



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R15:1989

REF/sbl

Infraljuds inverkan på värmeövergångstalet

Bengt Petersson

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Placö

Sel

Byggforskningsrådet

R15:1989

INFRALJUDS INVERKAN PÅ VÄRMEÖVERGÅNGSTALET

Bengt Petersson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslg
841139-5 från Statens råd för byggnadsforskning
till Institutionen för mekanisk värmeteori och
kylteknik, Tekniska högskolan, Stockholm.

REFERAT

Föreliggande rapport är resultatet av ett projekt som har utförts på Institutionen för mekanisk värmeteori och kylteknik, KTH, i samarbete med företaget Insako AB. Projektet har huvudsakligen inriktats på att undersöka infraljuds inverkan på värmeövergångstal, men även frostpåslag har studerats.

Resultat från utförda prov visar att infraljud är ett sätt att väsentligt öka värmeövergångstalet under vissa förhållanden. Från gjorda prov har, med hjälp av dimensionslösa storheter, ett försök till generalisering gjorts så att Nusselts tal blir en funktion av ett modifierat Reynolds tal. På detta sätt har luftflödets och infraljudets inverkan på värmegångstalet kunnat jämföras.

När det gäller frostpåslag kan däremot inte någon skillnad med eller utan infraljud upptäckas utöver det som kunde förväntas med hänsyn till det ökande värmeövergångstalet.

För normala flänsförångare synes det inte praktiskt-tekniskt-ekonomiskt realiserbart att utnyttja infraljud som en metod att öka värmeövergångstalet. Den energi som fordras för att åstadkomma infraljudet skulle, överslagsmässigt, i ett normalfall ge ungefär samma förbättring om den utnyttjades som fläktarbete för att öka lufthastigheten.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R15:1989

ISBN 91-540-4979-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sidnr
1 SAMMANFATTNING	2
2 FÖRUTSÄTTNINGAR	3
3 FÖRSÖKENS OMFATTNING	3
4 PARTIKELHASTIGHET	5
5 SAMBAND UTRUSTNING OCH MÄTMETOD FÖR BESTÄMNING AV VÄRMEÖVERGÅNGSTAL	6
5.1 TEORI	6
5.2 UTRUSTNING, MATERIAL OCH PROVOBJEKT	8
5.3 PROVETS UTFÖRANDE	8
5.4 KORREKTION AV TOPPHASTIGHETEN	8
6 SAMBAND UTRUSTNING OCH MÄTMETOD FÖR BESTÄMNING AV FROSTPÅSLAG PÅ EN NEDKYLD YTA	10
6.1 TEORI	10
6.2 UTRUSTNING, MATERIAL OCH PROVOBJEKT	10
6.3 PROVETS UTFÖRANDE	11
7 RESULTAT VÄRMEÖVERGÅNGSTAL	12
7.1 FÖRSÖK 1	12
7.2 FÖRSÖK 2	14
8 RESULTAT FROSTPÅSLAG	17
9 JÄMFÖRELSE MED KONVENTIONELL ANLÄGGNING	18
10 FORTSÄTTNING PÅ PROJEKTET	21
11 REFERENSER	22
12 TACK	22
13 ENGLISH SUMMARY	23

BILAGOR

1 MÄTVÄRDEN FÖRSÖK 1
2 MÄTVÄRDEN FÖRSÖK 2
3 MÄTVÄRDEN FÖRSÖK 3
4 KALIBRERINGSDIAGRAM PELTIERELEMENT
5 t_p -DIAGRAM FÖR FUKTIG LUFT
6 BETECKNINGAR PÅ ANVÄNDA STORHETER

1. SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport är resultatet av ett samarbete med företaget Insako AB. Projektet har huvudsakligen inriktats på infraljuds inverkan på värmeövergångstal men även frostpåslag har studerats. Proven genomfördes i en kanal där mätobjektet var anbringat. Infraljudet var antingen parallellt med eller vinkelrät mot luftflödet. Lufthastigheten förbi provobjektet varierades från nära noll meter per sekund upp till ca åtta meter per sekund. Toppvärdet på luftens partikelhastighet var mellan noll meter per sekund och sju meter per sekund.

Resultat från utförda prov visar att infraljud är ett sätt att väsentligt öka värmeöverföringstalet under vissa förhållanden. Som exempel kan nämnas att vid en lufthastighet på 0,2 meter per sekund ökade värmeövergångstalet med en faktor tre då infraljudet kopplades på. Från gjorda prov har, med hjälp av dimensionslösa storheter, ett försök till generalisering gjorts så att Nusselts tal blir en funktion av ett modifierat Reynolds tal. På detta sätt har luftflödets och infraljudets inverkan på värmeövergångstalet kunnat jämföras.

När det gäller frostpåslag kan däremot inte någon skillnad med eller utan infraljud upptäckas utöver det som kunde förväntas med hänsyn till det ökande värmeövergångstalet. Möjligen kan en noggrannare provmetod och/eller högre partikelhastigheter ge ytterligare information om infraljudets inverkan vid frostpåslag. För normala flänsförångare synes det inte praktiskt tekniskt-ekonomiskt realiserbart att utnyttja infraljud som en metod att öka värmeövergångstalet. Den energi som fordras för att åstadkomma infraljudet skulle, överslagsmässigt, i ett normalfall ge ungefär samma förbättring om den utnyttjades som fläktarbete för att öka lufthastigheten.

2. FÖRUTSÄTTNINGAR

Detta projekt har igångsatts i samarbete med företaget Insako AB och genomförts vid institutionen Mekanisk värmeteori och kylteknik, KTH med stöd från Statens råd för byggnadsforskning. Insako AB är specialister på infraljud och har konstruerat anläggningar med "infraljuds-" sotning av förbränningsanläggningar. Då erfarenheterna från dessa projekt var goda ansågs att infraljud möjligen kunde användas inom andra områden. De områden som här berörs är infraljuds inverkan på värmeövergångstal och frostpåslag.

Infraljud utgöres av akustiska vågrörelser med frekvenser under det hörbara området, dvs under 20 Hz. Våglängden varierar från 340 meter (1 Hz) till ca 17 meter (20 Hz).

Denna rapport är ett försök att på ett enkelt sätt kontrollera om infraljud påverkar värmeövergångstalet och/eller frostpåslag när luft strömmar invid en yta.

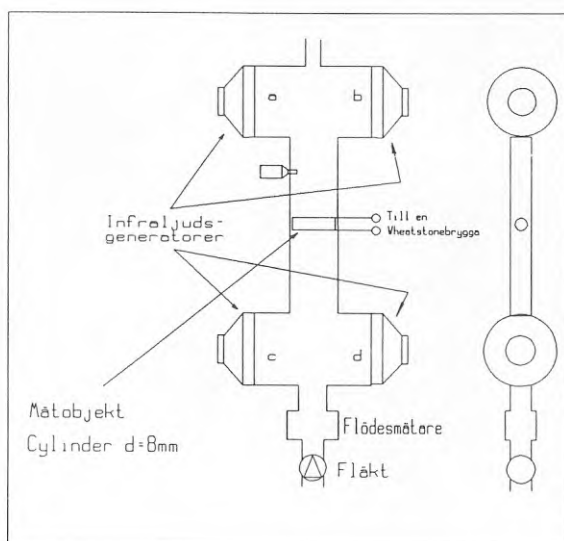
3. FÖRSÖKENS OMFATTNING

Två typer av försök i tre olika försöksuppställningar har gjorts. Samtliga försök har utförts med luft strömmande förbi någon typ av kropp eller yta. Denna har i sin tur varit fixerad i en kanal med rektangulärt tvärsnitt. I försöksuppställning ett och två (fig 1 & 2) har värmeövergångstalet mellan en värmd stav och omgivande förbiströmmande luft studerats. I försöksuppställning 3 har provkroppen utgjorts av en rektangulär yta (fig 3).

Ljudet har applicerats dels vinkelrätt den strömmande luften dels parallellt. Infraljudsgeneratorn kan kopplas antingen ge ett högt ljudtryck eller en hög partikelhastighet. Vid kopplingen högt ljudtryck kopplas (se fig 1) infraljudsgeneratorerna a+b i motfas i förhållande till c+d så att, i idealfallet, enda strömningen i kanalen åstadkommes av fläkten.

