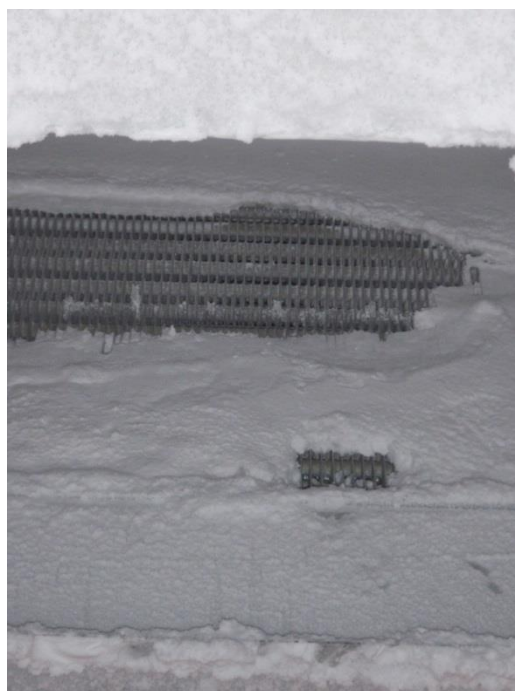
Billede 6: Køleflade fotograferet fra gulvet. Kølefladen sidder 3-4 m oppe under loftet over forskellige ståldragere, som bærer den conveyor, der fører de slagtede svinekroppe igennem tunnelen.

Tilsvarende forhold blev iagttaget på andre køleflader. Billede 7 viser en køleflade, der er lukket næsten helt til, bortset fra den midterste del. Årsagen er sandsynligvis en ujævn fordeling af luftflowet omkring kølefladen.



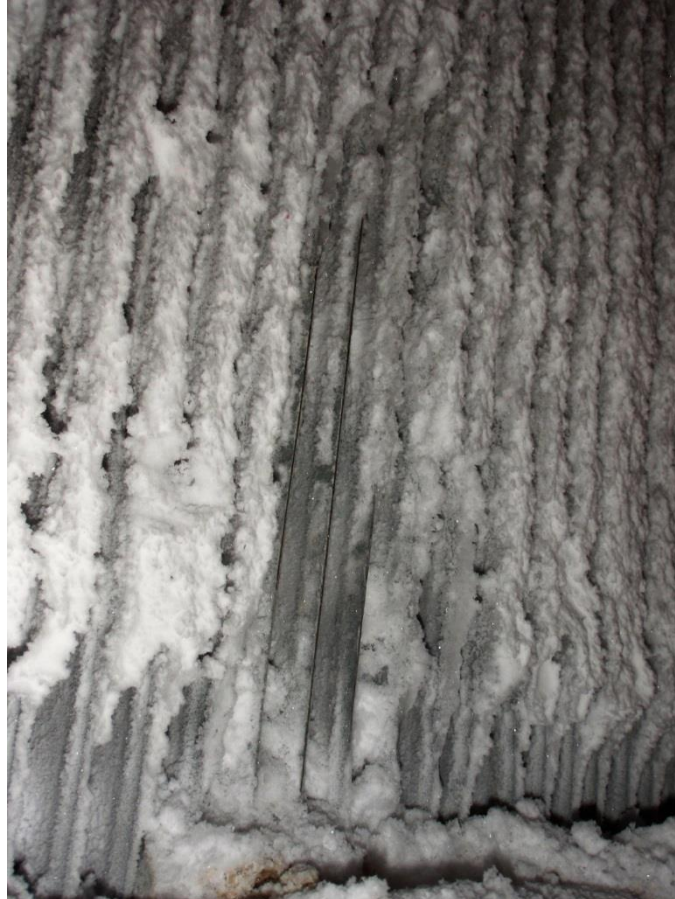
Billede 7: Køleflade, som næsten er tildækket af rim.

På billede 8 ses en del af den samme køleflade, hvor sneen er skrabet væk i en lille firkant. Som det ses, er der ingen nævneværdig sne eller rim inde i kølefladen; det sidder alt sammen uden på finnerne, og er vokset op på finnespidserne IMOD luftens strømningsretning.



Billede 8: Sne og rim findes primært på finnerne og ikke inde i kølefladen.

Endeligt viser billede 9 et nærbillede af finnespidserne på en køleflade, hvor enkelte finner er skrabet rene. Det ses her tydeligt, at rimen er vokset op primært imod strømningsretningen.



Billede 9: Rimen på finnerne er vokset frem imod strømningsretningen.

7. Konklusion af første forsøg

Konklusionen af de første forsøg er, at:

- Laboratorietesten giver et retvisende billede af de reelle forhold i en frysetunnel påvirket af varme, fugtige produkter.
- Rimdannelsen foregår væsentligt anderledes end forventet, idet rimen primært sætter sig på finnespidserne og vokser op mod luftens strømningsretning og ikke på finnernes overflade.
- Rimdannelsen tilsyneladende ikke er påvirket nævneværdigt af de anvendte belægninger på finnerne, og det må derfor konkluderes, at belægningerne ikke er en brugbar løsning i dette tilfælde.

8. Rimdannelse i køletunneler med varme, fugtige produkter

Baseret på forsøgsresultaterne er det naturligt at revidere opfattelsen af, hvordan rim dannes på kølefladerne i frysetunneler.

Det faktum, at rimen ser ud til at dannes på finnespidserne og vokse op mod strømningsretningen, kunne antyde, at fugten i luften er til stede i form af mikroskopiske dråber, der følger luftstrømmen og fryser fast, når de rammer en overflade; i dette tilfælde finnespidserne.

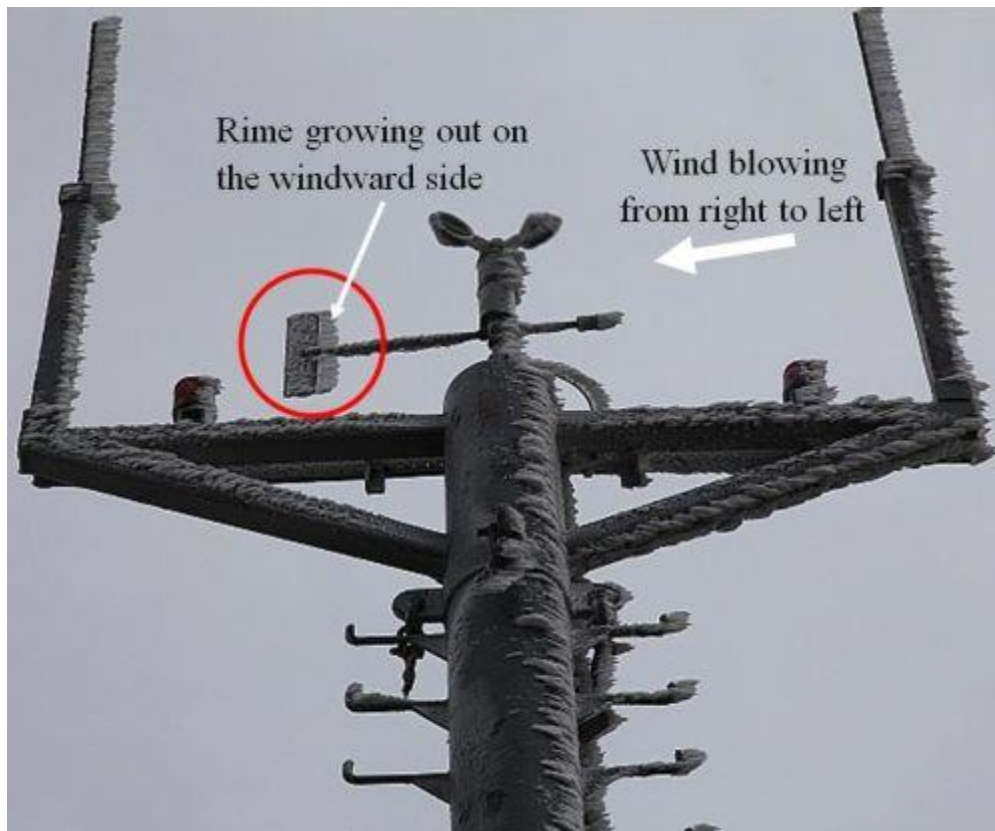
Rent regneteknisk kan dette bekræftes ved at se på luftmængder og den afgivne fugt fra svine kroppene. Det vides fra målinger, at svine kroppene har et kølesvind på cirka 1 procent. Der slagtes 740 svin/time, og hver svine krop vejer gennemsnitlig 82 kg. Dermed afgives **607 kg fugt/time \approx 0,17 kg/s**.

Ud fra målinger vides det, at luften, der suges ind i kølefladerne, typisk har en temperatur på -25°C . Antages en relativ luftfugtighed på 100% ved indgangen (helt mættet luft), og at al denne fugt sætter sig i kølefladen, kan det vurderes, hvor meget fugt kølefladerne kan optage: Der er i alt 24 køleflader med et frontareal på $2,6 \text{ m}^2$. Lufthastigheden er cirka 3 m/s , og dermed fås et flow på $187 \text{ m}^3/\text{s}$. Da massefylden ved -25°C er $1,4 \text{ kg/m}^3$, svarer det til 262 kg/s . Luft ved -25°C kan maksimalt indeholde $0,0003888 \text{ kg fugt/kg tør luft}$ ved 100% relativ luftfugtighed, og hvis al denne fugt afsættes, svarer det til **0,1 kg/s**.

