

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Funktionella ytbehandlingar för mer energieffektiva värmepumpar</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Functional coatings for more energy efficient heat pumps</b>	
Universitet/högskola/företag <b>RISE Research Institutes of Sweden</b>	Avdelning/institution <b>Material och Ytdesign</b>
Adress <b>Malvinas väg 3, 114 28 Stockholm</b>	
Namn på projektledare <b>Mikael Järn</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Kenth Johansson, Erik Björk, Björn Palm</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Luftvärmepump, värmeväxlare, superhydrofil, frostuppbyggnad, avfrostning, COP</b>	

## Förord

Projektet har finansierats med stöd från Energimyndigheten samt genom in-kind bidrag från flera företag; Nibe AB, Danfoss AB, och Gränges AB. RISE och KTH har agerat som forskningsutförare.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	1
Summary .....	2
Inledning/Bakgrund .....	3
Genomförande .....	4
Resultat .....	5
Diskussion.....	22
Publikationslista.....	22
Referenser, källor.....	23
Bilagor .....	24

## Sammanfattning

Målsättningen med projektet var att öka energieffektiviteten hos luftvärmepumpar i kallt klimat genom utveckling av funktionella ytbeläggningar på värmeväxlarytorna, som minskar problematiken med frostuppbyggnad och avfrostning. Problemställningen har antagits genom ett tvärvetenskapligt angreppssätt, genom att samla både forsknings- och industripartners med kompetens inom ytkemi, ytbeläggningar, värmeväxlare, luftvärmepumpar och marknaden. Vi har visat att en superhydrofil ytbeläggning på värmeväxlarytorna, dvs. en yta som väts väldigt bra av vatten, har resulterat i bäst resultat i luftvärmepumpstest under kalla förhållanden. Vid milda vinterförhållanden ledde

den hydrofila beläggningen till en ökning i verkningsgrad (COP) hos värmepumpen med 3,6%. Vid kalla vinterförhållanden förstärktes ytterligare skillnaderna mellan obelagd och ytbelagd förångare, till en förbättring i COP med 5,3%. Detta är en betydande förbättring med enbart denna modifiering av värmepumpen. Ytterligare förbättringar i COP skulle kunna uppnås genom en utveckling av själva värmeväxlaren, med en tätare packning av flänsar då frosten växer långsammare på den superhydrofila ytan och därmed inte blockerar passagen lika snabbt. Våra laborationsförsök och teoretiska beräkningar tyder på att en förbättring i COP med upp till 9% är möjlig med en hydrofil beläggning och en tätare packning av flänsar.

Arbetet i projektet bestod inledningsvis av utveckling och testning av ytbeläggningar på laboratorieskala. En central del i utvecklingsarbetet var en specialbyggd vindtunnel, som möjliggjorde utvärdering av olika ytbeläggningar i förhållanden typiska för en luftvärmepump. Eftersom hydrofila ytbeläggningar visade sig vara mest fördelaktiga fokuserade det fortsatta utvecklingsarbetet på att ta fram superhydrofila ytbeläggningar med hög beständighet och långvarig hydrophilicitet. De mest lovande ytbeläggningarna med avseende på prestanda och beständighet ytbelades i följande steg på riktiga värmeväxlare för att sedan utvärderas i relevanta värmepumpsförsök hos deltagande industripartners. I nästa steg behöver de framtagna ytbeläggningarna testas under längre tid för att säkerställa funktion samt beständighet.

## Summary

The objective of the project was to increase the energy efficiency of air source heat pumps in cold climates through the development of functional surface coatings on the heat exchanger surfaces, which reduce the problems with frost build-up and defrosting. The problem has been adopted through an interdisciplinary approach, by bringing together both research and industrial partners with expertise in surface chemistry, surface coatings, heat exchangers, air source heat pumps and the market. We have shown that a superhydrophilic surface coating on the heat exchanger surfaces, i.e. a surface that is wetted very well by water, has resulted in the best results in heat pump tests in cold conditions. In mild winter conditions, the hydrophilic coating led to an increase in efficiency (COP) of the heat pump by 3.6%. In cold winter conditions, the differences between uncoated and coated evaporators were further amplified, to an improvement in COP of 5.3%. This is a significant improvement with this heat pump modification alone. Further improvements in COP could be achieved by developing the heat exchanger itself, with a tighter packing of fins as the frost grows more slowly on the superhydrophilic surface and thus does not block the passage as quickly. Our laboratory tests and theoretical calculations indicate that an improvement in COP of up to 9% is possible with a hydrophilic coating and a tighter packing of fins.