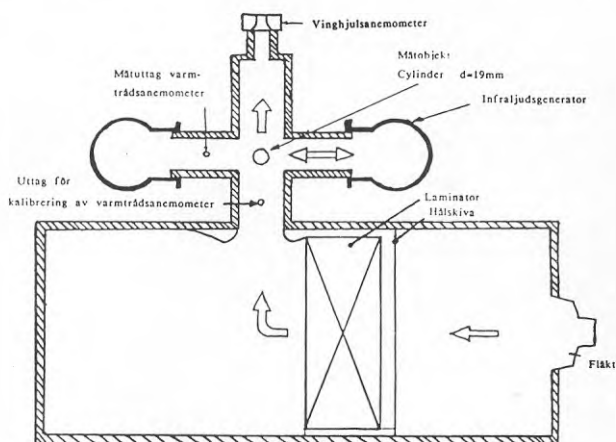
Vid kopplingen hög partikelhastighet fås infraljudsgeneratorerna a+b respektive c+d att svänga synkront så att luftpartiklar tvingas oscillera fram och åter över provobjektet. Till denna strömning överlagras strömningen som orsakas av fläkten. Den konstanta

lufthastigheten härrörande från fläkten (betecknas v_0) var för första provanläggningen från 0,1 m/s till 0,6 m/s



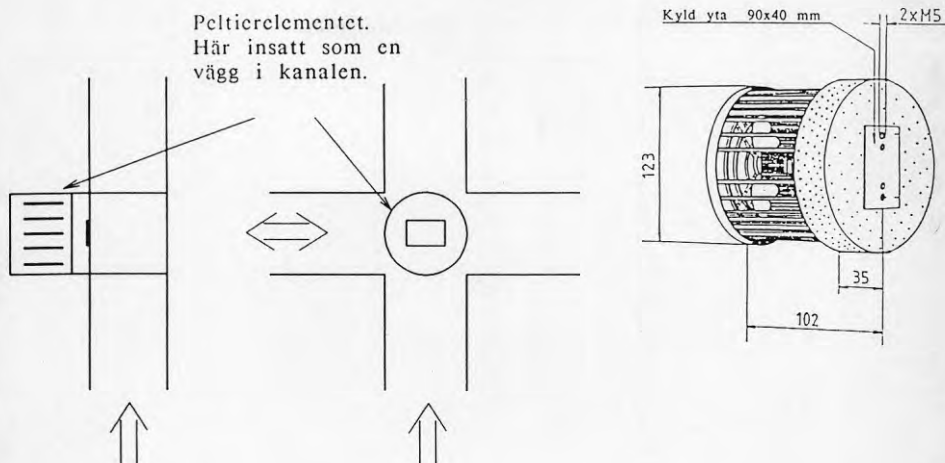
Figur 1

För fall två ändrades provanläggningen för att undersöka om uppmätta resultat kvarstår vid högre lufthastigheter och då ljudet appliceras vinkelrätt mot den konstanta lufthastigheten. Se figur 2. Uppmätta lufthastigheter vid anläggning två var 3 m/s upp till 7 m/s.



Figur 2

Det tredje fallet, se fig 3, har utgjorts av en rektangulär platta som kylts under daggpunkten så att den påfrostats. Denna platta sattes in på ena sidan i kanalen som användes i prov 2.



Figur 3

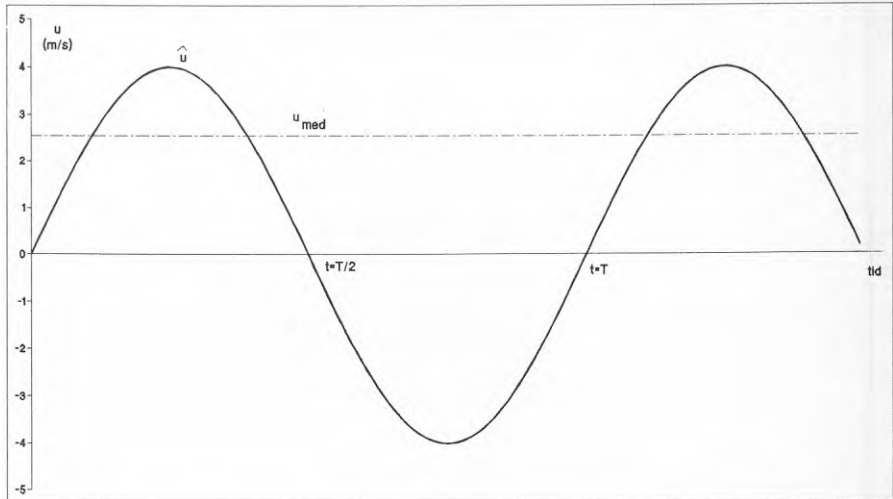
För att få ett jämförelsetal på hur kraftigt ljudet har varit har storheten partikelhastighet använts. För förklaring av partikelhastighet se avsnitt 4. Partikelhastighetens toppvärde har varierats från 0 m/s (=inget ljud) upp till cirka 6 m/s vid samtliga anläggningar.

4. PARTIKELHASTIGHET

Med partikelhastighet menas den hastighet, härrörande från ljudet, som ett litet luftelement antar vid ett visst tillfälle. Partikelhastigheten varierar från ett minvärde till ett maxvärde. Detta maxvärde kallas topphastighet eller amplitud och betecknas \hat{u} . Karakteristiska storheter för ljudet vid känd vågform är topphastighet och frekvens. Istället för toppvärdet på hastigheten kan "likriktade" medelhastigheten användas (jämför växelströmläran). Medelhastigheten betecknas u_{med} och är ett medelvärde på en partikels hastighet över en period. Denna hastighet kan, vid sinusform, räknas fram ur följande samband.

$$u_{\text{med}} = \frac{1}{T} \cdot 2 \cdot \int_0^{T/2} \hat{u} \cdot \sin \omega t \, dt = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{u}$$

Om en partikeis momentana hastighet plottas som funktion av tiden fås ett förlopp enligt figur 4.



Figur 4

5. SAMBAND UTRUSTNING OCH MÄTMETOD FÖR BESTÄMNING AV VÄRMEÖVERGÅNGSTAL

5.1 Teori

Med värmeövergångstal menas det värmemotstånd som luften närmast ytan utgör. Drivande faktorn för överförd effekt är temperaturdifferensen mellan ytans temperatur och, i vårt fall, luftens temperatur. Överförd värmeeffekt blir således, i ekvationsform

$$Q = \alpha_{\text{tot}} \cdot A \cdot \Delta t \quad (1)$$

där

α_{tot} = totala värmeövergångstalet

A = kroppens värmeutbytande area

Δt = temperaturdifferensen mellan ytan och luften

Genom att mäta tillförd effekt samt temperaturdifferensen kan således totala värmeövergångstalet bestämmas. Totala

värmeövergångstalet är sammansatt av tre bidrag konvektion, strålning och diffusion. Vid värmning kan (med torr yta) diffusionsvärmeövergångstalet sättas lika med noll.

Värmeövergångstalet genom strålningsutbyte med omgivningen har här, för att få en förenkling, ansetts som konstant i aktuellt temperaturintervall. Detta medför att värmeövergångstalet till följd av konvektion blir lätt att bestämma. För att kunna jämföra olika försök vid varierande storlek på värmeöverföringsytorna har följande dimensionslösa tal använts.

$$Nu = \text{Nusselts tal} = \alpha_{kw} \cdot d / \lambda$$

$$Re = \text{Reynolds tal} = w \cdot d / \nu$$

där

d = karakteristisk längd (exempelvis diametern på cylindern)

α_{kw} = värmeövergångstalet mellan luften och ytan pga

konvektion

λ = luftens värmeledningstal

w = hastigheten på luften

ν = kinematiska viskositeten

En annan fördel med dimensionslös representation, förutsatt att mediets Prandtl's tal ($Pr = \mu \cdot c_p / \lambda$) är givet, är att man från ett stort antal experiment vet att typen av samband blir

$$Nu = C \cdot (Re)^n \quad (2)$$

där storheterna C och n brukar ha konstanta värden inom vissa intervall på Reynolds tal. Tabell 1 ger värden på C och n som gäller för fritt upphängd cylinder med luft strömmande tvärs

Re	C	n
1-4	0.891	0.330
4-40	0.821	0.385
$40-4 \cdot 10^3$	0.615	0.466
$4 \cdot 10^3-4 \cdot 10^4$	0.174	0.618
$4 \cdot 10^4-4 \cdot 10^5$	0.0239	0.805

cylindern. Ämnesdata är tagna vid filmtemperaturen ($t_{\text{film}} = (t_{\text{yta}} + t_{\text{luft}}) / 2$). Luft förutsätts som värmeöverföringsmedium varför inverkan av Prandtl's tal ej beaktats i ekvation 2.

Tabell 1

5.2 Utrustning, material och provobjekt

Försök 1: Infraljudet applicerat parallellt med luftströmmen, se figur 1. För att kunna mäta oscillerande partikelhastighet, överlagrad lufthastighet och uppträdande temperaturer har följande instrument använts: gasflödesmätare, ljudnivåmätare Bruel & Kjaer och Philips termoskrivare med termoelement typ koppar-konstantan. Tvärsnittet i kanalen var 100x84 mm och längden 400 mm. Provobjektets diameter var 8 mm med en tunn tråd virad runt ytan. Trådtemperaturen (cylinderns yttemperatur) har bestämts indirekt genom resistansmätning. Spänningen över tråden uppmättes med en voltmeter för att, då resistansen var känd, kunna bestämma tillförd effekt.

