



Resurseffektiva kyl- och värmepumpssystem
samt kyl- och värmelager

Effektivare avfrostning av luftberörda förångare

More efficient defrost of air coil evaporators

Förord

Inledningsvis önskar vi som arbetat i detta projekt, Erik Björk och Björn Palm, uttrycka vår uppskattning till Energimyndigheten, Effsys-Expand och vår industripartner Electrolux AB för det finansiella stöd vi fått i detta projekt. Vi vill också tacka deltagande examensarbetare och praktikanter och personalen på labbet vid Avd. för Tillämpad termodynamik och kylteknik.

Sammanfattning

I alla värmepumpande processer där värme tas ur omgivningsluften, för kylning eller uppvärmning, finns risk för frostbildning på förångarytorna. Frosten ökar tryckfallet, leder till högre fläktarbete och försämrar värmeövergången, dvs sänker förångningstemperaturen vilket leder till lägre energieffektivitet. I detta projekt har olika metoder för att minska påfrostningen och effektivisera avfrostningen studerats för att på detta sätt öka effektiviteten för värmepumpen som helhet.

Efter en inledande litteraturstudie och ett examensarbete inriktat mot effektivare avfrostning koncentrerades arbetet på olika ytbeläggningar. En välinstrumenterad vindtunnel byggdes för att studera frosttillväxt och avfrostning under typiska förhållanden för en luftvärmepump. Samtidigt inleddes ett samarbete med RISE Surface, Process and Formulation som har kunskapen och möjligheten att tillverka superhydrofoba och superhydrofila ytbeläggningar.

Det har länge varit allmänt känt att hydrofila ytor har en fördel i luftvärmväxlare under kondenserande förhållanden då en sådan yta ger "platta" vattendroppar med lågt tryckfall för den förbipasserande luften. Vad som är mindre känt, och som visas i denna studie, är att hydrofila ytor även har stora fördelar under frostande förhållanden.

De experimentella resultaten visade att hydrofila ytbeläggningar har fördelaktiga egenskaper för en luftvärmepump under frostande förhållanden med cykellängder 30 till 70 % längre än obehandlad aluminium. Förklaringen var de hydrofila ytbeläggningarnas mer effektiva avfrostningar vilka lämnade en i det närmaste torr yta efter sig vilket i sin tur gjorde den efterföljande driftsperioden längre. Den superhydrofoba ytbeläggningen fick efter ett fåtal cykler problem med vattendroppar som hängde kvar efter avfrostningen vilket gav cykellängder kortare än den obehandlade aluminiumytan.

Summary

In all heat pumping processes where heat is extracted from the ambient air, for cooling or heating, there is a risk of frost formation on the evaporator surfaces. The frost increases the pressure drop, leading to increased pumping power and decreased heat transfer, i.e. decreases the evaporation temperature and thereby lower energy efficiency. In this project different alternative methods of defrosting and methods of decreasing the frost growth, thereby increasing the energy efficiency of the system were explored.

The main result of the project is that hydrophilic surface treatments prolonged the cycle-times compared to other surfaces. They will therefore increase the overall efficiency of the heat pump system. The explanation is that the defrost is more efficient in terms of water retention. After defrost the hydrophilic surface was almost completely dry which explained the prolonged on-period.

Innehåll

1	Bakgrund	1
1.1	Avfrostningsbehov i Sverige (studier utförda inom projektet)	2
2	Projektdeltagare.....	7
3	Mål.....	8
4	Genomförande.....	9
5	Resultatsammanfattning	10
5.1	PCM/TES assisterad reverserad cykelavfrostning	10
5.2	Förtorkning av luft	10
5.3	Fövärmning av luft.	10
5.4	Ultraljud	11
5.5	Flänsarnas konfigurering.....	11
5.6	Flänsarnas ytstrukturer	12
5.7	Ytbeläggningar	12
5.8	Experimentella resultat.....	12
6	Måluppfyllelse	16
7	Fortsatt arbete	17
	Keywords	19
	Publikationer	19
	Referenser	21

1 Bakgrund

Luftvärmepumpar har en stor marknadsmässig fördel genom sitt låga pris jämfört med bergvärmepumpar. Med mildare klimat i de mer befolkade delarna av landet är det rimligt att förutspå ett ökat intresse för luftvärmepumpar, speciellt i kombination med nybyggda hus där energikraven ger ett lågt uppvärmningsbehov, vilket bättre matchas av en luftvärmepump än av en bergvärmepump. Det mildare klimatet kan dock förväntas innebära ett större krav på avfrostningssystemen och en större kostnad för att genomföra avfrostningen eftersom luftfuktigheten blir högre och förångningstemperaturerna även fortsättningsvis kommer att ligga under 0 °C under stora delar av året. Redan idag utgör avfrostningen en icke oväsentlig del av energianvändningen i luftvärmepumpar vintertid och det är sannolikt att denna andel inte kommer att minska i framtiden.

Studier av påfrostning och frosttillväxt har redovisats i några avhandlingar i Sverige redan för något tiotal år sedan, av Mälhammar [51], Östin [52], och Fahlén [53], varav det första utfördes vid Energiteknik, KTH. Med hjälp av dessa arbeten, och andra, är det möjligt att förutsäga frosttillväxt och frostens egenskaper under olika förhållanden.

Studien av Fahlén [53], visade att den genomsnittliga effektivitetsminskningen till följd av frostpåslag är ca 10 % för luftvärmepumpar. Figur 1 åskådliggör fenomenet tydligt. Ett språng vid ca 7 °C visar skillnaden i COP med och utan avfrostning. Till höger om detta språng, dvs. vid högre temperaturer, bildas enbart kondensvatten som kontinuerligt dräneras från värmepumpen. Med andra ord är ingen avfrostning nödvändig. Vid lägre temperaturer avfrostas värmepumpen regelbundet men som synes till priset av lägre COP.

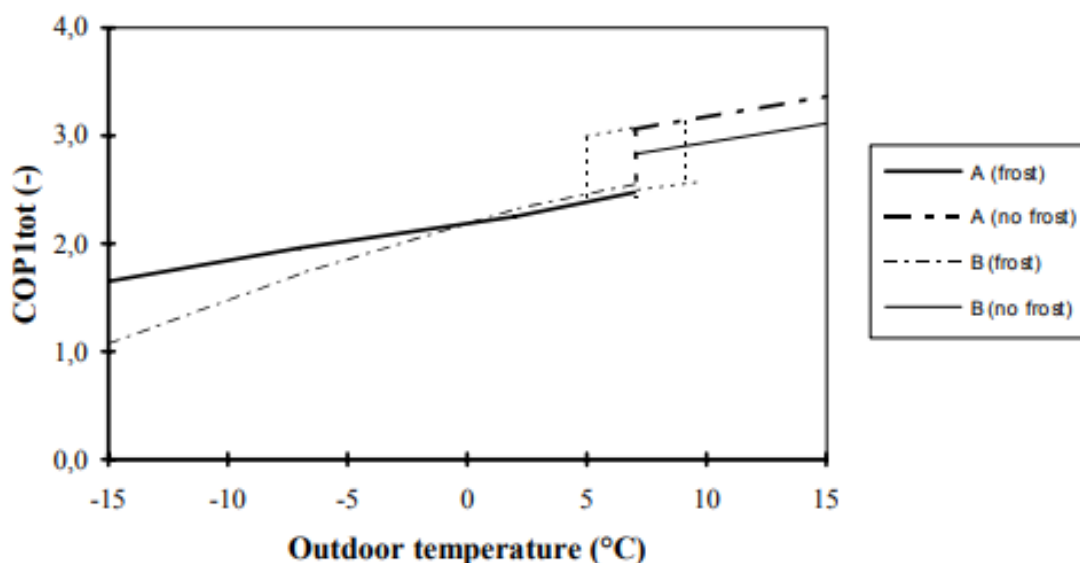


Fig. 1 Typiska prestanda för två luftvärmepumpar i jämförelse [53]