The work in the project initially consisted of developing and testing surface coatings on a laboratory scale. A central part of the development work was a specially built wind tunnel, which enabled the evaluation of different surface coatings in conditions typical of an air source heat pump. Since hydrophilic surface

coatings proved to be most advantageous, further development work focused on producing superhydrophilic surface coatings with high durability and long-term hydrophilicity. The most promising coatings in terms of performance and durability were coated in the following steps on real heat exchangers and then evaluated in relevant heat pump trials by participating industrial partners. The next step consists of further testing of the developed coatings in terms of long-term performance and durability.

## Inledning/Bakgrund

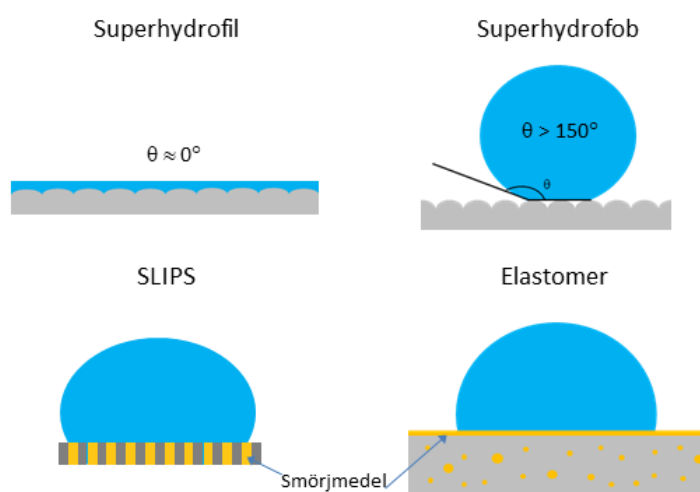
Luftvärmepumpar är den snabbast växande värmepumpstypen i Europa, med en marknadsstorlek av 13,2 miljarder dollar och förväntad årlig tillväxt på 8,3% (CAGR) från 2022 till 2030 [1]. Den pågående energikrisen till följd av den geopolitiska situationen i Europa har ytterligare ökat behovet av miljövänliga energislag som luftvärmepumpar. Problem med frostuppbyggnad och behovet av avfrostning begränsar dock användningen av luftvärmepumpar i kallare klimat. Om problemen med frost kunde lösas förväntas luftvärmepumpar att bli mer konkurrenskraftiga jämfört med andra alternativ för uppvärmning.

Av de ovan nämnda skälen finns det ett behov av att förbättra drifttiden före påfrysning och avfrostning. När fuktig luft med högre temperatur träffar ytan på en värmeväxlare vid minusgrader, börjar ett frostlager att växa. Detta frostlager ökar det termiska motståndet och blockerar luftflödet, vilket drastiskt minskar värmeväxlarens effektivitet och därmed värmepumpens prestanda. För att upprätthålla en god prestanda och säkerställa enhetens mekaniska integritet krävs periodisk avfrostning, som förbrukar stora mängder energi, vilket ytterligare minskar effektiviteten hos värmepumpsenheten.

Funktionella ytbeläggningar har visat sig ha positiva effekter för att motverka is- och frostuppbyggnad i en mängd forskningsstudier. Superhydrofila ytor, dvs. ytor där vattendroppar sprids ut till en tunn film har i en del studier visat sig ha positiva effekter i värmeväxlartillämpningar [2]. Denna effekt kan uppnås genom att man kombinerar en hydrofil ytkemi med en lämplig ytstruktur, som ytterligare driver på vätningen [3]. Om en superhydrofil yta beläggs med ett tunt hydrofobt (vattenavstötande) skikt, blir effekten motsatt och vattendroppar tar en nästan sfärisk form pga. luftfickor mellan vattendroppen och ytan [4]. Droppar rullar även av ytan vid låg lutning av substratet (roll-offvinkel). Superhydrofoba beläggningar har visat sig vara effektiva för att fördröja uppbyggandet av frost och is [5]. Slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) är en relativt ny teknologi som består av att en porös yta fylls med ett smörjmedel, vilket hålls på plats med hjälp av den porösa ytans kapillärkrafter [6]. I kontakt med en vätska uppstår således en vätska-vätskakontakt med i regel låg friktion som följd. Frostbildning har visat sig vara kraftigt reducerad på sådana ytor och extremt låga värden på isvidhäftningen har rapporterats [7]. Den senaste klassen av anti-isbeläggningar, vätskefyllda elastomerer, består av en kombination av smörjmedel och elastomerbeläggning. Smörjmedlet blandas in i elastomermatrisen, t.ex. PDMS, vilken fungerar som en