Med andre ord afgives der næsten dobbelt så meget fugt, som luften kan bære i form af fugt på gasform, beregnet som et gennemsnit over hele tunnelen.

Ved indgangen, hvor de varme svine kroppe kommer ind, er forholdene endnu værre, hvilket også kan iagttages, idet der dannes en let rimtåge i det område, hvor svine kroppene kommer ind i tunnelen. Rimtåge består af små, underkølede dråber af vand. I modsætning til rimtåge, som den kendes fra naturen, er tågen ikke stillestående i tunnelen, da lufthastigheden her er meget høj. Derfor er tågen ikke så synlig i tunnelen.

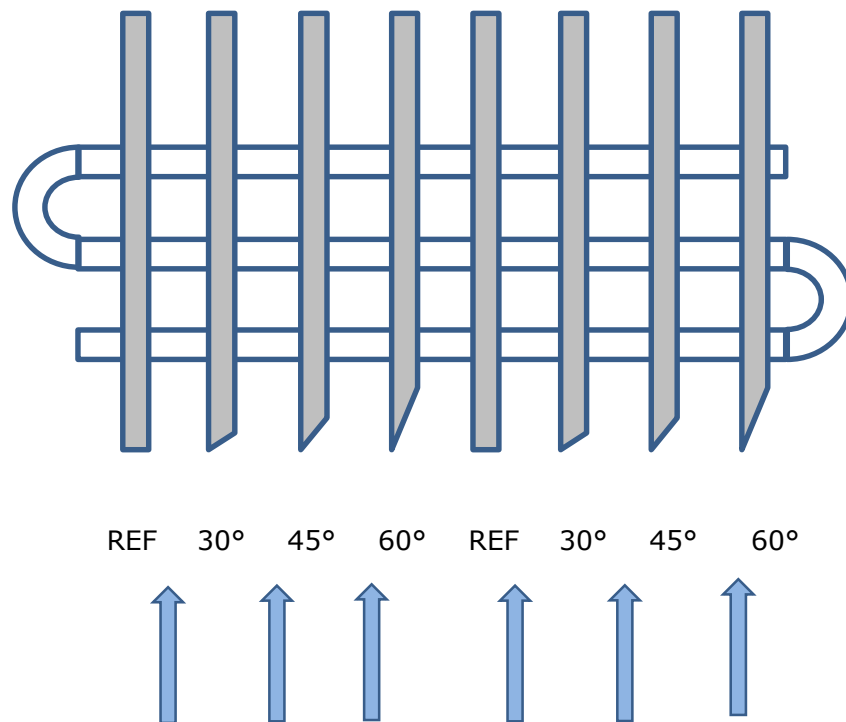
Fra naturen kendes lignende fænomener, som det der ses i tunnelerne; fx viser billede 10 en vejrstation, der har været udsat for rimtåge i frostvejr med en let vind. Som det ses, bygger rimen op mod vindretningen flere steder på stationen, også selvom den har samme temperatur som den omgivende luft og ikke er yderligere afkølet, som det er tilfældet for en fordamper.



Billede 10: Vejrstation, som har været udsat for rimtåge i frostvejr med en let vind.

9. Finnegeometri

Baseret på teorien om, at rimen dannes på fronten af kølefladens finner, ved at små dråber af underkølet vand (tåge) rammer finnespidsen og derefter fryser fast, er det undersøgt om en ændring af finnernes forkant har betydning. Der blev derfor fremstillet en køleflade, hvor finnerne var slebet som en kniv i hhv. 30°, 45° og 60°, med flade finner som reference, jf. figur 4. Derved har finnerne ikke en flade på forkanten, som dråberne kan ramme. Finnerne var lavet af 0,6 mm aluplade.



Figur 4: Køleflade, hvor finnerne er slebet som en kniv i hhv. 30°, 45° og 60°. De flade finner er brugt som reference.

Formålet var at undersøge om dråberne bedre kunne følge luftstrømmen rundt om finnen; i hvert fald i de tilfælde, hvor finnen er slebet meget "skarp".

Modelfordamperen er testet i klimakammeret ved -25°C lufttemperatur og ved fugttilførsel ved hjælp af vandkar med dyppekoger; dvs. de samme omstændigheder som ved tidligere forsøg. Der er ikke køling på modelfordamperen, idet rørene rent faktisk ikke er rør, men blot gevindstænger til at holde finnerne i den korrekte afstand fra hinanden (i dette tilfælde cirka 10 mm).

Resultatet af testen i klimakammeret er, at referencen opbygger den mindste mængde rim, mens de slebne finner bygger mere og mere op, jo større vinkel de er slebet i, se billede 11.



Billede 11: Vinklen på finnerne har indflydelse på opbygning af rim.

Det må derfor konkluderes, at det ikke er nogen fordel at slibe finnerne skarpe.

10. Løsninger til fjernelse af rim på køleflader.

Som tidligere nævnt har det vist sig, at en meget stor del af den rim, der dannes i frysetunneller, fx på svineslagterier, dannes på en måde, så kølefladen lukker til foran, mens der inde i kølefladen stort set ikke sætter sig rim. Derfor er en normal afrimningsprocedure, hvor hele kølefladen varmes op til omkring 8°C, ikke en særlig energieffektiv løsning, hvorfor det blev valgt at undersøge løsninger, der fokuserer på håndtering af rimdannelsen på fronten af kølefladen.

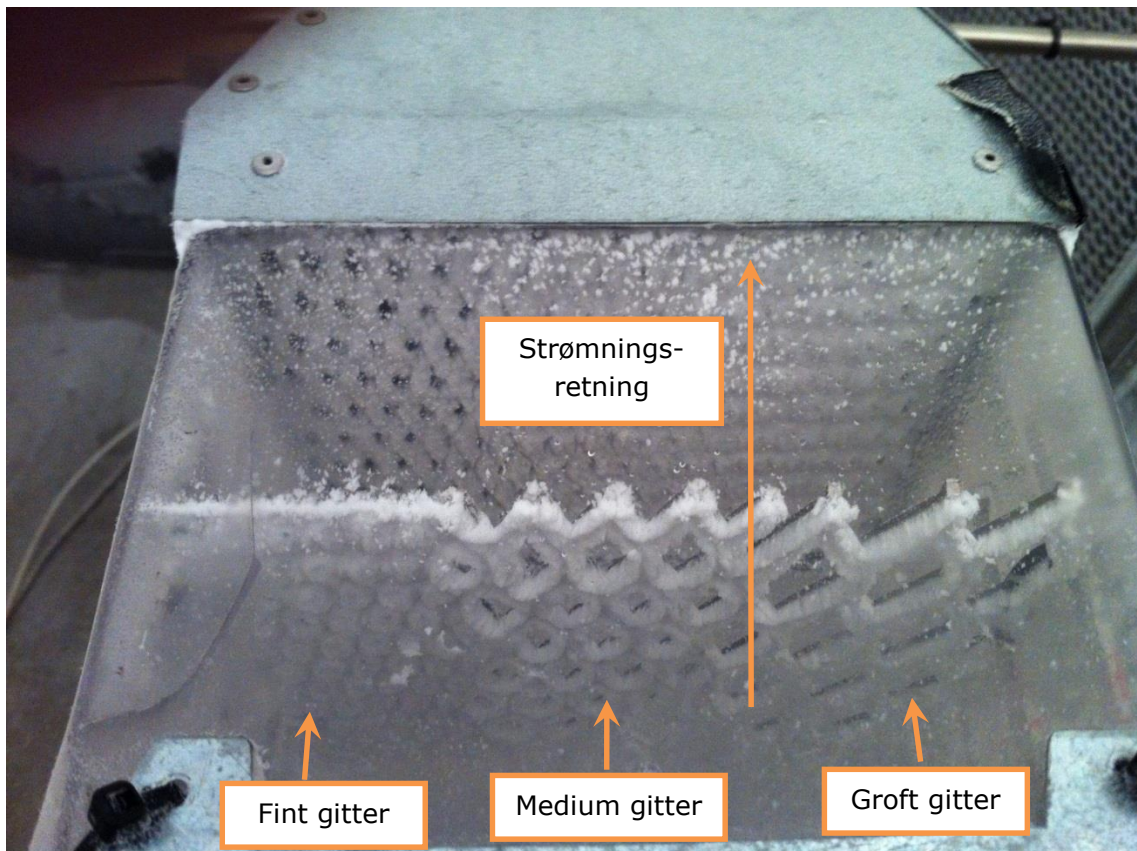
En metode kunne være at montere et gitter/filter/net foran kølefladen med det formål, at rimen sætter sig herpå. Da luftstrømningen gennem kølefladen også skal strømme gennem denne anordning, skal den udføres i en ret åben udgave. Den kunne evt. bestå af flere lag, således at den rim, der ikke fanges i første lag, fanges i det næste eller efterfølgende lag.

Fjernelse af rim fra anordningen kan derefter ske fx ved afskrabning, vibration, opvarmning eller lignende.

Det har ligeledes været overvejet at bruge disse metoder (afskrabning, vibration, opvarmning) direkte på kølefladen, men dette anses ikke for praktisk gennemførligt, da:

- de fleste køleflader af termiske årsager er udført med aluminiumsfiner, som er ret bløde og som nemt deformeres; derfor er en skrabermechanik ikke ønskelig.
- kølefladen skal vibreres/rystes så hårdt for at rimen falder af, at der er risiko for udmattelsesbrud i kølemiddelrørene.
- opvarmning udelukkende af fronten ikke anses for at være en teknisk realiserbar løsning.