Det finns några olika metoder att åstadkomma avfrostning och dessa kan kräva mer eller mindre energi. Det kanske vanligaste sättet är genom att reversera processen så att förångaren temporärt fungerar som kondensator. En annan metod är att värma förångaren med elektriska värmestavar. En tredje att låta het köldmedieånga kondensera i förångaren. Vid omgivningstemperaturer över fryspunkten kan avfrostning också ske genom att systemet stängs av tills frosten smält bort. Det finns också möjlighet att åstadkomma avfrostning med hjälp av "lagrad" underkylningsvärme från tidigare driftscykel. Med denna metod kan avfrostningen åstadkommas till en mycket liten energikostnad.

Under senare år har flera forskningsrapporter behandlat möjligheten att minska påfrostning genom att belägga ytan med ett skikt som påverkar ytspänningen. Både hydrofoba och hydrofila ytskikt har testats och båda typerna har, i olika studier, visats ge en fördröjning av påfrostningen. I vissa fall har förbättringen upphört efter några cykler, men i andra fall har effekten visats vara bestående. Behandlade ytor kan vara fördelaktiga också för att de bidrar till att vattendroppar lättare rinner av, vilket kan vara väsentligt ur flera aspekter. Såväl hydrofoba som hydrofila ytor har testats även för detta ändamål. På hydrofila ytor bildas en film som lätt rinner av, medan på hydrofoba ytor vattnet samlas i droppar som rinner av och efterlämnar en närmast torr yta. I det senare fallet är det viktigt att dropparna verkligen rinner av och inte blir hängande på ytan. Det är sen tidigare känt att hydrofila ytor är fördelaktiga på värmeväxlare under kondenserande förhållanden då kondenserat vatten bildar en platt film på värmeväxlarens flänsar och rör snarare än uppresta vattendroppar, vilka ger ett större tryckfall. I fall hydrofila ytor också fungerar under frostande förhållanden är mindre känt.

Ovanstående bakgrund visar att det finns två olika angreppssätt att minska frostens skadliga inverkan på luftvärmepumpen. Dels att minimera mängden frost på förångarens ytor med förebyggande metoder, tex genom ytbeläggningar eller genom förtorkning av luften. Dels att göra själva avfrostningsmetoden effektivare.

1.1 Avfrostningsbehov i Sverige (studier utförda inom projektet)

I en inom projektet tidigt utförd studie [55] kvantifierades antalet timmar som en luftvärmepump arbetar under frostande förhållanden. Uppmätta klimatdata, med avseende på luftens fuktighet och temperatur, från en lång tidsperiod överlagrades på en frostkarta, vilken anger under vilka förhållanden frost bildas på en luftvärmepump. Även om studien bara visar data för en ort, Helsingborg, är det intressant att se hur det vanligaste väderförhållandet (ca 5 °C och 95 % relativ fuktighet) sammanfaller med det område i frostkartan som ger mest intensiv påfrostning.

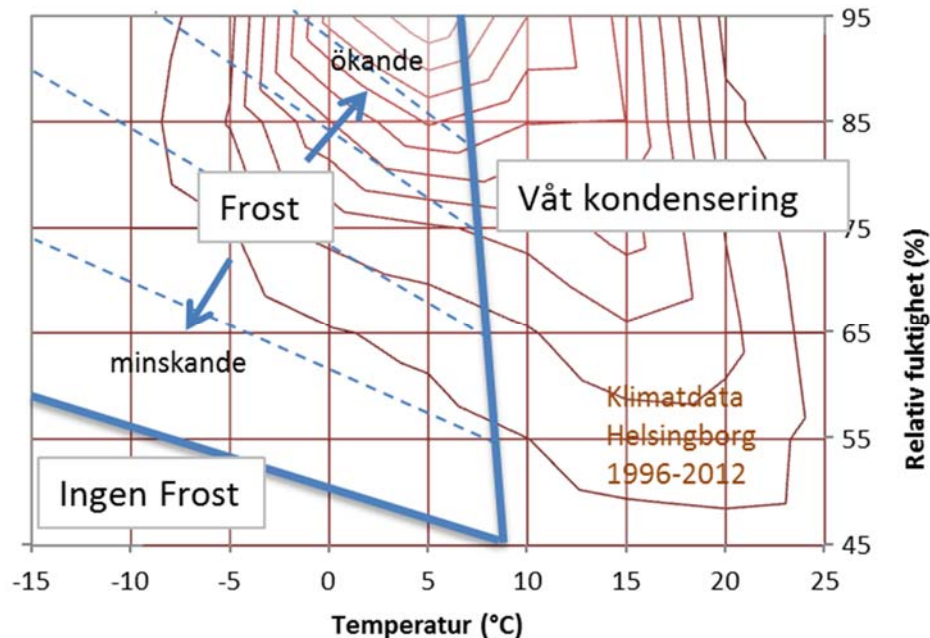


Fig. 2 Klimatdata från Helsingborg, uppmätt timvis, under perioden 1996-2012 överlagrat på en frostkarta [55].

En begränsning med denna och Fahléns [53] tidigare studie är att de bara beaktar frostbildning till följd av fuktig luft. Utöver detta tillkommer frost till följd av nederbörd och underkylt regn vilket är förhållanden som också förbises i standardiserade tester för energiförbrukning. Det kan nämnas att anledningen till att denna fråga lyfts är en diskussion som uppstod på Kyl- och värmepumpdagen i Göteborg 2017 mellan Erik Björk och två erfarna kylinstallatörer. Därför utfördes inom projektets ramar ett kandidatexamensarbete [56] där samtliga källor till frostbildning beaktades.