Försök 2: Infraljudet applicerat vinkelrätt mot den konstanta luftströmmen, se figur 2. Instrumenteringen från föregående försök ändrades på följande vis: gasflödesmätaren ersattes med en vinghjulsanemometer och ljudnivåmätaren ersattes med en Disa varmtrådsanemometer.

Stavdiametern ökades till 19 mm och utfördes i kopparrör med slät yta. Kanaltvärsnittet ändrades till 100x100 mm och längden till 500 mm.

Försök 3: Samma försöksuppställning som vid försök 2 användes. Provobjektet utbyttes till en platta 90x40 mm. Denna platta sattes in i kanalens ena vägg (se kapitel 6).

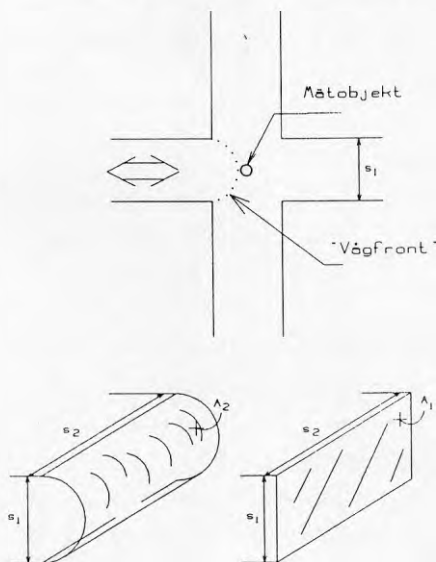
5.3 Provens utförande.

Genom att variera en storhet då övriga parametrar hölls konstanta registrerades denna storhets inverkan på värmeövergångstalet. Den värmeöverförande ytans temperatur har hållits konstant genom att öka tillförd effekt vid ökat värmeövergångstal. Den konstanta lufthastigheten vid försök 1 ställdes in på något av de tre värdena 0.07, 0.22 och 0.60 m/s.

5.4 Korrektion av topphastigheten.

Vid försök 2, då infraljudet var vinkelrätt mot luftflödet, var ljudet utsatt för en areaökning i kanalkorsen se figur 2. Denna areaökning borde medföra en minskning av partikelhastigheten. En

tänkt modell av detta kan vara att infraljudet utbreder sig ungefär som mantelytan på en cylinder, se fig 5. Då fås att $A_2 = s_1 \cdot s_2$ och att $A_1 = \pi \cdot s_1 \cdot s_2 / 2$. Kontinuitetsekvationen ger nu, om konstant densitet antas, att $u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$ vilket medför att $u_1 = (2/\pi) \cdot u_2 \approx 0.64 \cdot u_2$.



Figur 5

Ett enkelt prov gjordes för att få fram konstanten (≈ 0.64 om ovanstående resonemang stämmer) varmed uppmätt partikelhastighet skall korrigeras. Provet gick till på så sätt att varmtrådsanemometern sattes på vanliga mätplatsen, läge "ett" (se figur 2), där hastigheten uppmättes. Varmtrådsanemometern flyttades sedan till mitt i korset (med mätobjektet borttaget), läge "två", där partikelhastigheten åter uppmättes. Resultatet blev att i läge "ett" var hastigheten 3.8 m/s och i läge "två" 2.7 m/s. Förhållandet blev $2.7/3.8 = 0.71$ vilket uppmätt partikelhastighet borde korrigeras med. Detta stämmer någorlunda med resonemanget om den cylindriska utbredningen vilken gav konstanten 0.64. Vid utvärderingen har värdet 0.71 använts.

6. SAMBAND UTRUSTNING OCH MÄTMETOD FÖR BESTÄMNING AV FROSTPÅSLAG PÅ EN NEDKYLD YTA

6.1 Teori

Med frostpåslag menas det vatten som fälls ut och fryser till is då fuktig luft strömmar förbi en kall yta. Mängden is (vatten) som fälls ut kan bestämmas genom sambandet

$$\dot{m}_d = \dot{Q}_d / (r + l) \quad (\text{ekvation 3})$$

där

\dot{Q}_d = överförd värmeeffekt genom diffusion

r = ångbildningsvärmets

l = smältvärmets

Storheterna l och r fås ur ämnesdata för vatten, se bilaga tre. \dot{Q}_d bestäms ur ekvationen $\dot{Q}_d = \alpha_d \cdot A \cdot \Delta t$ där α_d fås från Bäckströms samband $\alpha_d / \alpha_{kw} = \text{konst} \cdot \Delta p / \Delta t$ (se referens 1). Totala värmeövergångstalet fås på samma sätt som tidigare ur $\alpha_{tot} = \dot{Q}_{tot} / (A \cdot \Delta t)$ och då $\alpha_{tot} = \alpha_d + \alpha_{kw}$ kan \dot{Q}_d beräknas. Nu kan mängden utfälld is (vatten) per tidsenhet beräknas ur ekv 3. Vid försöken uppmättes den mängd is som samlats på ytan genom att, efter provets slut då isen smälts, noggrant väga mängden. En jämförelse mellan den på detta sätt uppmätta mängden frost gjordes med vad som beräknats genom att utnyttja ekvation 3.

6.2 Utrustning, material och provobjekt

Det som skiljer instrumenteringen i detta försök från föregående försök då "torra" värmeövergångstalet bestämdes, är att försöksobjektet har utbytt från en cylinder i kanalen till en platta i kanalens vägg och att luftfuktigheten bestämts. Plattan är applicerad på ett peltierelement, se fig 3, vilket gör att plattan kan anta en temperatur lägre än omgivningens. I plattan sitter termoelement instuckna för mätning av plattans yttemperatur. Peltierelementet har kalibrerats så att man vid känd yttemperatur vet vilken kyleffekt, \dot{Q}_{tot} , detta motsvarar. Se bilaga 4.

6.3 Provets utförande

Hela provutrustningen var införd i ett kylrum där temperaturen hölls konstant vid 3 °C. Varje försök inleddes med att en viss spänning lades över peltierelementet. Uppträdande temperaturer, luftens hastighet och infraljudets "hastighet" registrerades. Samtidigt videofilmades försöket. Videofilmningen gick till på så vis att ca fem sekunder filmades varje minut. På detta sätt skulle man möjligen kunna se hur frosten växte och om det var någon skillnad på tillväxten med eller utan ljud.

7. RESULTAT VÄRMEÖVERGÅNGSTAL

7.1 Försök 1

Som väntat noterades en påtaglig ökning av värmeövergångstalet vid ökning av infraljudet när infraljudsgeneratorerna var kopplade för att ge en hög partikelhastighet. Vid högt ljudtryck registrerades däremot inte någon skillnad på värmeövergångstalet med eller utan ljud. Följande resonemang gäller således vid kopplingen hög partikelhastighet.

Hur ljudet inverkar kan ses i diagram 1 där värmeövergångstalet α_{tot} är inritat som funktion av ljudets topphastighet, \hat{u} , då ytttemperaturen var 63 °C respektive 105 °C. Lufttemperaturen var ca 20 °C. Vid lågt ljud (litet u) är det svårt att förutsäga inverkan på värmeövergångstalet, men vid ett något ökat ljud, $\hat{u} \approx 1.5$ m/s, kan ett visst mönster urskiljas.

Om ytttemperaturen höjs markant till 105 °C och hålls konstant på denna nivå vid samma lufttemperatur och samma prov som tidigare utförs märks i allt väsentligt en liknande utveckling vid ökad partikelhastighet som tidigare, se övre kurvan diagram 1.

Skillnaden är att grundnivån $\alpha_{0,\text{tot}}$ där värmeövergångstalet enbart beror av konstanta lufthastigheten från fläkten och strålningsutbyte med omgivningen ligger något högre än tidigare, omkring 3 W/m²°C.