Der har været lavet forsøg med forskellige gittertyper i laboratoriet, og på basis heraf er valgt en gittertype til real-life-forsøg. Af praktiske årsager er der her valgt gitter lavet af strækmetal. På billede 12 er gitterstykker med tre forskellige tætheder monteret i en transparent kanal, hvor der sendes luft igennem på samme måde som de tidligere beskrevne forsøg med den lille test-køleflade.



Billede 12: Gitterstykker med tre forskellige tætheder monteret i en transparent kanal.

Bag gitterstykkerne er monteret et helt stykke af det fine gitter. Derved etableres et overblik over, hvor hurtigt de forskellige gitterstykker lukker til, og det bagerste gitter giver et indtryk af, hvor meget rim, der er ikke fanges af det første lag. Billedet er taget efter 30 minutters drift i klimakammer.

Hvis der zoomes ind på kanten af gitteret, ses det tydeligt, hvordan rimen vokser fremad mod strømningsretningen, se billede 13.

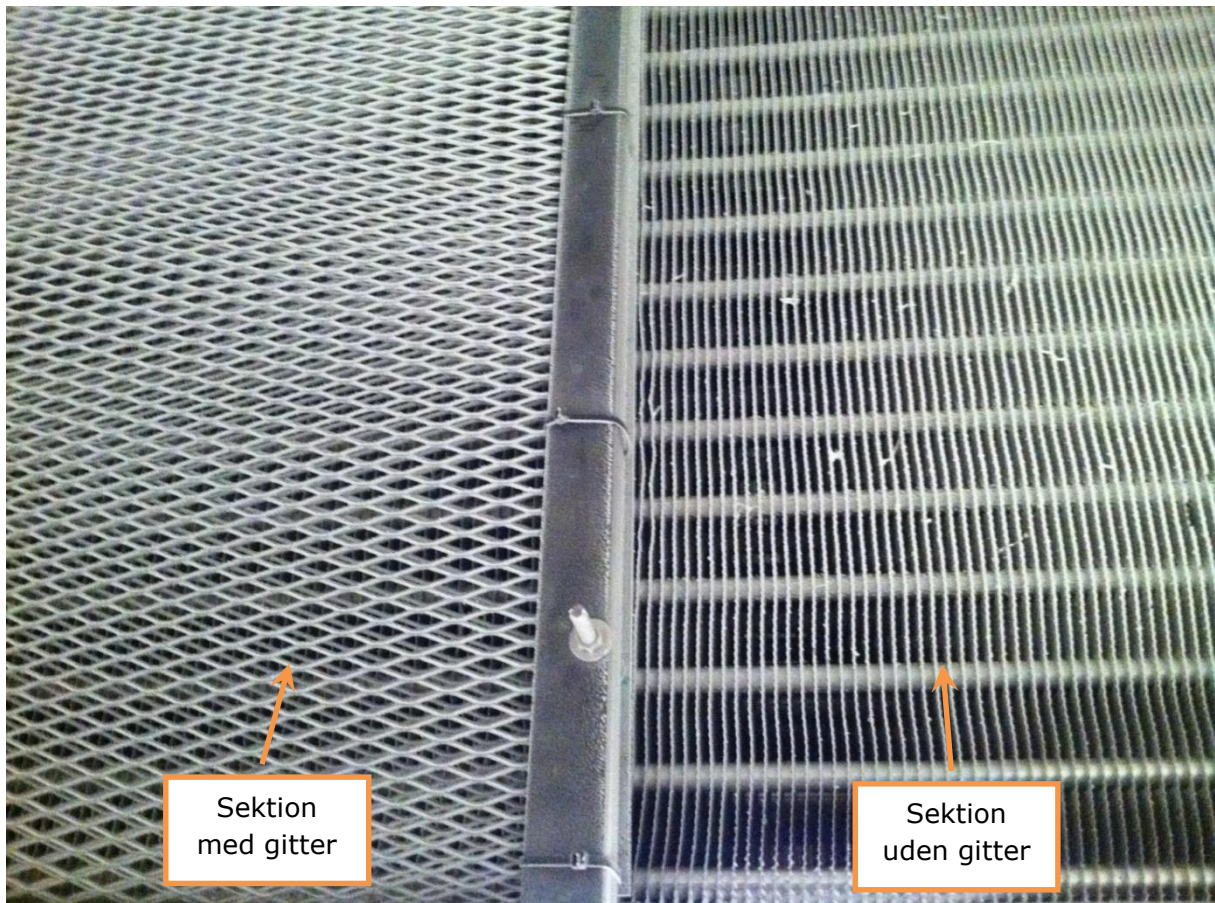


Billede 13: Nærbillede af gitterkanten viser, at rimen vokser imod strømningsretningen.

Baseret på disse forsøg blev det besluttet at lave et fuldskala-gitter bestående af Medium-gitter (Maskevidde 13 *42 mm, 2 mm plade).

11. Fuldskala-gitterforsøg

På billede 14 ses et gitter i fuld skala monteret på en Alfa-Laval køleflade med et frontareal på cirka 2 m * 1 m. Kølerørene i fladen er gennemgående, mens luftføringen er opdelt i to separate, kvadratiske sektioner med hver sin ventilator. Gitteret er i to lag med 20 mm afstand.



Billede 14: Gitter i fuld skala monteret på køleflade. Her ses sektion med og uden gitter.

Der er herefter kørt forsøg i klimakammeret, hvor rimmen har været forsøgt fjernet; dels rent manuelt ved at slå på et slagstykke placeret midt på gitteret, dels med forskellige typer vibratorer placeret midt på gitteret.

Resultatet er at:

- Slag med en hammer er effektivt
- Elektromagnetiske vibratorer lader til at have for lille amplitude og har en meget begrænset effekt.
- Forskellige trykluftdrevne vibratorer har været forsøgt og fungerer godt, forudsat at den rigtige frekvens rammes. Ved lav temperatur kan det være svært at få vibratoren i gang. Motordrevne vibratorer giver den samme type vibrationer, så det antages at disse vil fungere tilsvarende.

Billede 15 viser gitteret lige før og lige efter et slag med en hammer. Efter flere slag var gitteret rent, bortset fra et ganske tyndt lag, der hang fast på selve gittermaterialet.



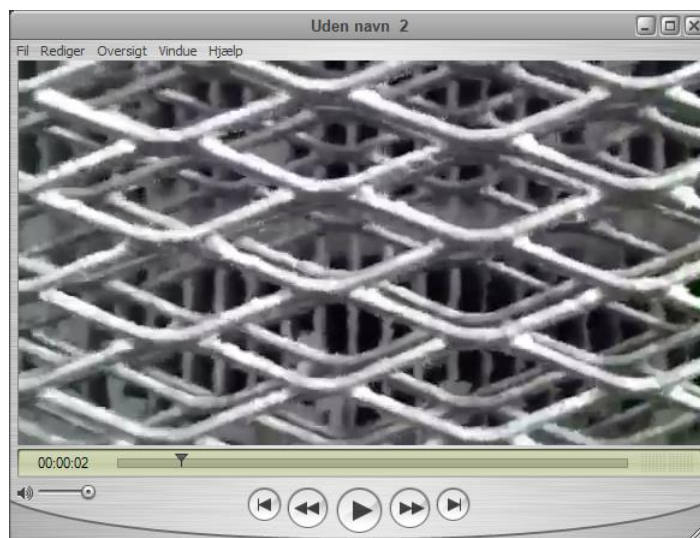
Billede 15: Gitteret før (venstre) og efter (højre) slag med en hammer.

Baseret på disse indledende manuelle forsøg blev der anvendt en borehammer, som tilvejebragte vibrationen ved at slå på et slagstykke midt på gitteret. Billede 16 viser sekvenser med cirka et sekunds mellemrum fra et forsøg i klimakammeret.



Billede 16: Rensning af gitter - sekvenser med cirka et sekunds mellemrum.

Som det ses, er virkningen positiv, og det tager kun kort tid at få gitteret rensset. Billede 17 viser et kig gennem gitteret, hvoraf det fremgår, at der er meget lidt rim på finnerne, hvorimod man på billederne ??? kan se, at sektionen uden gitter stort set er lukket.



Billede 17: Nærbillede af det rensede gitter viser meget lidt rim på finnerne.