- Frostbildning pga. luftfuktighet och temperatur
- Frostbildning pga. snö och regn
- Frostbildning pga. underkylt regn

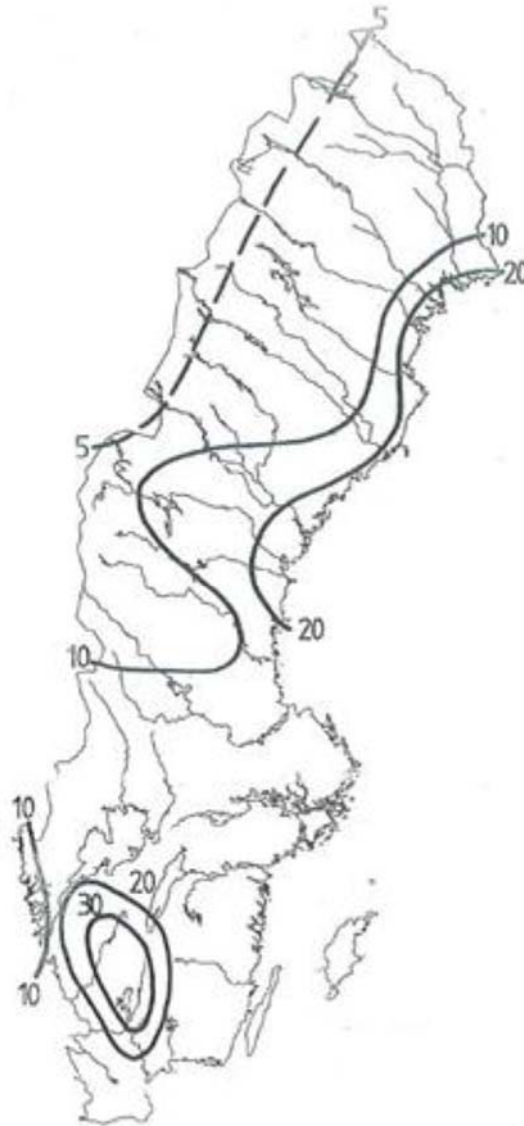
Av intervjusvar från värmepumpsinstallatörer och servicetekniker framgick att problemet med snö och underkylt regn finns men inte bedömdes som stort. En möjlig förklaring är att snöfallstak har blivit ett populärt motmedel mot denna typ av "nederbördsfrost". Enligt beräkningar utförda inom examensarbetet bör detta tak sticka ut åtminstone 18 cm utanför värmeväxlaren för att förhindra att snö och regn sugas in i värmeväxlaren. I figur 3 ses ett exempel på ett snöfallstak placerat över en luftvärmepumps utomhusdel.



Fig. 3 Snöfallstak över luftvärmepumpens utomhusvärmeväxlare.

Problematiken med frostbildning pga. underkyllt regn, så kallad påisning, är förutom att det finns mycket lite forskning på området mycket beroende på vart i landet man befinner sig. Risk för påisning finns i hela landet men risken är generellt störst i norra och minst i södra Sverige[57]. Risken för påisning är vidare mer signifikant på högre höjd dvs närmare eller i moln.

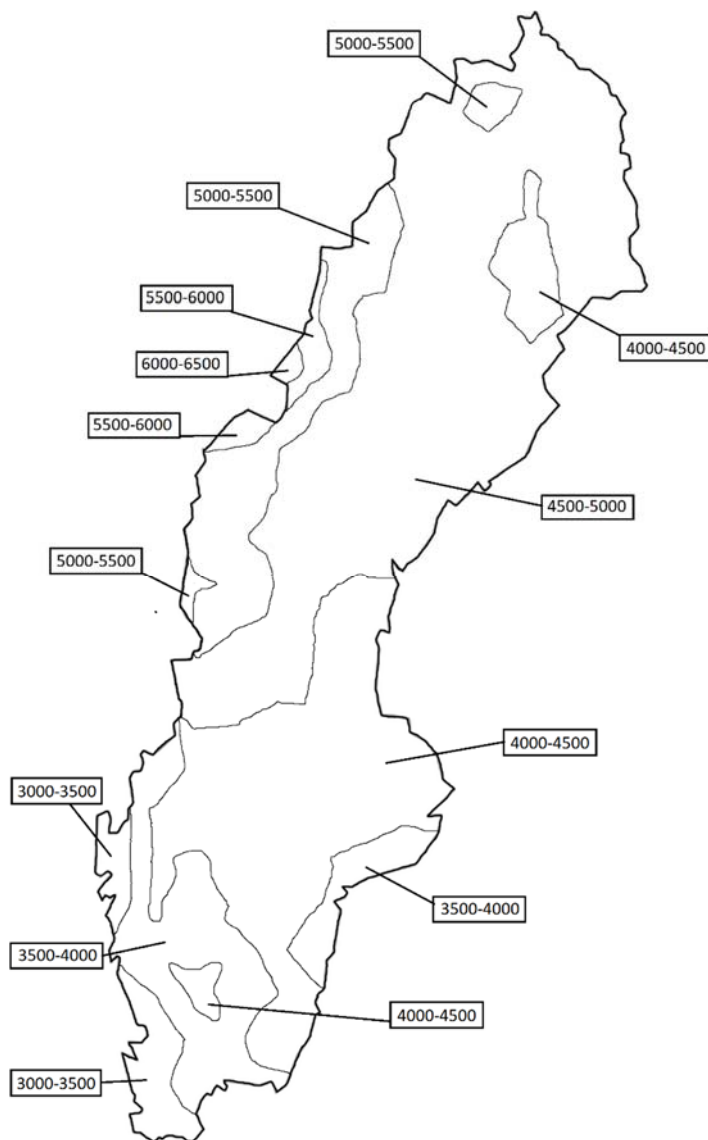
I figur 4 illustreras antal timmar per år med underkyllt regn.



Figur 4 - Underkyllt regn givet i antal timmar per år under perioden 1961–1990 [57]

Det kan konstateras att antalet timmar med underkyllt regn per år är lågt. Ca 10 – 30 timmar, vilket endast motsvarar 0.1-0.3 % av årets alla timmar.

Examensarbetet skapade även en unik frostkarta över Sverige med avseende på frost från fuktig luft. Ur 20 års mätdata från 113 av SMHI:s mätstationer urskiljdes antalet timmar en luftvärmepump årligen drabbas av frostpåslag. De begränsande faktorerna dvs. då frostbildning antas ske är vid en temperatur mellan -15 °C till 6 °C , samtidigt som den relativa luftfuktigheten är minst 50 %. I figur 5 visas resultatet. Antal timmar frostbildning sker på förångare i Sverige varierar mellan ca 3000 till 6400 timmar per år beroende på plats i landet, vilket motsvarar 34-73 % av årets timmar.



Figur 5 - Karta över Sverige, med antal timmar per år med frostbildning [56].

Det kan noteras att det nödvändigtvis inte är de kustnära områdena som är värst drabbade vilket kanske kunde förväntas. Förklaringen är troligen att lufttemperaturen här är högre än längre inåt landet, vilket ger färre frosttimmar. Dock visar inte kartan intensiteten i frostbildningen utan bara antalet timmar då frost bildas. Som tidigare framgick av figur 2 ökar frostproblemen med ökande fuktighet.

Sammanfattningsvis visade den genomförda studien att problemet med frost till följd av nederbörd inte är särskilt stort och att detta dessutom kan minskas genom ett snöfallstak som enligt beräkningar bör ha ett taksprång på minst 18 cm. Studien visade också att frostbildningen till följd av fuktig luft förekommer 34 till 73 % av årets timmar beroende på plats i Sverige.

Med en antagen effektivitetsminskning på 10 % under frostande förhållanden [53] ger en överslagsberäkning att en verklig effektivitetsminskning bör vara ca 34 till 73 % av dessa 10 %, dvs. 3.4 till 7.3 %.