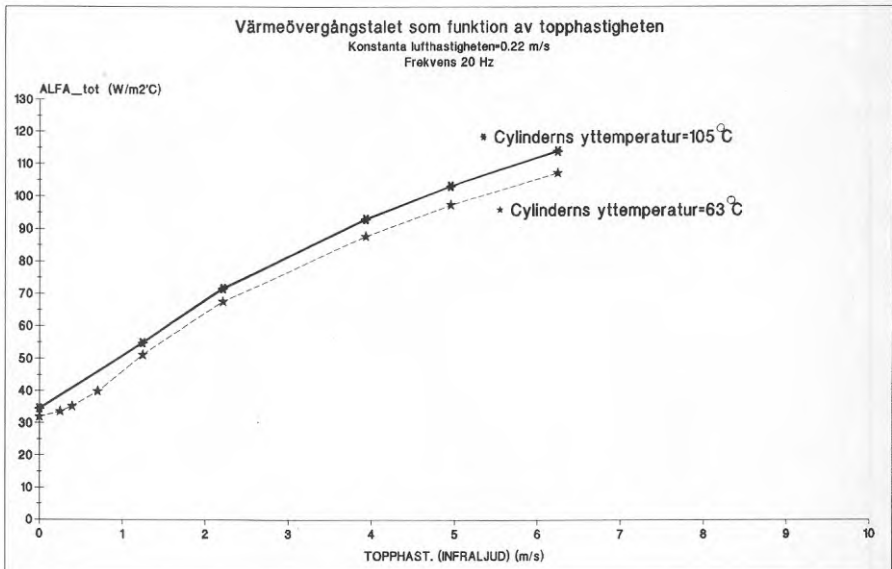


Diagram 1

Frekvensens inverkan är ej så påtaglig som topphastighetens, se diagram 2 där ingående parameter är frekvensen.

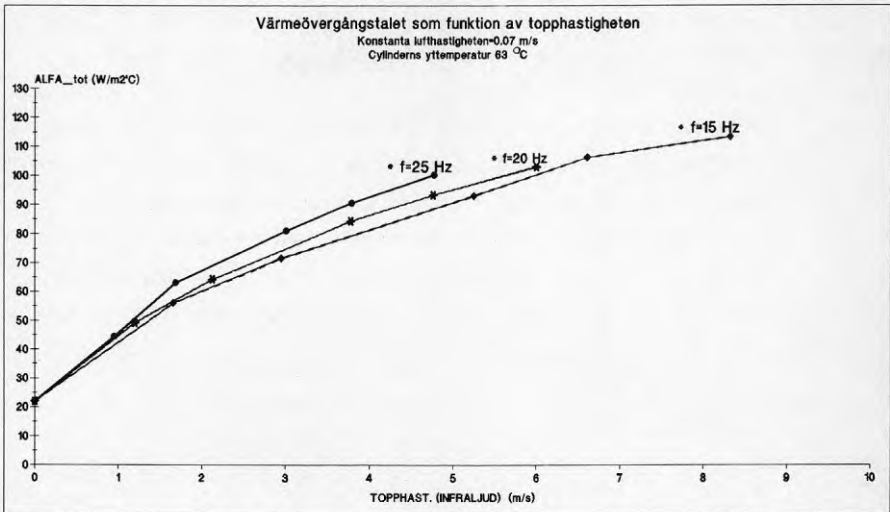


Diagram 2

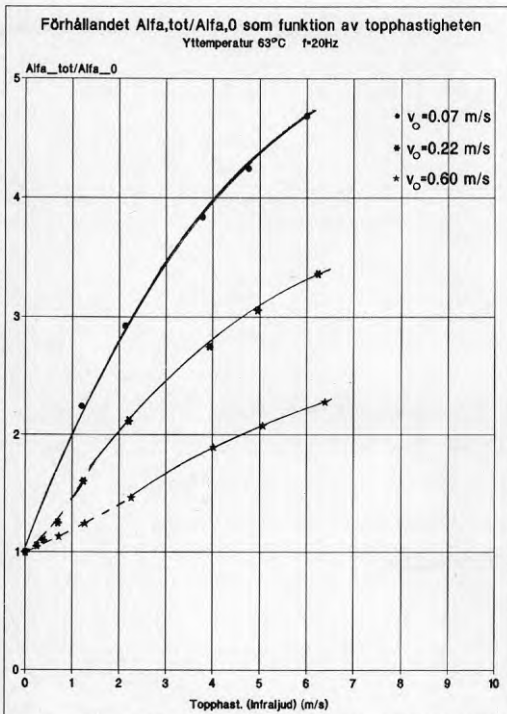


Diagram 3

Ett enkelt diagram där ljudets inverkan direkt kan utläsas är diagram 3 där y-axeln utgöres av $\alpha_{tot}/\alpha_{0,tot}$ och x-axeln som tidigare anger topphastigheten. Här ses direkt luftflödets inverkan. Ju högre luftflöde (luftfästighet) desto mindre inverkan har infra ljudet. Mätvärdena som använts för diagram ett till tre är medtaget i bilaga 1.

7.2 Försök 2

Denna försöksserie utfördes för att konstatera om effekterna av infraljudet kvarstår då luftflödet ökas och då infraljudet är vinkelrätt mot luftflödet.

Försöket inleddes med några provpunkter utan ljud för att kunna jämföra mot litteratordata, dvs tabell 1. Dessa resultat är införda i diagram 4 där en viss avvikelse mellan uppmätta värden i provanläggning och beräknade värden från ekvation 2 kan noteras. Denna avvikelse kan möjligen förklaras av att förhållandena i provkanalen är skilda från en i luften fritt upphängd cylinder.

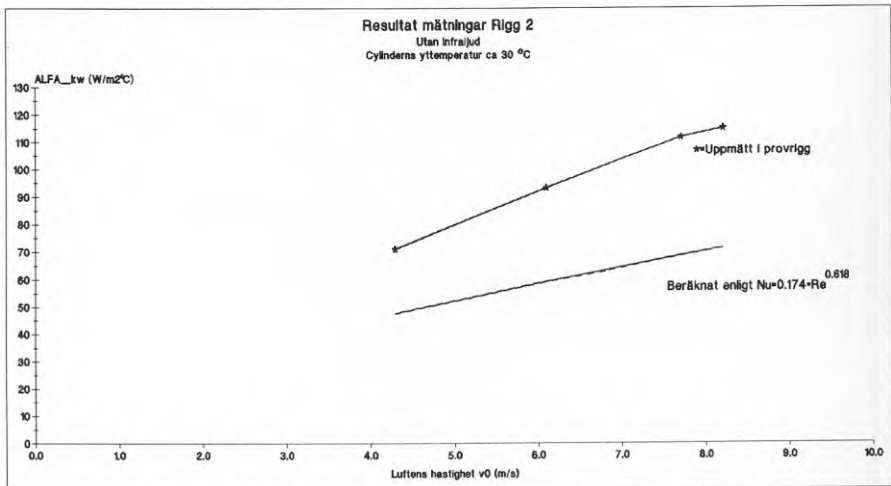


Diagram 4

Samma provdata finns även i diagram 5, som är ett log,log-diagram, men nu i dimensionslös form med $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ som funktion av $Re = w \cdot d / \nu$. I diagrammet har också införts provdata med ljud. Ur dessa punkter kan ses att infraljudet fortfarande inverkar på värmeövergångstalet. I proven har överlagrade lufthastigheten varit 3 m/s till 7 m/s alltså i samma storleksordning som topphastigheten.

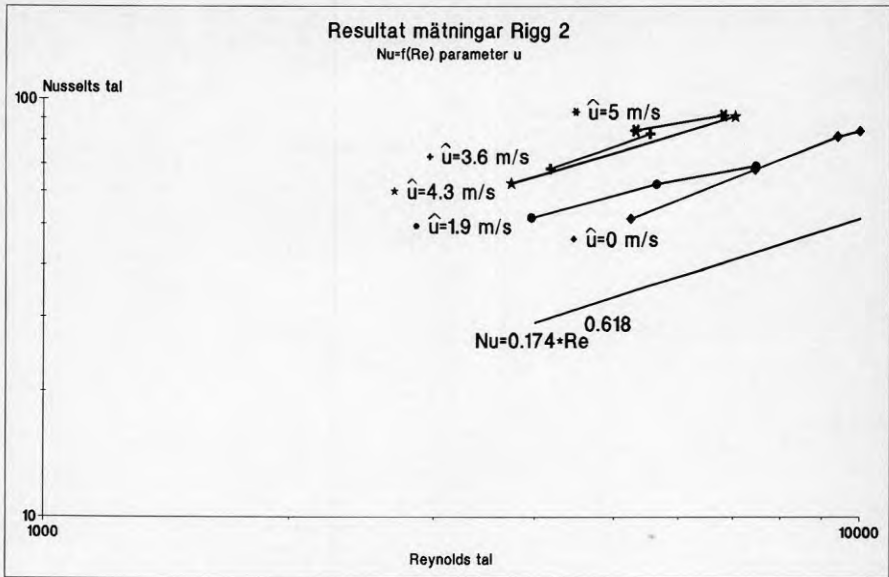


Diagram 5

Med utgångspunkt från detta och tidigare diagram kan antas att ljudets topphastighet och den överlagrade lufthastigheten påverkar värmeövergångstalet på likartade sätt. Ett antagande blir då, för att få ett generellt betraktelse sätt, att använda en modifierad hastighet i Reynolds tal. Ett analogt samband med det i ekvation 2 uppställs som får formen $Nu = C \cdot (Re_{mod})^n$ där Re_{mod} är en funktion av topphastigheten och konstanta hastigheten och sättet för hur dessa är geometriskt anbringade på provkroppen. Ett antagande som ligger nära till hands är, för försök 2 där hastighetskomponenterna från strömningen (v_0) respektive ljudets partikelhastighet (u_{med}) är vinkelräta mot varandra, att