12. Fuldskala-gitterforsøg nr. 1

Danish Crown Herning den 10. og 11. juli 2013

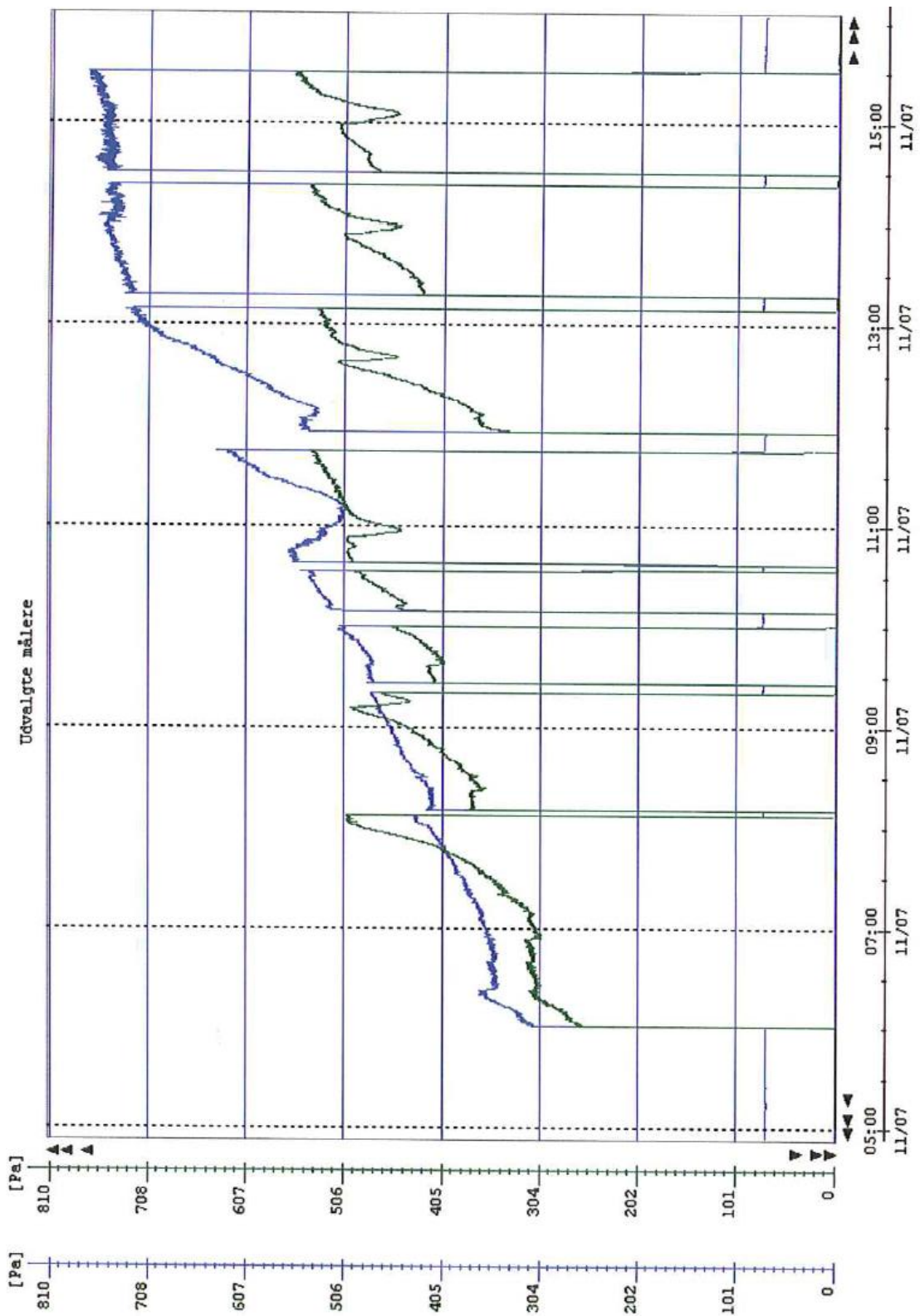
Den 10. og 11. juli 2013 blev der gennemført forsøg med et rimfang/gitter på fordamper 2 i køletunnelen på Danish Crowns slagteri i Herning. Den ene halvdel af fordamperen var forsynet med et gitter med to lag strækmetal, hvor de to lag var drejet 90° i forhold til hinanden for at få et overlap mellem lagene. Strækmetallet var af maskestørrelse 13 * 42 mm, med gitterben af 2 mm plade. Da benene er drejet i forhold til luftens strømningsretning, er de effektivt 2,5 – 2,8 mm brede set i strømningsretningen.

Den anden halvdel af fordamperen blev efterladt i normal tilstand. De normale afrimninger med varmgas var afbrudt, og gitteret blev banket/skrabet rent i pauserne mellem slagtingerne; dvs. efter lidt over en times drift. Billede 18 viser gitteret kl. 10:37, umiddelbart før det skrubes/bankes rent. Gitteret er ret lukket af sne, mens ingen af fordampersektionerne endnu er lukket til.



Billede 18: Gitteret inden det skrubes/bankes rent.

Figur 5 viser en graf over trykfaldet over fordampersektionerne (og gitter). Den blå graf viser trykfaldet over sektionen UDEN gitter, mens den mørkegrønne graf viser trykfaldet over sektionen MED gitter. Bemærk, at den blå graf har en nulpunktsforskydning på cirka 70 Pa (ses tydeligt i stilstandsperioder).



Figur 5: Trykfaldet over fordampersktionerne (og gitter) – med og uden gitter.

En del interessante forhold fremgår af graferne:

- På det tidspunkt, hvor den første gris kommer ind, er der en forskel på ca. 60 Pa mellem de to fordampere. Her er tunnelen kølet ned, men der er formentligt ikke afsat meget rim i fordampere. Tages der højde for nulpunktsforskydningen for den blå graf, kan det beregnes, at gitteret giver anledning til et trykfald på ca. 20 Pa i helt ren tilstand.
- Trykfaldet vokser meget hurtigt på sektionen med gitter. Dette kunne indikere, at det formålstjenligt at anvende et grovere gitter, og/eller at skrabe/banke rimen af oftere. I praksis var sidstnævnte dog ikke muligt i den aktuelle situation.
- Når den mørkegrønne graf når 500 Pa, sker der et brat fald. Dette sker flere gange, og blev også set den 10. juli. Det kunne antyde, at blæseren staller, når trykfaldet bliver for stort. Noget tilsvarende ses på den blå graf ca. kl. 10:45, omend det er et noget længere og "blødere" forløb. Da denne fordampelsektion har et jævnt stigende trykfald, kommer man kun gennem stall-punktet en gang.
- Der foretages en normal afrimning kl. 11:45. Sektionen med gitter vender næsten tilbage til samme trykfald som om morgenen, mens trykfaldet gennem den anden sektion kun falder lidt, hvilket indikerer, at den ikke når at blive afrimet ordentligt.
- Fra kl. 13:00 og frem er trykfaldet for blå kurve ret konstant. Det antyder, at fordampere er lukket helt til. Billede 19 er taget kl. 13:11.



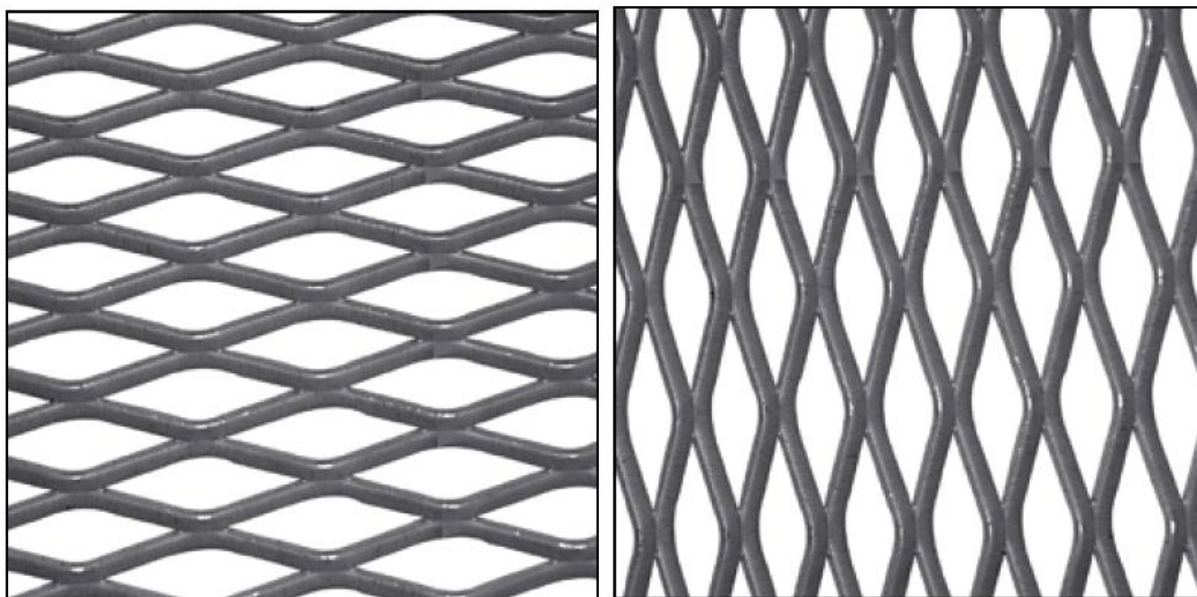
Sektion uden gitter
lukket helt til

Billede 19: Tilrimet fordampere. Sektionen uden gitter er helt tillukket.

13. Diskussion

Det kan konstateres, at der kan fanges en betydelig mængde rim ved hjælp af et gitter/rimfang, og at det i en optimeret/automatiseret udgave vil kunne forbedre driften, hvis gitteret afrimes med kortere interval, fx hver halve time, eller der anvendes et grovere gitter. Da det ikke har været muligt at køre med korte mellemrum mellem afrimningerne, er de opnåede forsøgsresultater ikke fuldt dækkende.

Selv om strækmetal er en meget billig og effektiv måde at fremstille et gitter på, har det dog nogle ulemper, der gør, at en anden opbygning må overvejes. Eksempelvis kan det konstateres, at strækmetal har vidt forskellig stivhed afhængigt af, hvordan det fastgøres. Af praktiske grunde var de to lag her fastgjort langs toppen og på de to lodrette sider, mens de ikke var fastgjort i bunden, da der her skulle være åbent, for at sneen kunne falde ud. Laget, der er vist til venstre i billede 20, var derfor meget stift, mens laget til højre var meget blødt. Det var derfor vanskeligt at få en god effekt ud af at slå på den fælles "slag-pind" midt i gitteret, da de to lag reagerede meget forskelligt.