2 Projektdeltagare

Projektet har letts av KTH, där också vindtunnelförsöken har utförts. Försöken med PCM för lagring av kondensorvärme utfördes på Electrolux. Under projektet har ett flertal projektmöten hållits. Några av dessa har arrangerats i samband med redovisningar av examensarbeten.

Följande personer har varit involverade i projektet:

Energiteknik, Tillämpad termodynamik och kylteknik, KTH

Björn Palm (professor, prefekt)

Erik Björk (forskare)

Felix Thomas (praktikant)

Luis Castello och Shoaib Aziz (examensarbete)

Carl Andersson (examensarbete)

Nils Ljung och Daniel Johansson (kandidatexamensarbete)

Electrolux AB

Dr Israel Martinez

Dr Metin Tuzlaz

Dr Mayzar Karampour

3 Mål

Projektets mål, så som det definierats i ansökan, är att visa på en metod som kan minska energianvändningen för avfrostning med minst 10 % för en luft-luft värmepump i mellansvenskt vinterklimat jämfört med dagens bästa kommersiella teknik. För att uppnå detta mål kommer flera metoder att provas. En målsättning är därvid att inom projektet utvärdera minst 10 metoder för att minska energianvändningen för avfrostning, genom minskad påfrostning eller effektivare avfrostning.

4 Genomförande

Projektet inleddes (2016) med en litteraturstudie och ett examensarbete inriktat mot effektivare avfrostning. I detta testades en metod för att effektivisera avfrostningen genom att lagra kondensorvärme i ett termiskt lager. Efter detta (2017) koncentrerades arbetet på olika ytbeläggningar vilka bedömdes ha bäst förutsättningar att uppfylla projektets mål. En välinstrumenterad vindtunnel byggdes på labbet Energiteknik, KTH, för att studera frostillväxt och avfrostning under typiska luftvärmepumpsförhållanden. Samtidigt inleddes ett samarbete med RISE Surface, Process and Formulation som har kunskapen att tillverka superhydrofoba och superhydrofila ytbeläggningar. Dessa ytor samt några kommersiella ytor som erhöles från Electrolux undersöktes experimentellt i ett examensarbete (2017). I ett kandidatexamensarbete (2018) kartlades geografiska förutsättningar för frostbildning.

5 Resultatsammanfattning

Inledningsvis sammanfattas de olika alternativa avfrostnings- och påfrostningsmetoder (frostminimerande metoder) som studerats inom projektet. Efter detta följer de experimentella resultaten. I bilagorna finns de examensarbeten som genomförts som del av projektet. I dessa finns väsentligt mer detaljer om försöksupställning, och resultat.

5.1 PCM/TES assisterad reverserad cykelavfrostning

Den vanligaste avfrostningsmetoden för luftvärmepumpar är reverserad cykelavfrostning. En fyrvägsventil dirigerar om köldmediet så att förångaren och kondensorn byter funktion med varandra. Det betyder att en del av avfrostningsvärmets tas från inomhusdelen vilket temporärt ger en kallare inomhusluft. En metod som har studerats är att lagra en del av kondensorvärmets i ett fasomvandlande (PCM) termiskt lager (TES). Upp till 80.5 % kortare avfrostningstider har rapporterats med denna metod [3,17,42-49].

I ett examensarbete utfört inom projektet av Azizi och Castelló [54] visades att avfrostningstiden kunde minskas med 67 %. En nackdel med metoden är den ökade komplexiteten och priset. Azizi och Castelló [54] beräknade att den erforderliga storleken på det termiska lagret är mellan 9 - 18 kg för en 3 kW luftvärmepump. En ytterligare möjlighet att förbättra denna metod är att använda underkylningsvärmets för uppladdning av det termiska lagret vilket samtidigt ökar systemets värmefaktor.

5.2 Förtorkning av luft

Flytande och fast torkmedel har provats som en metod att förtorka luften till värmeväxlaren och att på så sätt minska frostmängden. Ökande initial kostnad, komplexitet och driftskostnad (!) gör dock denna metod opraktisk. [1-11]

5.3 Förvärmning av luft.

Idén är att värma utomhusluften innan den går in i värmeväxlaren så att frostpåslag undviks. Studier har visat att systemets verkningsgrad kan öka med denna teknik. Men bara under förutsättningen att uppvärmningskällan är gratis, dvs. att spillvärme i någon form är tillgänglig. [12-17]

5.4 Ultraljud

Ultraljud har provats både som avfrostande och påfrostningsminimerande metod. Vissa studier har påvisat en långsammare frosttillväxt. I figur 6 visas resultat där en 60 W ultraljudshögtalare placerats parallellt med en kyld platta. En tydlig minskning av frostens tjocklekstillväxt visas.

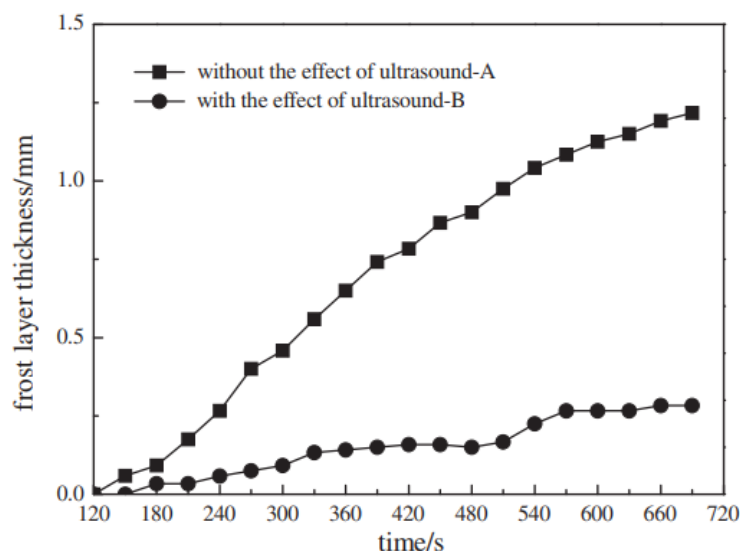


Fig. 6 Inverkan av ultraljud på frosttillväxt. [18]

Ultraljud har också provats som avfrostningsmetod. Olika studier [19-21] har visat att frost åtminstone delvis kan avlägsnas genom sprickbildning och delaminering med ett ultraljud vid rätt frekvens. Tan et al. [21] visade att både systemets kapacitet och verkningsgrad kunde ökas med denna lösning. Nackdelarna är kostnaden och komplexiteten för en sådan lösning.

5.5 Flänsarnas konfigurering

Frosttoleranta värmepumpar där flänsdelningen är lägre vid luftinloppet används ofta i olika frystillämpningar för att fördröja blockering och därmed förlänga driftscykeln. En nackdel är att den värmeöverförande arean minskar för en given volym vilket betyder lägre COP. Tätare flänsdelning blir lättare blockerad av frost men för en given förångarvolym ger en tätare flänsdelning en högre förångningstemperatur vilket i sig minskar påfrostningen. Kurvan "A" i figur 1 är resultat från en värmepump med tätare flänsdelning än värmepump "B". Det framgår att försämringen av COP för A är större än för B då gränsen mellan våt kondensering och frostpåslag (ca 7 °C) passeras, men att denna värmepump (A) har ett högre COP än värmepump (B) vid ännu lägre temperaturer. Studien [53] förklarar detta med skillnader i

avfrostningskriterier men en annan möjlig förklaring är en mindre intensiv påfrostning till följd av den högre förångningstemperaturen i den tätflänsade värmeväxlaren.