$$w_{mod} = \sqrt{(u_{med})^2 + (v_0)^2} \quad (4)$$

varur $Re_{mod} = w_{mod} \cdot d / \nu \quad (5)$

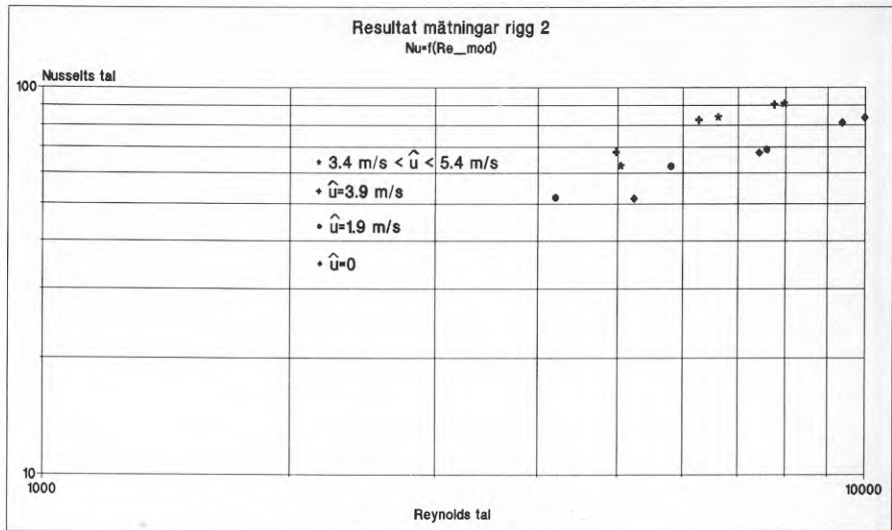


Diagram 6

Plottas provdata från försök 2 in i ett diagram så får det utseendet som i diagram 6. Fördelen med denna representation är att tidigare utförda försök enkelt kan jämföras.

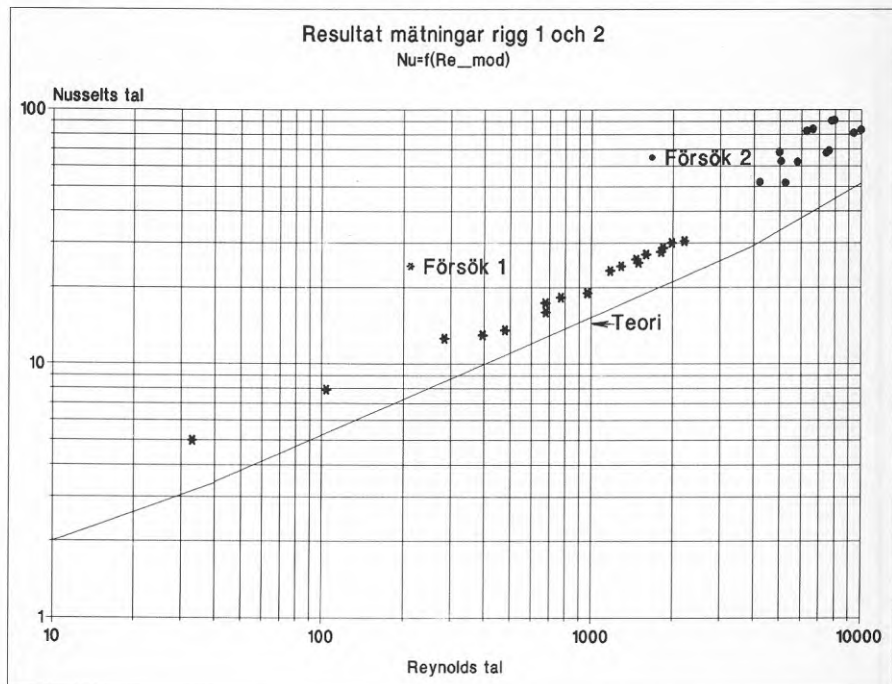


Diagram 7

I diagram 7 är modifierade hastigheten i Reynolds tal för försök 1 den adderade. Följande samband har använts för korrelationen av försök då ljud och överlagrad strömning har haft samma riktning. Detta kan anses gälla då konstanta lufthastigheten är låg i förhållande till ljudets partikelhastighet.

$$w_{\text{mod}} = u_{\text{med}} + v_0 \quad (\text{ekvation 6})$$

I diagram 7 har även införts en linje som representerar funktions-sambandet enligt ekvation 2 med konstanter enligt tabell 1. Som synes har konsekvent ca 30 % högre Nusselt tal erhållits än enligt teorin för det konventionella fallet. Det här mest intressanta är dock att konstatera att försökspunkterna för de olika fallen "med ljud" följer ungefär samma funktion som för fall "utan ljud". Den använda enkla metoden att modifiera Re-talet med hänsyn till ljudet synes användbar för ändamålet. Resultaten i diagram 7 kan sannolikt även användas för att genom extrapolation överslagsmässigt beräkna värmeövergångstalet vid ett något högre Reynolds tal med liknade förutsättningar som i utförda försök.

8. RESULTAT FROSTPÅSLAG

Provets tyngdpunkt kom att ligga på massdiffusionens storlek då det från videofilmningen ej gick att avgöra om det blev någon skillnad på frostens uppbyggnad eller i dess densitet. Sex försök utfördes totalt och av dessa finns fyra redovisade i nedanstående diagram.

Massdiffusionen per tidsenhet, \dot{m}_d , bestämdes genom att utfälld fuktmängd under viss tid vägdes. Resultaten från dessa fyra prov finns redovisade i diagram 8 med \dot{m}_d som funktion av aktuell kyleffekt. I diagrammet anges vid varje provpunkt värden på luftflöde och ljudintensitet vid provet. Närmare underlag återfinns i bilaga 3. I diagrammet har även införts "teoretiska" resultat. De visade punkterna har därvid beräknats med ekvation 3 och med data som svarar mot försöksbetingelserna.

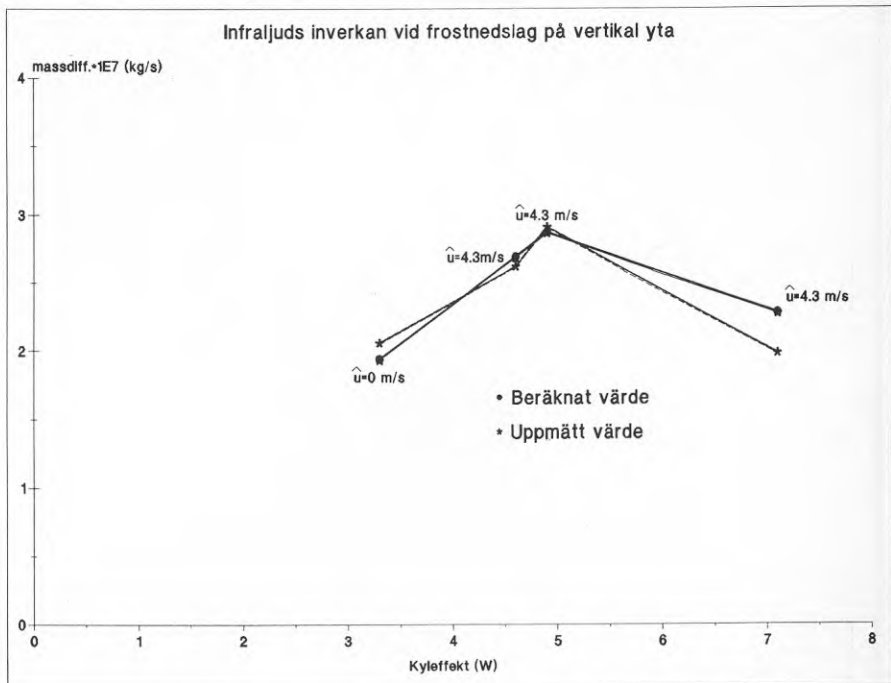


Diagram 8

Skillnaden mellan beräknad (från kyleffekten) och uppmätt fuktmängd är som synes ganska liten vid de värden på topphastigheten som här har använts. Möjligen kan frostens densitet och/eller ytråhet ha ändrats men detta gick ej att avgöra från videofilmningen.

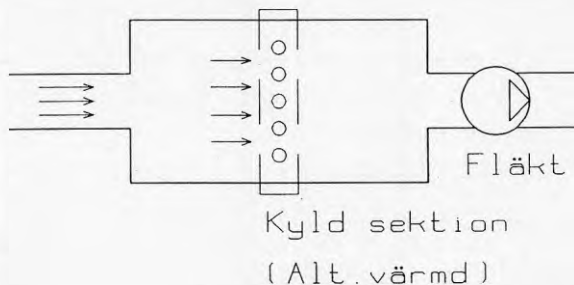
Slutsatsen av detta är att någon "avskakning" av frost genom infraljud inte kunnat registrerats. För att få en sådan effekt -om den kan erhållas- fordras tydligen högre topphastigheter än vad som kunde erhållas med den aktuella provutrustningen.