Billede 20: Fastgørelsen af strækmetal gitteret har indflydelse på afrimningen af gitteret. Gitter til venstre er meget stift og gitteret til højre meget blødt.

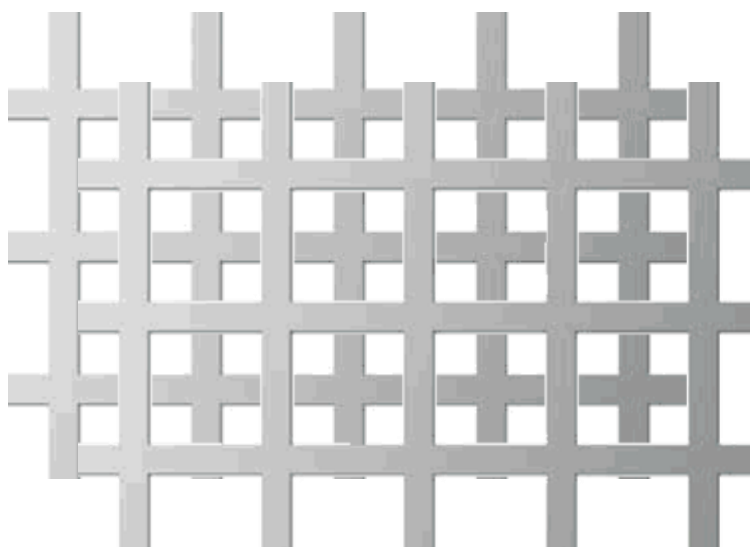
Det foreslås derfor, at der i første omgang laves et gitter magen til det, der blev brugt i laboratorieforsøgene, dvs. to lag strækmetal med maskerne i samme retning og med en vibratorløsning til afrimningen.

Afhængigt af udfaldet af denne test kan man overveje videre skridt og mulige forbedringer af gitteret.

Anvendes en skraber til at fjerne rimen med, er strækmetal ret uegnet på grund af de skarpe kanter, der nemt kan ødelægge en skrabers kant.

Der skal med andre ord søges efter en løsning med symmetriske masker og en glat overflade, der nemt kan afskrabes. Samtidigt anbefales en grovere maskestørrelse for at forlænge tiden mellem rimafskrabningerne.

Et forbedret design kunne bestå af et gitter med to lag perforeret plade med firkanthuller 20 * 20 mm og 25 mm maskevidde. Hvert lag har dermed en luftprocent på 64 (36% metal), og de to lag skulle dermed kunne fange op til 70% af rimen, selv i ren udgave.



Figur 6: Gitter bestående af to lag perforeret plade med firkanthuller skulle kunne opfange 70% af rimen.

Anvendes der kun et lag gitter fås den simplest mulige konstruktion. Dette frarådes dog, da det ved beregning har vist sig, at der maksimalt kan fanges rim svarende til den procentdel af gitteret, der udgøres af metallet (under antagelse af, at gitteret er rent; der findes p.t. ingen viden om, hvor meget der fanges af et delvist tilrimet gitter). Samtidigt er det vigtigt, at gitteret ikke er for tæt, da trykfaldet over dette ellers bliver for stort. Med kun et lag gitter skal det dermed udføres så åbent, at man ikke fanger en særlig stor procentdel af rimen, og løsningen bliver dermed uinteressant.

14. Afskrabning/rengøring af gitter

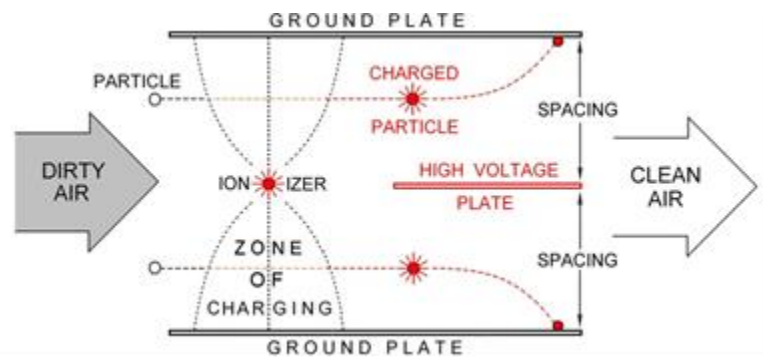
Der findes flere forskellige metoder til fjernelse af den opbyggede rim: vibratorer, mekaniske skraber i roterende hhv. parallelførte udgaver m.v.

Disse løsninger har alle fordele og ulemper. For eksempel kan en skraber risikere at fryse fast på gitteret under tilrimningen. En vibrator kan, afhængigt af udførelse, være mekanisk kompliceret og/eller uegnet til det hårde klima i tunnelen. En endelig prototype bør derfor være forberedt for, at flere forskellige afrimningsmetoder kan testes.

15. Elektrostatisk filtrering

Elektrostatisk filtrering kan også tænkes anvendt til at eliminere rimdannelsen. Figur 7 er en meget forsimplet forklaring på, hvordan elektrostatisk filtrering virker.

1. Støvpartikler i luftstrømmen bliver kraftigt elektrisk ladet gennem ion-bombardement i ioniseringszonen.
2. De ladede partikler fjernes fra luftstrømmen ved kraften fra et kraftigt elektrisk felt mellem et sæt højspændings- og jordplader i udskillelseszonen.



Figur 7: Principtegning over elektrostatisk filtrering.

Elektrostatisk filtrering bør også kunne bruges til at fjerne de mikroskopiske dråber fra luften. I praksis vil der dog være nogle udfordringer ved at indføre systemet i et eksisterende slagteri:

- Ioniseringen sker ved at påføre en spænding på flere tusinde Volt. Det vil kræve, at hele systemet lukkes, således at risiko for personskade elimineres. Selve filterenheden vil dermed fylde en del.
- Ionisatoren vil kunne blive fyldt med sne, der muligvis vil påvirke funktionen negativt.

16. Fuldskala-gitterforsøg nr. 2

Danish Crown den 18. og 19. juli 2013

Der blev fremstillet et tolags rimfang/gitter med en vibrator bestående af en borehammer monteret på gitterets ramme, se billede 21.

For at få en god vibratorvirkning skal gitteret spændes ret stramt. Derfor blev borehammerens holder bygget således, at borehammeren presser gitteret ud i en bue. Gitterets elasticitet bruges dermed til at give en fjedervirkning.

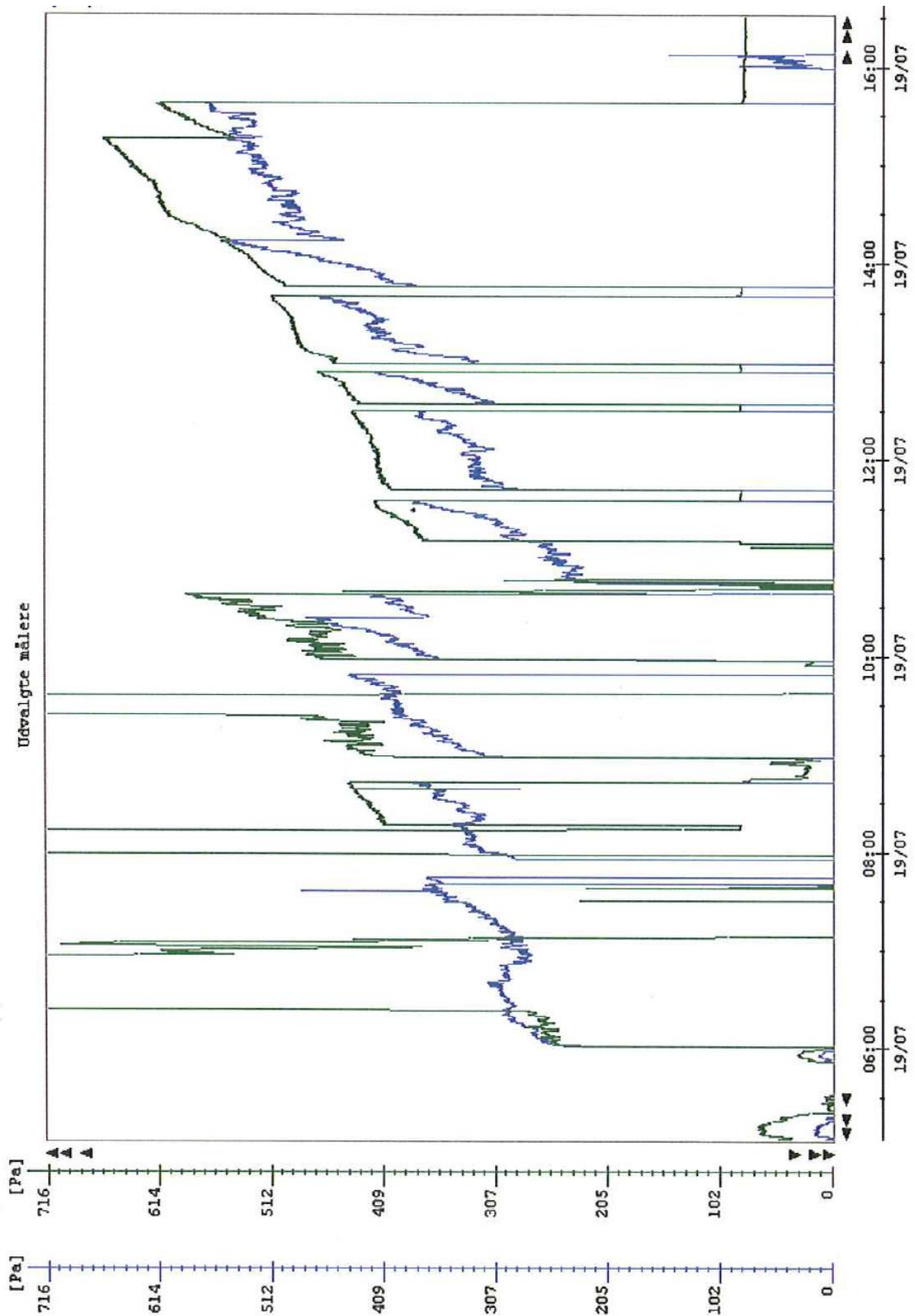
Overgangen mellem borehammer og gitter blev fremstillet af et nylonhjul, der blev afdrejet til at passe mellem de to gitterlag, samt to aluminiumsskiver, der blev spændt på for- og bagside med en gennemgående bolt. Desuden blev der monteret et gevindstykke med et hul, der passede til borehammerens "slagstykke".