5.6 Flänsarnas ytstrukturer

Olika typer av louvered fins, dvs. flänsar med osthyvelmönster, har undersökts under frostande förhållanden. Visserligen erhöles en ökning av värmeövergångstalet initialt men ganska snart blockerade frosten de små osthyvelspassagerna och nackdelarna med ökat tryckfall övervägde jämfört med släta flänsar. Samma resultat erhöles med wavy finns [22-24].

5.7 Ytbeläggningar

Ett stort intresse har under senare år riktats mot hydrofoba (dvs. vattenavvisande) och hydrofila (dvs. vattenattraherande) ytbeläggningar. Den samlade bilden av forskningen spretar något men de flesta studier visar en viss fördröjning av frostbildningen för hydrofoba ytor. Större samstämmighet råder om den bildade frostens karaktär. En hydrofil yta ger kompaktare frost med högre densitet. Den hydrofoba ytan ger omvänt en porösare lågdensitetsfrost. Ingen studie kan visa en frostfri yta. [25-41] Det här betyder att båda metoderna kan ge fördelar i en värmeväxlare. Den hydrofoba genom dess fördröjda frostbildning. Den hydrofila genom dess kompakta frost, vilket ger lägre värmemotstånd och långsammare igentäppning av luftkanalerna. Båda teknikerna kan underlätta vattenavrinning vid avfrostning. Tekniken är intressant då den är den enda metod som både är ekonomisk och okomplicerad och har en möjlighet att effektivisera både driftscykeln och avfrostningscykeln. Utmaningarna är att hitta en ytbeläggning med "bra" påfrostnings- och avfrostningsegenskaper samtidigt som den är robust.

Sammanfattningsvis bedömdes metoderna med fasomvandlande material och ytbehandling av förångaren ha bäst förutsättningar att uppfylla projektets mål och att i slutändan resultera i en kommersiell lösning. Av dessa två sågs ytbehandlingar (hydrofila och hydrofoba) som det mest intressanta alternativet. I det följande beskrivs resultaten av de experiment med olika ytbehandlingar som utfördes inom projektet [58].

5.8 Experimentella resultat

Experiment utfördes med en för ändamålet uppbyggd vindtunnel (figur 7 och 8) under testförhållanden baserade på SS-EN 14511-2:2018, dvs torr temperatur 2 °C och våt temperatur 1 °C (motsvarande en relativ fuktighet på 84 %). Det kan ses i figur 2 att detta förhållande är frostintensivt. De studerade ytorna var vertikalt monterade vilket möjliggjorde en naturlig dränering under avfrostningsperioden. Lufthastigheten över torr yta var 2 m/s. När peltierkylaren aktiverades sjönk ytans

temperatur till $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ vilket motsvarar en temperaturskillnad mot anströmmande luft på 8 K , vilket är en normal temperaturdifferens på en luftvärmepump. Avfrostning initierades då lufthastigheten halverats, dvs. sjunkit under 1 m/s (pga av ökat tryckfall av frost) och avbröts då ytans temperatur stigit över $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avfrostningen skedde passivt, dvs. utan yttre tillförd värme, men med vindtunnelns fläkt påslagen. På detta sätt kunde ytorna undersökas under både frostande och avfrostande förhållanden under många på varandra följande cykler.

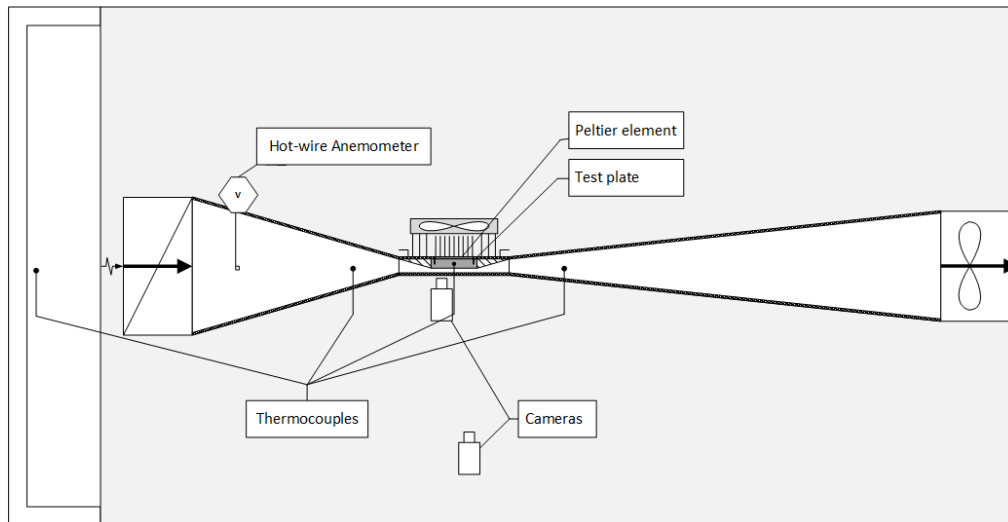


Fig. 7 Skiss av vindtunnel [58]



Fig. 8 Bild av vindtunnel [58]

I figur 9 är resultaten sammanfattade. De från Electrolux erhållna ytorna som benämns "black", "green", "blue", "gold" var samtliga hydrofila. Det framgår att cykellängden planar ut efter ett antal cykler för alla ytor utom för den superhydrofoba. Det kan också ses att de hydrofila ytbeläggningarna har fördelaktiga egenskaper för en luftvärmepump under frostande förhållanden med cykellängder 30 till 70 % längre än för obehandlad aluminium. Förklaringen är de hydrofila ytornas effektivare avfrostningar. I figur 10 som visar ytbilder tagna direkt efter en avfrostning framgår att de hydrofila ytbeläggningarna är i stort sett torra vilket gör den efterföljande driftperioden längre för dessa ytor. Den superhydrofoba ytbeläggningen fick efter ett fåtal cykler problem med vattendroppar som hängde kvar efter avfrostningen vilket gav cykellängder kortare än den obehandlade aluminiumytan.