9. JÄMFÖRELSE MED KONVENTIONELL ANLÄGGNING

Den effekt som kan bli aktuell för att generera infraljud är uppskattningsvis enligt nedanstående exempel. I en befintlig försöksanläggning alstras infraljudet i en helmholtzresonator med dimensionerna:

$$\text{Tvärsnittsarea } A_t = 0.6 \times 0.25 \text{ m}^2$$

Hydrauliska diametern $d_h = 4 \cdot A_t / U = 4 \cdot 0.25 \cdot 0.6 / (2 \cdot 0.25 + 2 \cdot 0.6) = 0.353$ m.
 Längd $L = 1$ m. Infraljudets amplitud $\hat{u} = 20$ m/s $\Rightarrow u_{med} = 12.7$ m/s.
 Tillförd effekt till anläggningen har uppmätts till 700 W. Detta då kanalen var "tom", dvs utan den kylde sektionen insatt.



Figur 6

Om denna infraljudsgenerator skulle ersättas med enbart en fläkt bör denna fläkt ge ett ökat luftflöde så att en lufthastighet (enligt ekvation 6) på ca 12.7 m/s uppstår för att samma värmeövergångstal skall uppträda. Detta luftflöde blir då $(\dot{V} = v_0 \cdot A_t)$
 $12.7 \cdot 0.25 \cdot 0.6 = 1.91$ m³/s $= 6.9 \cdot 10^3$ m³/h.

Första huvudsatsen (se referens 1) ger

$$q = \epsilon_t + i_2 - i_1 + \frac{1}{2} \cdot (w_2^2 - w_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) + |b|$$

Om $q \approx 0$, $i_2 - i_1 \approx 0$, $w_1 \approx 0$ och $h_2 - h_1 \approx 0$ blir med $w_2 = w$

$$\epsilon_t = -\frac{1}{2} \cdot w^2 - |b| \text{ där } |b| \text{ är förluster.}$$

Dessa förluster uttrycks ofta som $\Delta p_f / \rho$. Δp_f är tryckfallet i systemet och ρ är luftens densitet. Sambandet för dessa är $\Delta p_f / \rho = f_1 \cdot w^2 \cdot L / d + \zeta \cdot w^2 / 2$ där f_1 kan beräknas ur ekvationen $f_1 = 0.0016 + 0.111 \cdot Re^{-0.237}$ då $100 \cdot 10^3 < Re < 1000 \cdot 10^3$. Denna ekvation gäller strömning i en ren kanal ej vid strömning genom en värmväxlare. I en värmväxlare är f_1 större, ofta storleksordningen 10 gånger eller mer. Ekvationen kan dock användas här då vi räknar en på tom kanal.

I vårt fall blir $Re = w \cdot d_h / \nu = 12.7 \cdot 0.353 / (15 \cdot 10^{-6}) = 300 \cdot 10^3$. Detta ger nu $f_1 = 0.0072$. Som engångsförluster har antagits att tre areaförhållanden ($A_1 / A_2 = 2$) uppträder samt ett inlopp. Då fås $\zeta = 0.1 + 0.25 + 0.2 + 1 = 1.55$ och $\Delta p_f / \rho = 12.7^2 \cdot (0.0072 \cdot 1 / 0.353 + 1.55 / 2) = 128.3$.

Arbetet per massenhet blir nu $\epsilon_t = -0.5 \cdot 12.7^2 - 128.3 = -209 \text{ Nm/kg}$ där minustecknet betyder att detta arbete skall tillföras.

Tillförd effekt fås ur $\dot{E}_t = \dot{m} \cdot |\epsilon_t|$ där \dot{m} är massflödet.
 $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 1.91 \cdot 1.2 = 2.29 \text{ kg/s}$. Nu fås $\dot{E}_t = \underline{480 \text{ W}}$.

Om fläktens verkningsgrad sätts till 0.7 ($\eta_F = 0.7$) och elmotorns verkningsgrad till 0.65 ($\eta_{elm} = 0.65$) fås totalt tillförd effekt till fläkten ur

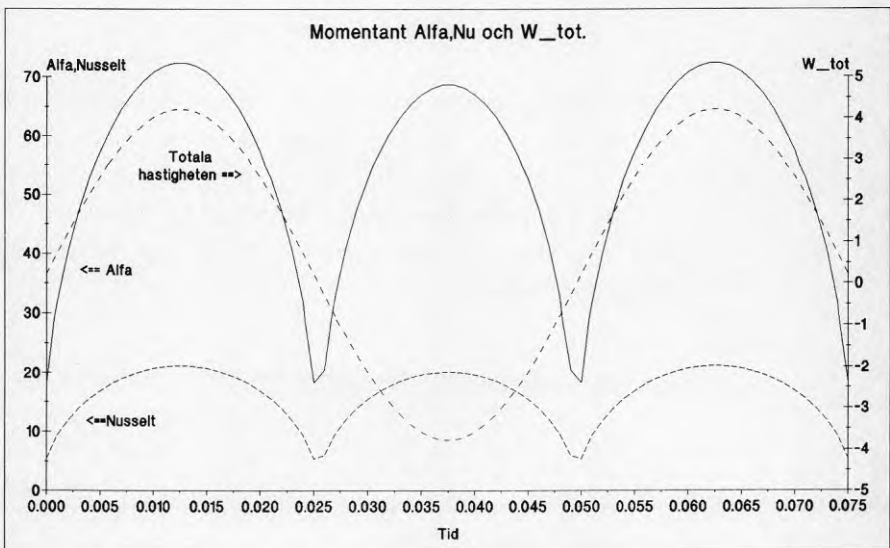
$$\dot{E}_{tot} = \dot{E}_t / (\eta_F \cdot \eta_{elm}) = 480 / (0.7 \cdot 0.65) = \underline{1050 \text{ W}}$$

Infraljudsgeneratorns effektbehov var som tidigare nämnts 700 W och enligt dessa överslagsberäkningar är fläktens effektbehov av samma storleksordning.

10. EN FORTSÄTTNING PÅ PROJEKTET.

Då värmeöverföring sker vid påtvingad konvektion beror värmeövergångstalet främst av hastigheten på mediet som strömmar förbi ytan, se kap 5. Tidigare framtagna samband (se ref 3) gäller vid konstant lufthastighet. För att undersöka om man kan använda sig av dessa samband har vid utvärderingen av försöksresultat hastigheten ingående i Reynolds tal modifierats. Se kapitel 7 ekvation 4 och 6. Detta har då varit ett enkelt sätt att ta hänsyn till att luftens hastighet pga infraljud har varierat med tiden invid ytan.

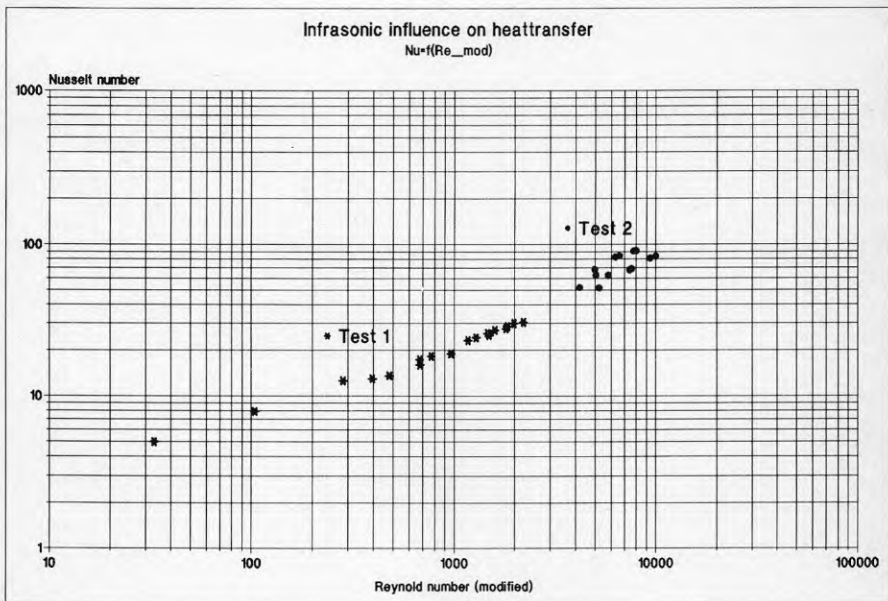
En fortsättning på projektet synes vara att noggrannare bestämma den modifierade hastigheten i Reynolds tal för att teoretiskt kunna beräkna ett värmeövergångstal med hjälp av ekvation 2. I ett datorprogram kan luftens hastighet i varje ögonblick och ett därtill hörande värmeövergångstal beräknas. Ett exempel på hur resultatet kan tänkas se ut visas i figur 7.