Den forholdsvis store diameter på overgangen blev valgt for at fordele slagkraften på et relativt stort område, således at udmattelsesbrud i selve gitteret kunne undgås.

Gitteret blev monteret torsdag aften, og der blev kørt forsøg fredag. Figur 8 viser en graf med data for trykdifferensen over fordamperen, dels på sektionen med gitter, dels på den tilstødende sektion uden gitter.



Billede 21: Borehammer monteret på gitterets ramme fungerer som vibrator til afrimning af gitter.



Figur 8: Trykdifferensen over fordamperen, på sektionen med og uden gitter.

Den mørkegrønne graf viser trykfaldet over fordampersektionen uden gitter. Bemærk, at nulpunktet er forskudt ca. 80 Pa. Indtil kl. 11:00 er der fejl på denne måling på grund af en tilstoppet slange, så det er kun data efter dette tidspunkt, der kan bruges.

Den blå graf viser trykfaldet over sektionen med gitter på. Ca. kl.10:45 køres der en afrimning på begge sektioner.

Når der køres med borehammeren, slukkes blæseren. Dermed viser trykfaldet, hvornår der har været kørt en afrimning/vibrering. Dette sker ca. kl. 10:40, kl. 12:30, kl. 12:50 samt kl.13:40.

Borehammeren fungerer ikke optimalt i kulde, idet den først starter efter 1-2 minutters opvarmning.

For at kunne overskue dataene, er der indtegnet en blød kurve for den mørkegrønne graf samt en blød kurve gennem punkterne på den blå graf umiddelbart efter, at borehammeren har kørt. Såfremt det er lykkedes at fange en stor del af rimen ved hjælp af gitteret, burde disse to kurver få større og større afstand, efterhånden som tiden går, da der burde være mindre tilrimning i sektionen med gitter. Det er dog tilsyneladende en ret begrænset effekt, da forskellen blot udgør ca. 20 Pa.

Den begrænsede effekt kan have to årsager:

- Det er kun en mindre mængde rim, der fanges, sammenlignet med den totale mængde rim, som rammer fordampere. Dette må anses for ret usandsynligt, idet der blev observeret ret store mængder rim på gulvet under fordampersektionen med gitter.
- Gitteret lukker mere og mere til, efterhånden som tiden går. Denne forklaring virker umiddelbart mere sandsynlig, idet det kunne konstateres, at borehammeren ikke kunne rense gitteret så effektivt, som det tidligere er set under laboratorieforhold. Årsagen til dette kan enten være, at borehammeren fungerer dårligt i kulde, eller at overgangsstykket mellem borehammer og gitter er alt for tungt og dæmper slagene.

17. Delkonklusion

På baggrund af dette kan det foreslås at gentage forsøget, men med et betydeligt lettere overgangsstykke.

18. Samlet konklusion

Laboratorietesten giver et retvisende billede af de reelle forhold for fordampere i en køletunnel påvirket af varme, fugtige produkter.

Forsøgsresultaterne viser, at rimdannelsen foregår væsentligt anderledes end forventet, idet rimmen primært sætter sig på finnespidserne og vokser op mod luftens strømningsretning og ikke på overfladen af kølefladerne.

Rimdannelsen er ikke påvirket nævneværdigt af de anvendte nano-belægninger på finnerne, og det må derfor konkluderes, at belægningerne ikke er en brugbar løsning i dette tilfælde.

En ændring af finnens kantgeometri med en affasning af den forreste kant viste sig ikke at reducere mængden af rim. Fænomenet er tillige analyseret ved hjælp af simuleringsprogrammet ANSYS for at belyse, hvordan strømningsbilledet varierer med dråbestørrelse og finnegeometri.

Et rimforfang til forsøgskøleren viste stor evne til at tilbageholde vanddråberne som rim og var meget villig til at slippe rimmen igen ved vibrering.

De efterfølgende fuldskalaforsøg gav ikke i samme omfang entydige resultater men indikerer dog, at et rimfang foran en fordampers indsugningsåbning, frontarealet, har reducerende indvirkning på rimmængden, der sætter sig på fordamperfladen.

Fuldskalaforsøgene har klarlagt, at for at kunne definere det optimale rimfangs udformning/design med en funktionsduelig mekanisme til rimfjernelse, er der behov for at gennemføre flere undersøgelser/forsøg for at kunne udvælge den optimale maskestruktur/konstruktion og den tilhørende mekanisme og metode til at få rimmen til at slippe rimfanget.

Appendix 1

Simulering af gitter/rimfang

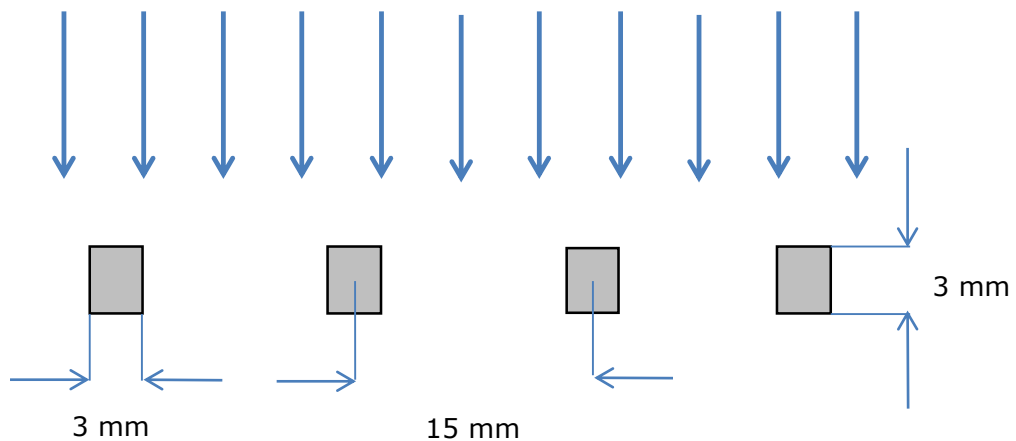
Der er foretaget simulering af tre geometrier af gitter/rimfang under følgende forudsætninger:

Dråbestørrelse 10 μm , 15 μm , 20 μm , 50 μm og 100 μm diameter.

Dråber med 1000 kg/m^3 massefylde

Lufthastighed 4 m/s ; lufttemperatur -25°C

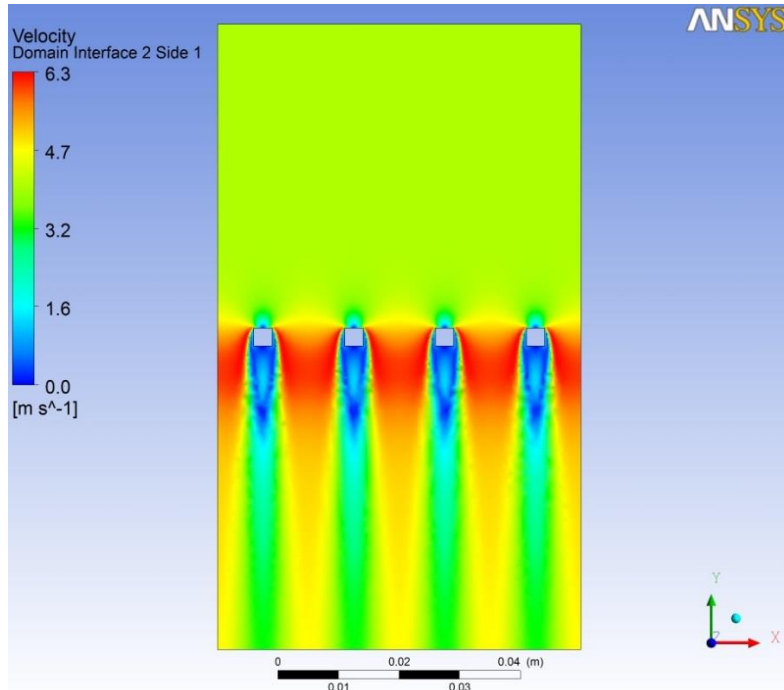
Generel geometri som vist i figur 1.