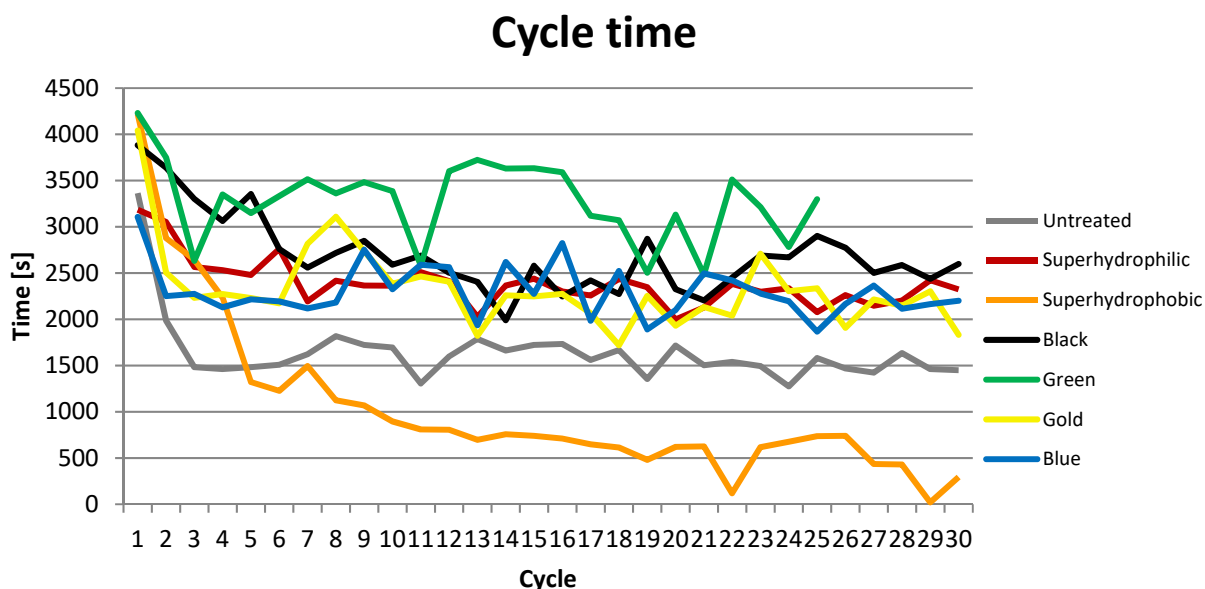


Fig. 9 Jämförelse mellan olika ytor under cyklisk drift [58].

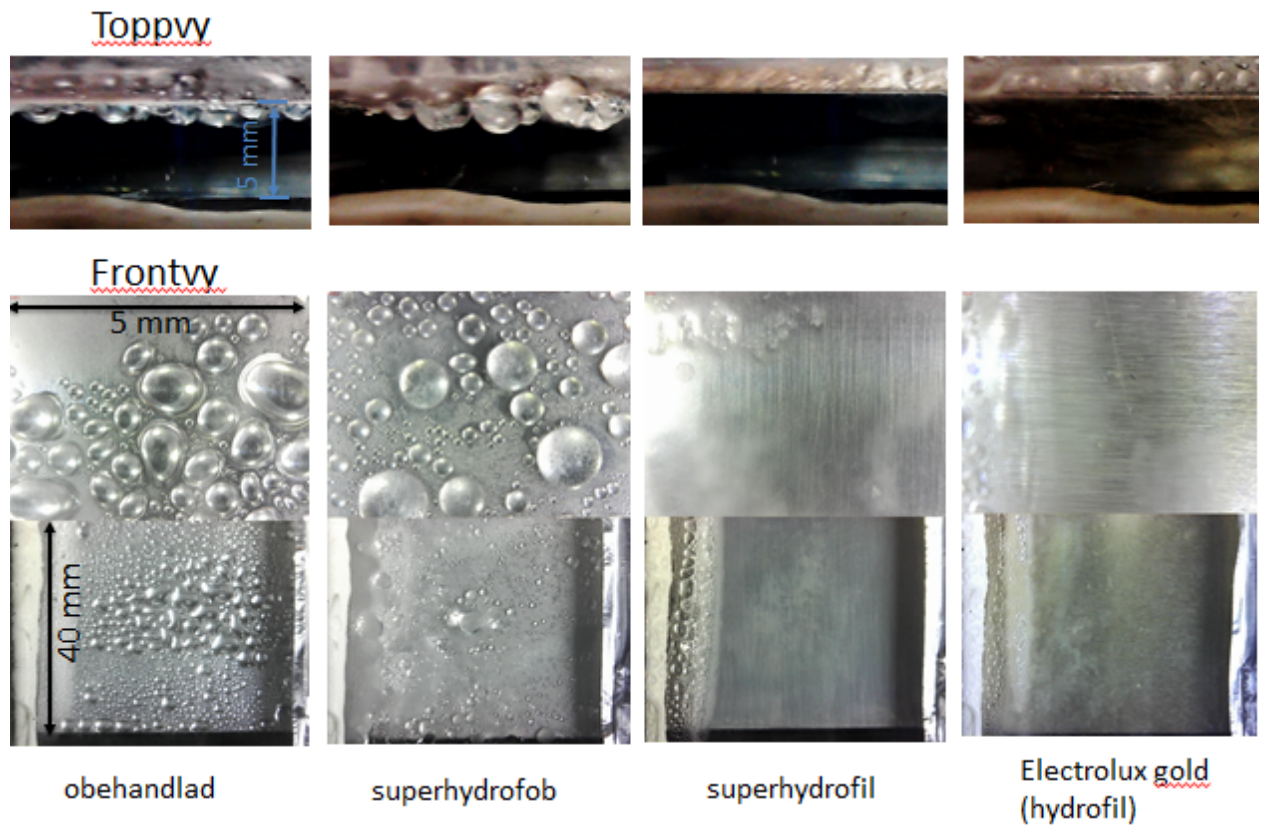


Fig. 10. Toppvy och frontvy av några av de undersökta ytorna direkt efter en avfrostning [58].

6 Måluppfyllelse

Projektets mål var att visa på en metod som kan minska energianvändningen för avfrostning med minst 10 % för en luft-luft värmepump i mellansvenskt vinterklimat jämfört med dagens bästa kommersiella teknik. Den bästa kommersiella tekniken för avfrostning idag är reversed cycle defrost. Denna teknik kan kombineras med ytbeläggningar som förlänger cykeltiden. Med en cykeltidsförlängning på 50 %, vilket inte verkar orimligt baserat på denna studies experimentella resultat, kan antalet avfrostningar minskas med 33 %. Med andra ord bör projektmålet kunna uppfyllas. Projektet har studerat 7 olika ytbeläggningar och utvärderat 6 andra tekniker, varav en experimentellt i ett examensarbete. Därmed uppfylls det andra projektmålet att utvärdera minst 10 metoder.

7 Fortsatt arbete

Projektets resultat har bedömts så intressanta att vindtunneln nu byggs om för fortsatta mätningar utanför projektet. Diskussioner förs tillsammans med RISE (SPF) om gemensamma ansökningar om medel för fortsatt arbete.

Det bedöms finnas goda möjligheter att utveckla nya ytor med bättre egenskaper, dvs som förlänger tiden ytterligare mellan avfrostningarna och förlänger drifttiden i varje cykel. Potentialen för detta kan utläsas ur Fig 9. Av denna framgår att vid start med torra ytor, cykel 0, så är drifttiden ca 25% längre än för den bästa testade ytan.

Superhydrofila ytor utvecklas i första hand för att underlätta dräneringen av vatten vid luftkonditioneringsdrift. Det finns många leverantörer av ytbeläggningar för detta ändamål. Vidare studier kan inriktas inte bara på att utveckla nya ytor utan också på att undersöka avfrostningsegenskaper för ytor som utvecklats med målsättningen att underlätta dräneringen av kondensvatten.