Figur 7

13. ENGLISH SUMMARY

This project is the result of a co-operative work between the company Insako AB and the department of Applied Thermodynamics and Refrigeration, KTH with financial support from the Swedish Council of Building Research. Studies are made on the subject of infrasonic influence on heat transfer to investigate the possibilities to increase the rate of heat transfer in a simple way. The conclusions from experimental work is that a remarkable increase in the rate of heat transfer with infrasonic can be achieved, up to about five times in tests with low air flow rates. An attempt to bring level with the heat transfer due to velocity induced by the fan with the heat transfer due to the infrasonic are shown in the chart below. The quantities used here are the non-dimensional Reynolds and Nusselts numbers. The velocity in Reynolds number have been modified in two ways depending on the current geometry (see equation 4 and 6). In this chart most of the test results are shown. This type of diagram seem to be useful to estimate the coefficient of heat transfer in a wide range and by this method it seem to be possible to calculate the influence from infrasonic effects.



Mätvärden försök 1

f	temp	v ₀	α_1	\hat{u}
Hz	°C	m/s	W/m ² °C	m/s
25	63	0.07	100.2	4.77
			90.5	3.79
			81.1	3.01
			63.1	1.69
			44.5	0.95
20	63	0.07	103.0	6.0
			93.3	4.76
			84.4	3.78
			64.3	2.13
15	63	0.07	49.3	1.20
			113.3	8.32
			106.2	6.61
			93.0	5.25
20	105	0.07	71.6	2.95
			56.0	1.66
			112.4	7.0
			101.8	5.56
			85.3	3.93
25	105	0.07	68.6	2.21
			53.7	1.24
			38.9	0.70
			25.8	0.22
			103.6	4.14
25	105	0.07	91.8	4.45
			78.9	3.15
			62.1	1.77
			46.0	1.00
25	105	0.07	25.7	0.56

Bilaga 1

f	temp	v ₀	α_1	\hat{u}
Hz	°C	m/s	W/m ² °C	m/s
12	105	0.07	116.9	8.26
13.5			107.5	7.34
15			104.5	6.60
17.5			98.3	5.66
20			94.1	4.95
22.5			90.0	4.40
25			87.6	3.96
27.5			85.0	3.60
30.0			82.7	3.30
32.5			81.6	3.05
35			79.0	2.83
37.5			75.0	2.64
42.5			69.9	2.33
50			65.6	1.98
55			66.7	1.80
60	61.8	1.65		
70	50.9	1.42		
80	38.8	1.24		
100	28.1	0.99		
20	105	0.22	114.1	6.24
			103.3	4.95
			93.1	3.93
			71.7	2.21
			54.9	1.24
			34.5	0
	63	0.22	107.3	6.24
			97.5	4.95
			87.8	3.93

f	t emp	v o	α_1	\hat{u}
Hz	°C	m/s	W/m ² °C	m/s
			67.6	2.21
20	63	0.22	51.2	1.24
			39.9	0.70
			35.2	0.39
			33.6	0.25
	105	0.60	111.5	6.39
			102.2	5.07
			93.7	4.02
			75.2	2.26
			64.0	1.27
			57.0	0.72
			54.3	0.40
			50.4	0
	63		109.1	6.39
			99.5	5.07
			90.7	4.02
			70.0	2.26
			59.6	1.27
			54.2	0.72
			47.9	0

Bilaga 1

Beräkningar mätvärden försök 1

v_0 (m/s)	\hat{u} (m/s)	α_{tot} (W/m ² °C)	α_{kw} (W/m ² °C)	Nu (-)	Re _{mod} (-)
0.07	6	103	98	28.7	1841
	4.76	93.3	88.3	25.9	1468
	3.78	84.4	79.5	23.3	1172
	2.13	64.3	59.3	17.4	675
	1.2	49.3	44.3	13.0	395
	0	22.0	17.0	5.0	33
0.22	6.24	107.3	102.3	30.0	1985
	4.95	97.5	92.5	27.1	1596
	3.93	87.8	82.8	24.3	1288
	2.21	67.6	62.6	18.3	770
	1.24	51.2	46.5	13.6	477
	0	31.9	26.9	7.9	104
0.60	6.39	109.1	104.1	30.5	2210
	5.07	99.5	94.5	27.7	1812
	4.02	90.7	85.7	25.1	1495
	2.26	70.0	65.0	19.0	965
	1.27	59.6	54.6	16.0	667
	0	47.9	42.9	12.6	284

Förhållanden

Frekvens $f = 20$ Hz

Yttemperatur $t_{yta} = 63$ °C

Stavdiameter $d = 8$ mm

Kinematiska viskositeten $\nu = 16.9 \cdot 10^{-6}$ m²/s

Luftens värmeledningstal $\lambda = 27.3 \cdot 10^{-3}$ W/m°C

$$Re_{mod} = (v_0 + u_{med}) \cdot d / \nu$$

$$\alpha_{kw} \approx \alpha_{tot}^{-5}$$

Bilaga 2

Mätvärden från försök 2

v_0 (m/s)	Re (-)	\dot{Q} (W)	t_{cyl} (°C)	t_{luft} (°C)	α_{tot} (W/m ² °C)	α_{kw} (W/m ² °C)	Nu (-)	\hat{u} (m/s)	Re _{mod} (-)
3.25	3957	2.95	28.85	22.4	76.6	71.5	51.9	1.82	4202
4.62	5628	2.96	28.25	22.8	91.0	86.0	62.4	1.82	5802
6.11	7442	2.96	27.85	22.9	100.2	95.2	69.0	1.91	7588
5.56	6794	2.97	26.9	23.1	130.9	125.3	90.9	5.41	7967
4.36	5310	2.96	27.2	23.1	120.9	83.0	84.0	5.10	6622
3.07	3739	2.95	28.6	23.2	91.5	61.4	62.7	4.37	5046
5.77	7028	2.98	27.5	23.65	129.7	124.7	90.4	4.23	7754
4.54	5530	3.01	27.9	23.65	118.7	113.7	82.5	3.82	6274
3.45	4175	3.01	28.9	23.8	98.9	93.9	68.1	3.44	4977
4.3	5237	3.32	28.8	21.5	76.1	71.1	51.6	0	5237
6.1	7429	3.29	27.3	21.7	98.3	93.3	67.7	0	7429
7.7	9378	3.31	26.6	21.9	116.7	111.7	81.0	0	9378
8.2	9987	3.31	26.5	21.9	120.0	115.0	83.4	0	9987

Förhållanden

Värmeöverföringsarea $A = 5.97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Stavdiameter $d = 19 \text{ mm}$

Kinematiska viskositeten $\nu = 15.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Luftens värmeledningstal $\lambda = 26.2 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$

Konstanta lufthastigheten (v_0) vinkelrät mot infraljudet

$$Re_{mod} = (\sqrt{(u_{med})^2 + (v_0)^2} \cdot d) / \nu$$

$$\alpha_{kw} \approx \alpha_{tot}^{-5}$$

Bilaga 3

Mätvärden från försök 3

v_0	\hat{u}	\dot{Q}_2	t_{yta}	α_d/α_{kw}	α_{tot}	α_{kw}	α_d	$\dot{m}_d \cdot 10^7$ beräknad	$\dot{m}_d \cdot 10^7$ uppmätt
(m/s)	(m/s)	(W)	(°C)	(-)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(W/m ² °C)	(kg/s)	(kg/s)
2.98	0	3.3	-22	0.2	36.7	30.6	6.1	1.94	2.06
3.14	4.3	4.9	-16	0.2	71.6	59.7	11.9	2.87	2.91
0.92	4.3	4.6	-17	0.2	63.8	53.2	10.6	2.69	2.62
7.39	4.3	7.1	-8	0.1	179.3	163.0	16.3	2.28	1.98