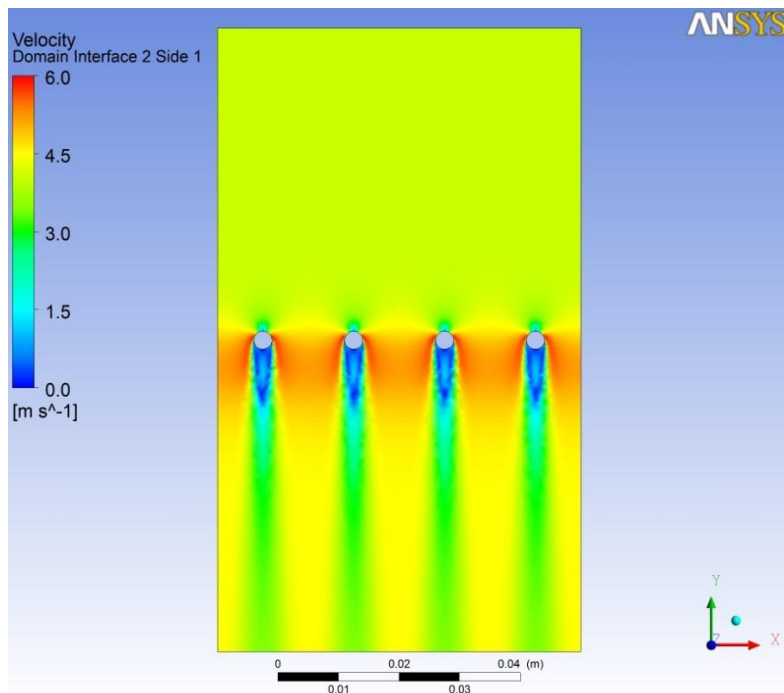
Figur 1: Generel geometri.

Nogle dråber følger med luften rundt om gitteret, andre rammer gitteret og sætter sig fast på gitteret (udgår dermed af flowberegningen). Der ses ikke på opbygning af rim på gitteret, da det ikke er muligt i beregningsprogrammet, men flowforholdene kan godt antyde noget om, hvordan opbygningen sker.

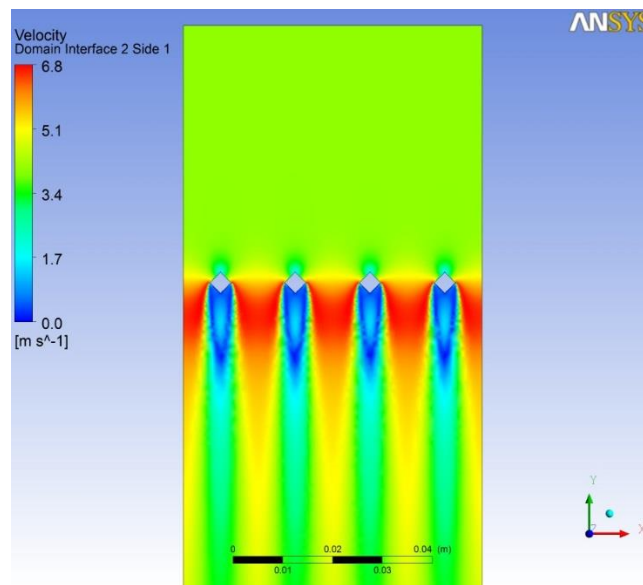
Figur 2-4 viser de tre geometrier i diagrammer, der viser hastighedsfordelingen i luften.



Figur 2: Kvadratisk

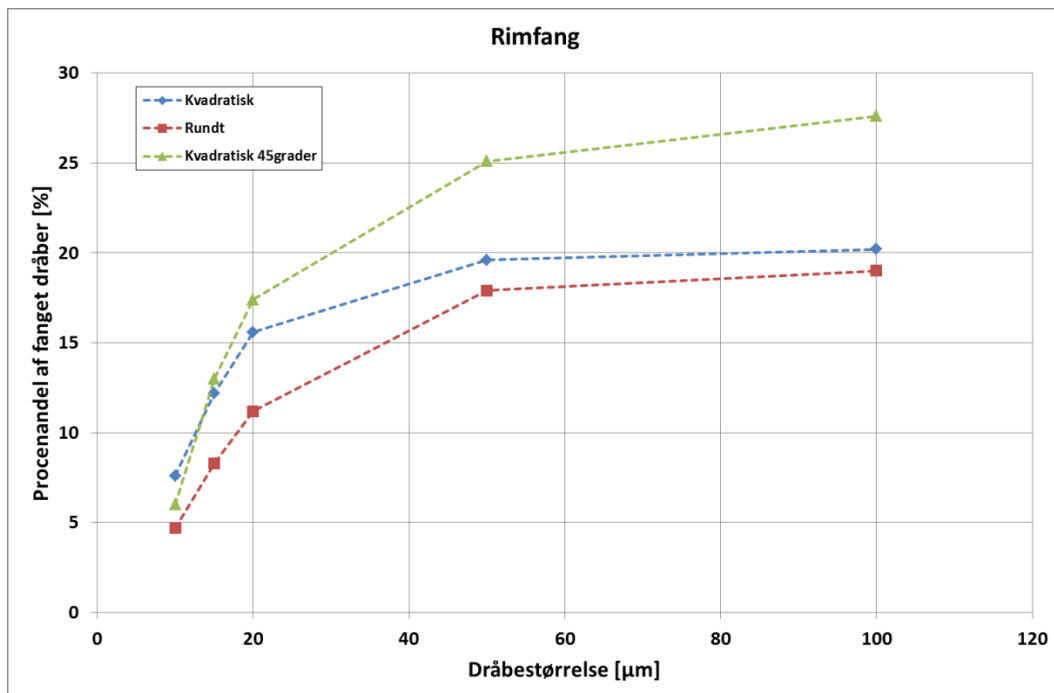


Figur 3: Rund



Figur 4: Kvadratisk 45°

Grafen i figur 5 viser, hvilken procentdel af dråberne der fanges, som funktion af dråbestørrelse, for tre forskellige gittergeometrier.



Figur 5: Procentdel af opfangede dråberne for tre forskellige gittergeometrier.

Meget store dråber vil have en tendens til ikke at ændre bane, selvom luften afbøjes rundt om gitteret. Meget små dråber vil mere have en tendens til at følge luftstrømmen.

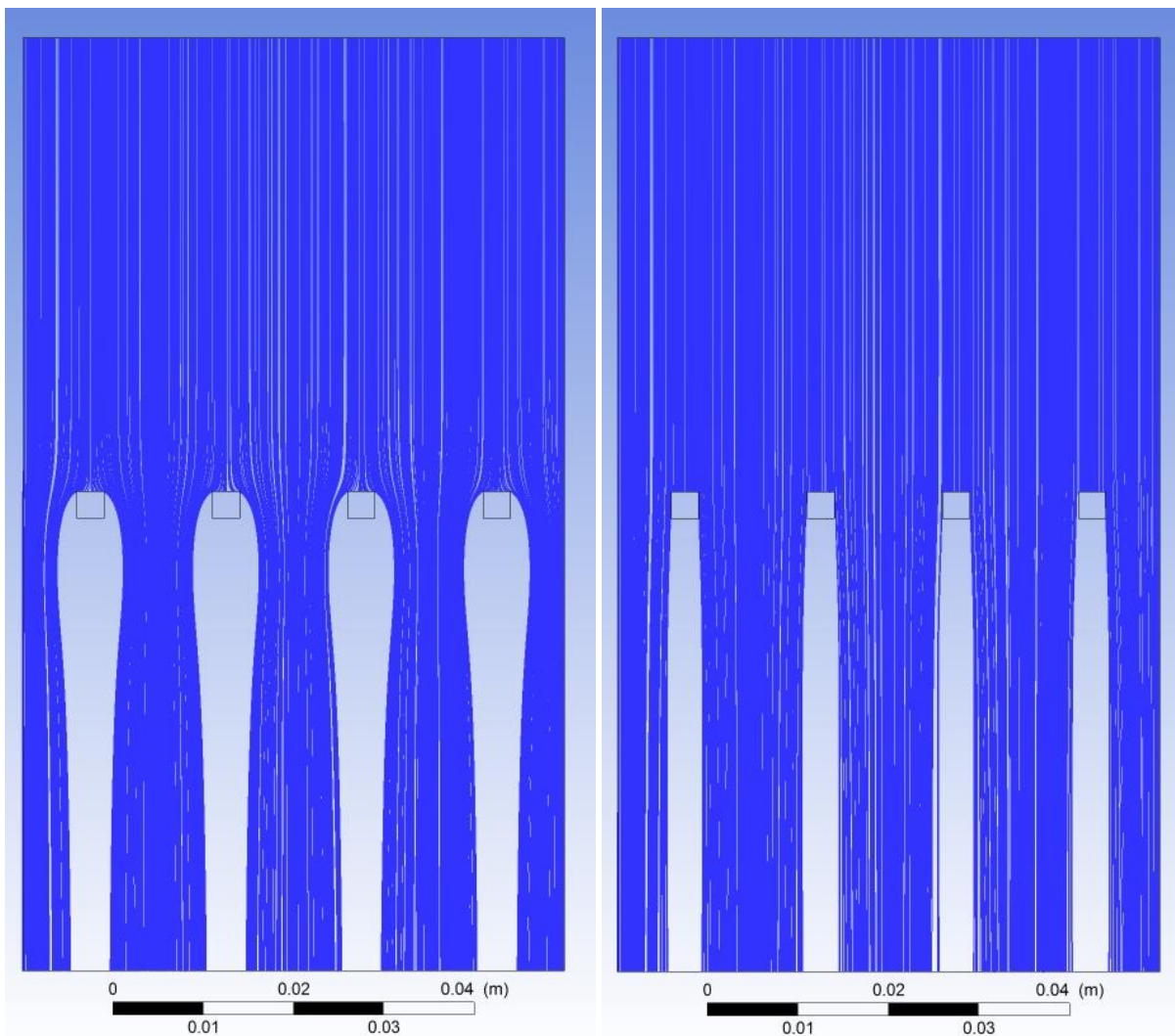
Det vil i praksis sige, at for meget store dråber vil man fange en procentdel af dråberne svarende til ca. den del af strømningsarealet, der dækkes af gitterets stænger; dvs. 20% for "Rund" og "Kvadratisk" samt 28% for "Kvadratisk 45°".