Keywords

Defrost, frost, heat pump, hydrophobic, hydrophilic, frost, evaporator

Publikationer

Vetenskapliga pumblikationer

[59] Järn M., Johansson K., Tuominen M., Björk E., Palm B., Evaluation of surface coatings on plate heat exchangers for air-to-air heat pumps (pågående sampublicering med RISE Surface, Process and Formulation) 2018

[60] Björk E., Palm B., Andersson C., Järn M., Johansson K., Tuominen M., Multi-cycle comparison of hydrophilic and hydrophobic surface coatings for air source heat pumps, abstract inskickad till IIR conference Montreal, 2019(sampublicering med RISE Surface, Process and Formulation)

Examensarbeten, populärvetenskapliga publikationer och presentationer

[54] Azizi S., Castelló Pérez L., Novel defrost techniques on air source heat pumps, Examensarbete, KTH energiteknik, 2016

[55] Björk E., Effektivare avfrostning i luftberörda förångare, KYLA+ nr 7 2016

[56] Ljung N., Johansson D., Frostbildning på luftberörda värmepumpar, kandidatexamen, KTH energiteknik, 2018

[58] Carl Andersson, An experimental study of frost free surface coatings, Examensarbete KTH Energiteknik, 2018

[61] Björk E., Presentationer vid EFFSYS expand forskarkonferenser 2016 och 2018, och Kyl- och Vöämepumpsdagar 2016 och 2017.

Referenser

- [1] Song M. et al., 2018, Air source heat pump Frost retarding measure Defrosting method Reverse cycle defrosting Control strategy Energy saving, Applied Energy. Volume 211, p 1150-1170
- [2] Wang S.W. Liu Z.Y., A new method for preventing heat pump from frosting, Renew Energy, 30 (2005), pp. 753-761
- [3] Wang F.H., Wang Z.H. Zheng Y.X., Lin Z., Hao P.F., Huan C., Wang T., Performance investigation of a novel frost-free air-source heat pump water heater combined with energy storage and dehumidification, Appl Energy, 139 (2015), pp. 212-219
- [4] Wang Z.H., Wang F.H., Ma Z.J., Song M.J., Numerical study on the operating performances of a novel frost-free air-source heat pump unit using three different types of refrigerant, Appl Therm Eng, 112 (2017), pp. 248-258
- [5] Wang Z.H., Wang F.H., Wang X.K., Ma Z.J., Dynamic character investigation and optimization of a novel air-source heat pump system, Appl Therm Eng, 111 (2017), pp. 122-133
- [6] Su W., Zhang X.S., Performance analysis of a novel frost-free air-source heat pump with integrated membrane-based liquid desiccant dehumidification and humidification, Energy Buildings, 145 (2017), pp. 293-303
- [7] Zhang L., Saikawa M., Fujina T., Experimental study on heat and mass transfer characteristics for a desiccant-coated fin-tube heat exchanger, Int J Heat Mass Tran, 89 (2015), pp. 641-651
- [8] Wang Z.H., Zheng Y.X., Wang F.H., Wang X.K., Lin Z., Li J.C., Huan C., Experimental analysis on a novel frost-free air-source heat pump water heater system, Appl Therm Eng, 70 (1) (2014), pp. 808-816
- [9] Jiang Y.Q., Fu H.Y., Yao Y., Yan L., Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non-frosting air source heat pump system, Energy Buildings, 68 (2014), pp. 707-712
- [10] Zhang L., Fujinawa T., Saikawa M., A new method for preventing air-source heat pump water heaters from frosting, J Refrig, 35 (5) (2012), pp. 1327-1334
- [11] Zhang L., Dang C.B., Hihara E., Performance analysis of a no-frost hybrid air conditioning system with integrated liquid desiccant dehumidification, J Refrig, 33 (1) (2010), pp. 116-124

- [12] M. Rafati Nasr, M. Fauchoux, R.W. Besant, C.J. Simonson, A review of frosting in air-to-air energy exchangers, *Renew Sust Energy Rev*, 30 (2014), pp. 538-554
- [13] D. Liu, F.Y. Zhao, G.F. Tang, Frosting of heat pump with heat recovery facility, *Renew Energy* (in Chinese), 32 (6) (2007), pp. 1228-1242
- [14] K. Kwak, C. Bai, A study on the performance enhancement of heat pump using electric heater under the frosting condition pump under frosting condition, *Appl Therm Eng*, 30 (2010), pp. 539-543
- [15] J.C. Tang, G.C. Gong, H. Su, F.H. Wu, C., Herman Performance evaluation of a novel method of frost prevention and retardation for air source heat pumps using the orthogonal experiment design method, *Appl Energy*, 169 (2016), pp. 696-708
- [16] J. Kragh, R. Jørgen, S. Svend, Mechanical ventilation with heat recovery in cold climate, *Proceedings of the seventh Nordic symposium on building physics in Nordic countries*, Technical University of Denmark (2005), pp. 1-8
- [17] M.J. Song, An experimental and numerical study on improving defrosting performances for an air source heat pump unit having a multi-circuit outdoor coil, PhD thesis, The Hong Kong Polytechnic University (2014)
- [18] D. Li, Z. Chen, M. Shi, Effect of ultrasound on frost formation on a cold flat surface in atmospheric air flow, *Exp Therm Fluid Sci*, 34 (2010), pp. 1247-1252
- [19] D. Wang, T. Tao, G. Xu, A. Luo, S. Kang, Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration, *Exp Therm Fluid Sci*, 36 (2012), pp. 1-11
- [20] S.C. Liu, H.L. Li, M.J. Song, B.M. Dai, Z.L. Sun, Impacts on the solidification of water on plate surface for cold energy storage using ice slurry
- [21] H.H. Tan, G.H. Xu, T.F. Tao, X.Q. Sun, W.D. Yao, Experimental investigation on the defrosting performance of a finned-tube evaporator using intermittent ultrasonic vibration, *Appl Energy*, 158 (2015), pp. 220-232
- [22] W.M. Yan, H.Y. Li, Y.L. Tsay, Thermofluid characteristics of frosted finned-tube heat exchangers, *Int J Heat Mass Tran*, 48 (2005), pp. 3073-3080
- [23] Ping Zhang, P.S. Hrnjak, Air-side performance evaluation of three types of heat exchangers in dry, wet and periodic frosting conditions, *Int. J. Refrigeration*, 32 (2009), pp. 911-921
- [24] H. Dong, R.J. Zhao, L. Yun, D.B. Yi, Effect of fin types of outdoor fan-supplied finned-tube heat exchanger on periodic frosting and defrosting performance of a residential air-source heat pump, *Appl Therm Eng*, 69 (2014), pp. 251-260