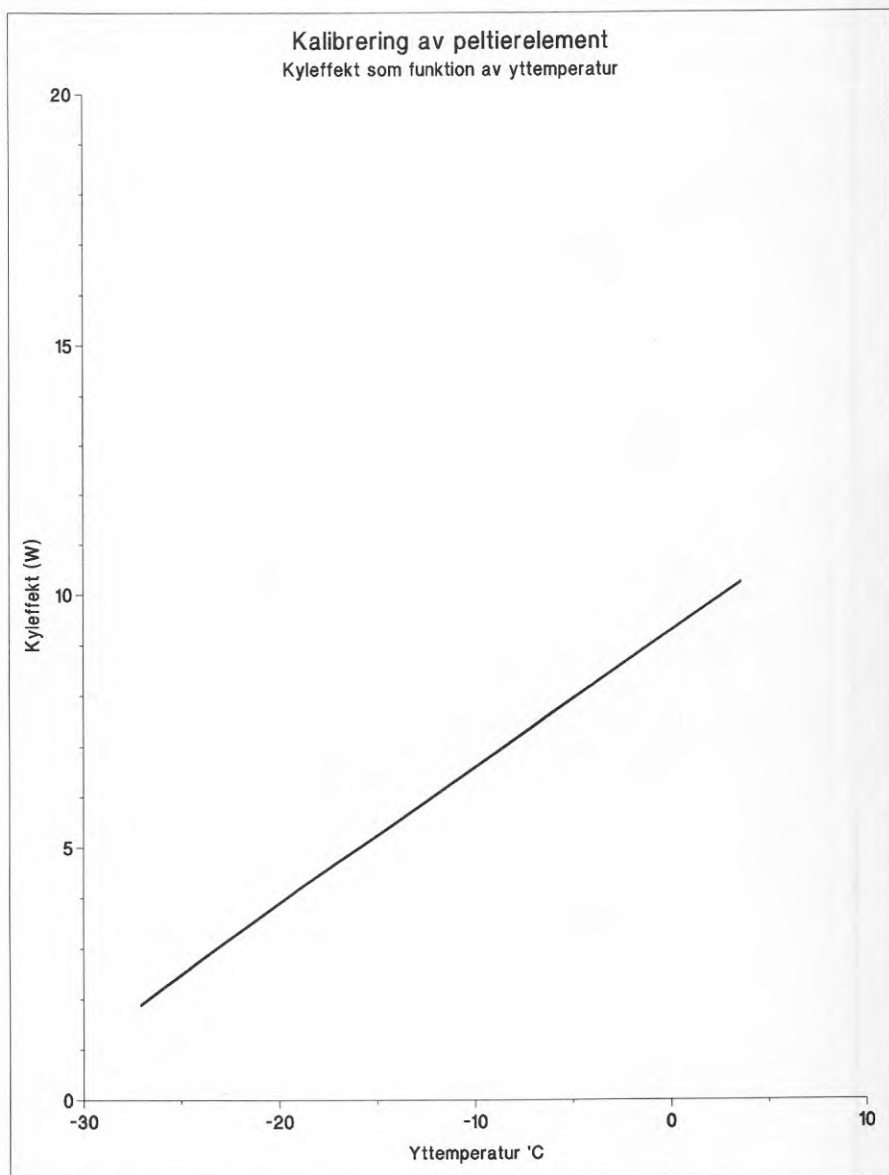
Förhållanden och använda ekvationer:

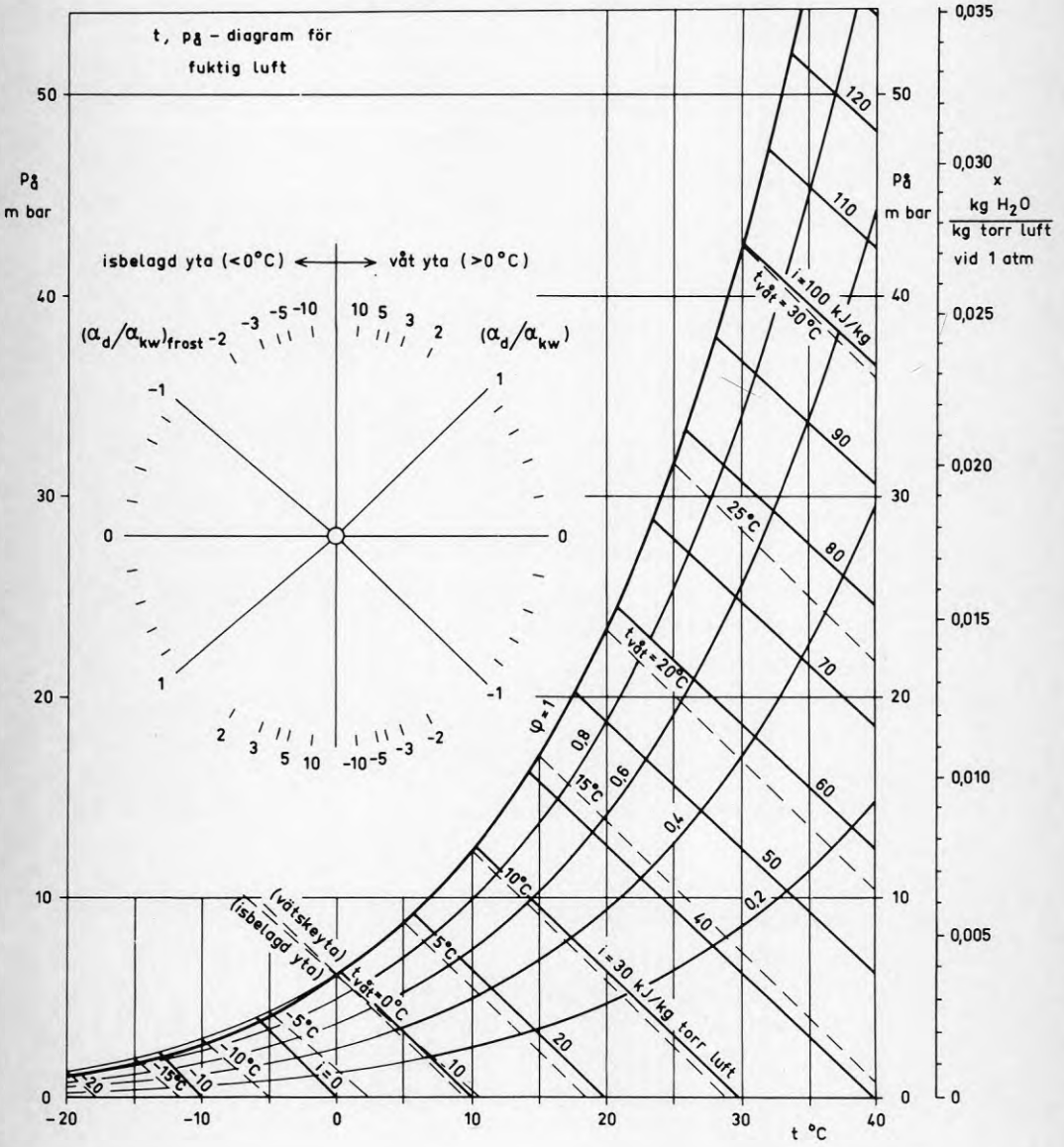
$$\alpha_{kw} = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta t \cdot (1 + \alpha_d / \alpha_{kw})} = \frac{\dot{Q}}{90 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot (3 - t_{yta}) \cdot (1 + \alpha_d / \alpha_{kw})}$$

$$\dot{m}_d = \frac{\alpha_d \cdot A \cdot (t_{luft} - t_{yta})}{(r + l)}$$

r = Ångbildningsvärmets för vatten vid 0 °C = 2500 kJ/kg

l = Smältvärmets för vatten vid 0 °C = 335 kJ/kg





Beteckningar på storheter

Bilaga 6

Storhet	Namn	Enhet
A	Värmeöverföringsarea	m ²
A _t	Tvärsnittsarea	m ²
C	Konstant	-
d	Diameter (karakteristisk längd)	m
\dot{E}_{tot}	Effekt	W
f _l	Friktionsfaktorn	-
l	Sublimationsvärmets	J/kg
\dot{m}_d	Massdiffusion per tidsenhet	kg/s
n	Exponent på Reynolds tal	-
Nu	Nusselt tal	-
Δp_f	Tryckfallsförluster	-
\dot{Q}_{tot}	Totalt överförd värmeeffekt	W
\dot{Q}_d	Överförd värmeeffekt genom massdiffusion	W
r	Ångbildningsvärmets	J/kg
Re	Reynolds tal	-
Re _{mod}	Reynolds tal modifierat map hastigheten	-
t _{film}	Medeltemperatur som används vid bestämning av ämnesdata	°C
t _{yta}	Yttemperatur på mätobjekt	°C
u _{med}	Medelvärde på partikel hastigheten	m/s
v ₀	Hastigheten på luften	m/s
w _{mod}	Modifierad hastighet i Reynolds tal (ex u _{med} +v ₀)	m/s
\dot{V}	Volymflöde	m ³ /s
α	Värmeöverföringstal	W/m ² °C
ϵ_t	Arbete per massenhet	Nm/kg
ρ	Densitet	kg/m ³
ζ	Engångsförluster kanalstr.	-
λ	Värmeledningsförmåga	W/m°C
ν	Kinematisk viskositet	m ² /s



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 841139-5 från
Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för mekanisk
värmeteori och kylteknik, Tekniska högskolan, Stockholm.**

R15: 1989

ISBN 91-540-4979-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709015

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst,
171 88 Solna**

Cirka pris: 37 kr exkl moms