For meget små dråber er det aerodynamikken rundt om gitterstængerne, der er afgørende. Jo mere aerodynamisk gitteret er, desto nemmere vil dråberne kunne følge med luften rundt om gitterstængerne uden at sætte sig på dem. Det er muligvis forklaringen på, at "Kvadratisk 45°" fanger mindre end "Kvadratisk", når dråberne er meget små.

Figur 6 er et eksempel på flowforholdene for "Kvadratisk", hvor dråbernes bane er vist.

"Kvadratisk", 10 μm dråber

"Kvadratisk", 100 μm dråber



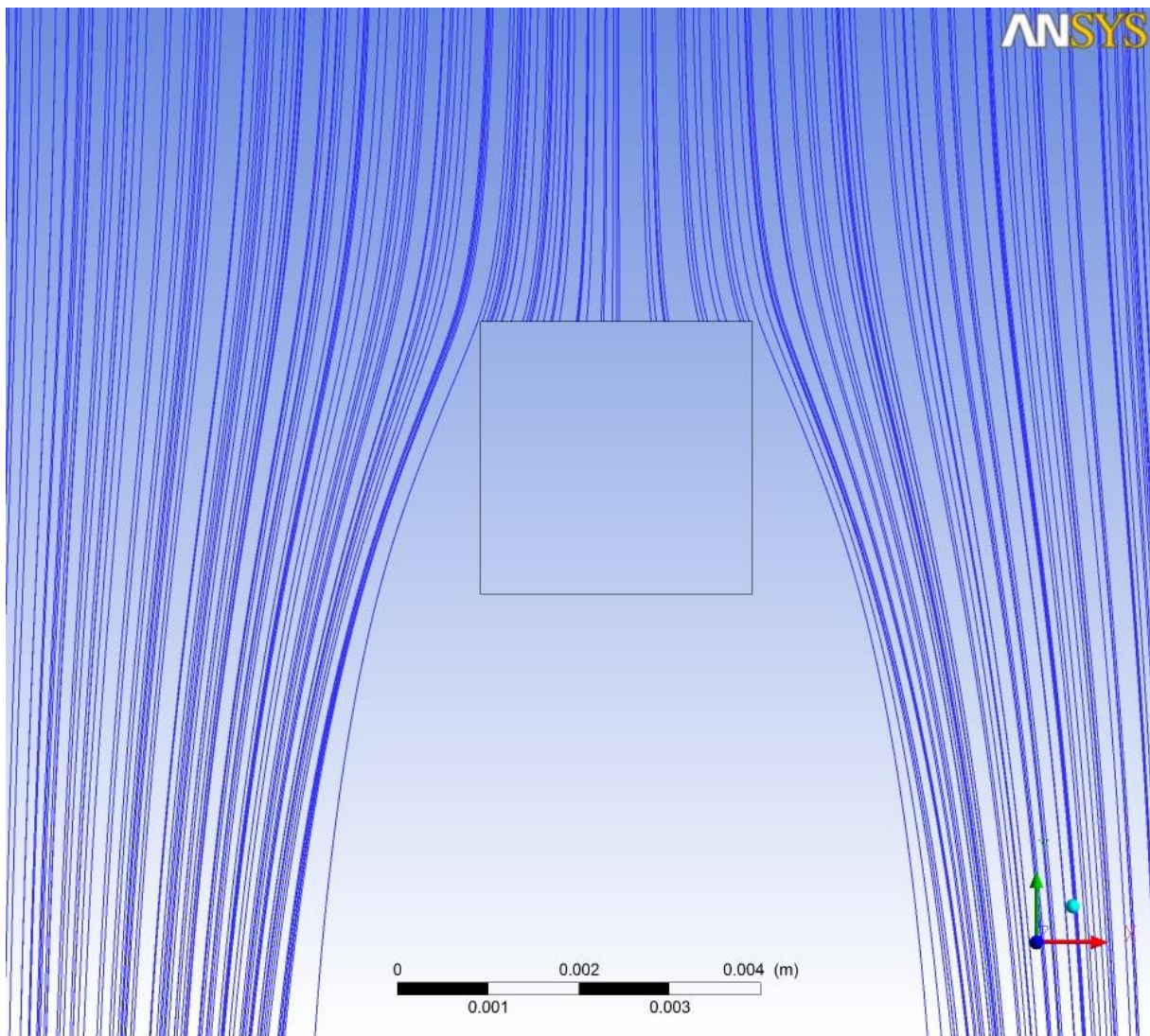
Figur 6: Eksempel på flowforholdene for kvadratisk.

Det ses at:

- luften bag ved gitteret stort set er tør; de dråber, der passerer gennem gitteret, opblandes kun ganske langsomt i luftflowet bag gitteret.
- for meget små dråber sker der en opkoncentration i mellemrummet mellem gitterstængerne efter gitteret. Dette kan muligvis udnyttes ved placering af næste gitterrække.

Lignende billeder ses for de to andre geometrier.

Zoomes der ind på en enkelt gitterstang, ses flere detaljer i flowet, se figur 7. Det skal her bemærkes, at afstanden mellem de enkelte partikelbaner ikke er konstant, idet der i beregningen er tilført 1000 dråber tilfældigt i x-aksens retning.



Figur 7: Nærbillede af gitterstang.

Resultaterne kan omsættes til andre lufthastigheder end de anvendte 4 m/s, da små dråbers evne til at følge et omgivende flow er givet ved det såkaldte "Stokes tal" (se evt. http://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_number).

Stokes tal er alt andet lige proportionalt med hastigheden ganget med diameteren i anden potens. Det vil sige, at flowforholdene er ens, hvis $u_1 * d_1^2 = u_2 * d_2^2$

Det vil sige, at forholdene ved et flow på 8 m/s og dråbestørrelsen $d = 50 \mu\text{m}$, svarer til forholdene for

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot 50^2}{4}} = 70 \mu\text{m} \text{ ved } 4 \text{ m/s.}$$

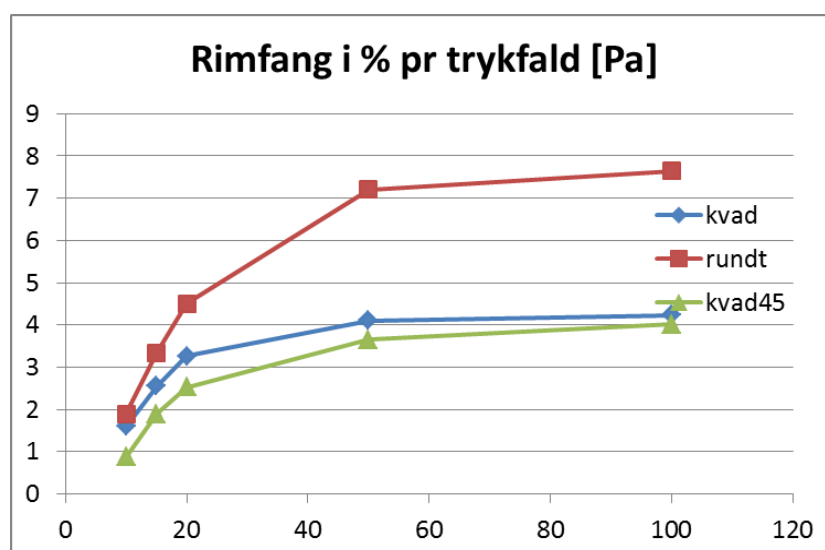
Trykfald

Trykfaldet over gitteret er beregnet under forudsætning af, at det er ren luft, der passerer gennem gitteret med en hastighed af 4 m/s; der er dermed ikke taget hensyn til, at dråberne kan påvirke trykfaldet. Desuden er det antaget, at der ikke er rim på gitteret. Efterhånden som rimen bygger på, vil trykfaldet stige, men dette kan ikke beregnes i det forhåndenværende program.

	kvad	rundt	kvad45
Trykfald [Pa]	4.78	2.486	6.886

Tabel 1: Målt trykfald for tre forskellige gittergeometrier.

Det forøgede trykfald med rimfanget medfører en stigning i driftsomkostningen, og et meget effektivt rimfang med flere lag gitter kan risikere at få et meget højt trykfald. Det er derfor interessant at se på rimfangets effekt ift. trykfaldet. Disse tal er beregnet og kan ses i grafen i figur 8.



Figur 8: Rimfangets effekt ift. Trykfaldet for tre forskellige gittergeometrier.

Uden rimopbygning er det mest effektive rimfang i forhold til trykfaldet et gitter med rundt profil. Påvirkningen af, hvordan rimen bygger op på gitteret, er dog ikke belyst.