- [25] Z.P. Zuo, R.J. Liao, X.T. Zhao, X.Y. Song, Z.W. Qiao, C. Guo, A.Y. Zhuang, Y. Yuan, Anti-frosting performance of superhydrophobic surface with ZnO nanorods, *Appl Therm Eng*, 110 (2017), pp. 39-48
- [26] D.L. da Silva, C. Melo, C.J.L. Hermes, Effect of frost morphology on the thermal-hydraulic performance of fan-supplied tube-fin evaporators, *Appl Therm Eng*, 111 (2017), pp. 1060-1068
- [27] X.M. Wu, F.Q. Chu, Q. Ma, B. Zhu, Frost formation and frost meltwater drainage characteristics on aluminum surfaces with grooved structures, *Appl Therm Eng*, 118 (2017), pp. 448-454
- [28] T. Moriya, K. Manabe, M. Tenjimbayashi, K. Suwabe, H. Tsuchiya, T. Matsubayashi, W. Navarrini, S. Shiratori, A superrepellent coating with dynamic fluorine chains for frosting suppression: effects of polarity, coalescence and ice nucleation free energy barrier, *Rsc Adv*, 6 (2016), p. 95
- [29] A.D. Sommers, N.L. Truster, A.C. Napora, A.C. Riechman, E.J. Caraballo, Densification of frost on hydrophilic and hydrophobic substrates - examining the effect of surface wettability, *Exp Therm Fluid Sci*, 75 (2016), pp. 25-34
- [30] Y. Zhao, Y.T. Luo, J. Li, F. Yin, J. Zhu, X.F. Gao, Condensate microdrop self-propelling aluminum surfaces based on controllable fabrication of alumina rod-capped nanopores, *ACS Appl Mater*, 7 (2015), pp. 11079-11082
- [31] D. Kim, H. Kim, S.W. Kim, D.R. Kim, K.S. Lee, Experimental investigation of frost retardation for superhydrophobic surface using a luminance meter, *Int J Heat Mass Tran*, 87 (2015), pp. 491-496
- [32] C.H. Liang, F. Wang, Y. Lü, C.X. Wu, X.S. Zhang, Y.F. Zhang, Experimental study of the effects of fin surface characteristics on defrosting behavior, *Appl Therm Eng*, 75 (2015), pp. 86-92
- [33] F. Wang, C.H. Liang, M.T. Yang, C. Fan, X.S. Zhang Effects of surface characteristic on frosting and defrosting behaviors of fin-tube heat exchangers, *Appl Therm Eng*, 75 (2015), pp. 1126-1132
- [34] T. Bharathidasan, S. Vijay Kumar, M.S. Bobji, R.P.S. Chakradhar, B.J. Basu, Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces, *Appl Surf Sci*, 314 (2014), pp. 241-250
- [35] L.T. Li, W. Wang, Y.Y. Sun, Y.C. Feng, W.P. Lu, J.H. Zhu, Y.J. Ge, Investigation of defrosting water retention on the surface of evaporator impacting the performance of air source heat pump during periodic frosting-defrosting cycles, *Appl Energy*, 135 (2014), pp. 98-107

- [36] N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E.N. Wang, Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces, *Nano Lett*, 13 (2013), pp. 179-187
- [37] K. Kim, K.S. Lee, Frosting and defrosting characteristics of surface-treated louvered-fin heat exchangers: effects of fin pitch and conditions, *Int J Heat Mass Tran*, 60 (2013), pp. 505-511
- [24] E. Moallem, L. Cremaschi, D.E. Fisher, S. Padhmanabhan, Experimental measurements of the surface coating and water retention effects on frosting performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems, *Exp Therm Fluid Sci*, 39 (2012), pp. 176-188
- [24] S.A. Kulinich, M. Farzaneh, Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces, *Appl Surf Sci*, 255 (18) (2009), pp. 8153-8157
- [38] L.Y. Huang, Z.L. Liu, Y.M. Liu, Y.J. Gou, J.T. Wang, Experimental study on frost release on fin-and-tube HEs by use of a novel anti-frosting paint, *Exp Therm Fluid Sci*, 33 (7) (2009), pp. 1049-1054
- [39] B. Boreyko, C.H. Chen, Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces, *Phys Rev Lett*, 103 (2009), p. 184501
- [40] S. Jhee, K.S. Lee, W.S. Kim, Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger, *Int J Refrig*, 25 (8) (2002), pp. 1047-1053
- [41] E.U. Okoroafor, M. Newborough, Minimising frost growth on cold surfaces exposed to humid air by means of crosslinked hydrophilic polymeric coatings, *Appl Therm Eng*, 20 (8) (2000), pp. 737-758
- [42] M.L. Qu, L. Xia, S.M. Deng, Y.Q. Jiang, A study of the reverse cycle defrosting performance on a multi-circuit outdoor coil unit in an ASHP-Part I: Experiments, *Appl Energy*, 91 (2012), pp. 122-129
- [43] C. Chen, J. Ouyang, X.L. Wang, M. Liu, New method of heat compensation for defrosting of air source heat pump system in winter, *J Refrig (in Chinese)*, 27 (2006), pp. 37-40
- [44] W.J. Hu, Y.Q. Jiang, M.L. Qu, Y. Yao, S.M. Deng, An experimental study on the operating performance of a novel reverse-cycle hot gas defrosting method for air source heat pumps, *Appl Therm Eng*, 31 (2011), pp. 363-369
- [45] J.K. Dong, S. Li, Y. Yao, Y.Q. Jiang, Y. Tian, H. Tian, Defrosting performances of a multi-split air source heat pump with phase change thermal storage, *Int J Refrig*, 55 (2015), pp. 49-59

- [46] M.L. Qu, T.R. Li, S.M. Deng, Y.N. Fan, Z. L., Improving defrosting performance of cascade air source heat pump using thermal energy storage based reverse cycle defrosting method, *Appl Therm Eng*, 121 (2017), pp. 728-736
- [47] L. Zhang, J.K. Dong, Y.Q. Jiang, Y. Yao, A novel defrosting method using heat energy dissipated by the compressor of an air source heat pump, *Appl Energy*, 133 (2014), pp. 101-111
- [47] J.H. Wu, Z.G. Yang, Q.H. Wu, Y.J. Zhu, Transient behavior and dynamic performance of cascade heat pump water heater with thermal storage system, *Appl Energy*, 91 (1) (2012), pp. 187-196
- [49] J.K. Dong, Y.Q. Jiang, Y. Yao, X.D. Zhang, Operating performance of novel reverse-cycle defrosting method based on thermal energy storage for air source heat pump, *J Cent South Univ Technol*, 18 (2011), pp. 2163-2169
- [50] kommittén för Värmepumpar, SIS / TK 467, SS-EN 14511-2:2018 Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors - Part 2: Test conditions, SIS, Swedish Standards Institute, Stockholm, Sverige, 2018. <https://enav-sis-se.focus.lib.kth.se/sv/Standard/?std=STD-80002948> (accessed June 6, 2018).
- [51] Mälhammar Å., Frostpåslag vid flänsade ytor, PhD thesis, KTH energiteknik, 1986:
- [52] Östin R., An experimental study of Frosting in a model heat exchanger, PhD-thesis, 1990
- [53] Fahlén P., Frosting and defrosting of air-coils, PhD-thesis, 1996.
- [54] Azizi S., Castelló Pérez L., Novel defrost techniques on air source heat pumps, Examensarbete, KTH energiteknik, 2016
- [55] Björk E., Effektivare avfrostning i luftberörda förångare, KYLA+ nr 7 2016
- [56] Ljung N., Johansson D., Frostbildning på luftberörda värmepumpar, kandidatexamen, KTH energiteknik, 2018
- [57] Karlsson, H., Vindkraft i kallt klimat, Umeå: Umeåuniversitets tekniska högskola, 2010
- [58] Andersson C., An experimental study of frost free surface coatings, Examensarbete KTH Energiteknik, 2018