reservoar för smörjmedlet. Sådana material har uppvisat mycket låg isvidhäftning, även efter upprepade nedisning-avisningscykler [8-11]. En schematisk bild över ovan nämnda beläggningsteknologier ges i Figur 1.

Baserat på resultaten i ett tidigare forskningsprojekt finansierat av Energimyndigheten (dnr 2015-000111) har fokus i detta projekt främst legat på utveckling av superhydrofila beläggningar. Projektet har koordinerats av RISE Research Institutes of Sweden och har pågått sedan hösten 2019 till början av 2023. Projekttiden förlängdes med drygt till en följd av förseningar på grund av pandemin.



**Figur 1.** Schematisk bild av olika ytbeläggningsteknologier.

## Genomförande

Projektet har drivits som ett samarbete mellan RISE, KTH och deltagande företag. Projektgruppen består av både industri- och forskningspartners med omfattande kunskaper om värmväxlare och värmepumpar (Danfoss, Nibe, Gränges, KTH, RISE), marknaden (Danfoss, Nibe, Gränges), material (Gränges, RISE) och ytmodifieringar (RISE). Projektarbetet var uppdelat i sex olika arbetspaket (AP1-AP6). Flera arbetspaket innehöll både grundforskning och industriell forskning, som framgår nedan.

### AP1. Projektledning (RISE).

RISE har koordinerat projektet vilket innefattar alla kontakter med och rapportering till EM, ansvar för den dagliga projektledningen, och upprättande av regelbundna projektmöten. Avsikten var också att få på plats ett konsortialavtal för reglering av IP-frågor mm.

### AP2. Utveckling av ytbeläggningar (RISE, Gränges)

Fokus har legat på utveckling av superhydrofila ytbeläggningsskoncept, men även andra teknologier, t.ex. superhydrofoba (vattenavstötande), SLIPS (Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces), och elastomerytor utvärderades inledningsvis.

Ytbeläggningarna applicerades på aluminiumsubstrat som tillhandahölls av Gränges samt Danfoss. Ytbeläggningarna har främst utvecklats med så kallad sol-gelteknologi, som är en välkänd våtkemisk metod inom materialvetenskap. Men även andra teknologier som till exempel polymera material har utvärderats. En stor del av arbetet har bestått av att förbättra beständigheten hos beläggningarna samt att erhålla en långvarig superhydrofil effekt.

#### **AP3. Karakterisering av ytbelagda Al-plåtar (RISE, Danfoss, Gränges)**

De ytbelagda Al-substraten analyserades med avseende på vätningssegenskaper (kontaktvinkelmätningar), ytråhet/topografi (SEM), beläggningars vidhäftning till substratet (t.ex. tejptester eller liknande), hållbarhetstester (nötningstester, ”immersion test”). Utomhusexponering av beläggningarna har utförts både i Sverige (RISE) och i Kina (Gränges). Den största delen av de mekaniska testerna utfördes av Danfoss.

#### **AP4. Screening av ytbeläggningkandidater i vindtunnelstester (KTH)**

KTH utvärderade beläggningarnas påfrostnings- samt avfrostningsegenskaper i en specialdesignad vindtunnel där luftflödet, luftfuktigheten samt aluminiumytornas temperatur kontrollerades för att så långt som möjligt påminna om verkliga förhållanden i en luftvärmepump. KTH utförde även en parameterstudie för att bestämma effekten av flänsavstånd på verkningsgraden (COP).

#### **AP5. Beläggning och karakterisering av fullskaliga värmeväxlare (RISE, Nibe, Danfoss)**

De mest lovande ytbeläggningformuleringarna som framtoogs i AP2 applicerades på värmeväxlare. Både mikrokanalvärmeväxlare från Danfoss och s.k. fin&tubevärmeväxlare från Nibe har ytbelagts. Ytbeläggningarna applicerades genom doppning och/eller sprayning (nFOG). De ytbelagda värmeväxlarna utvärderades med avseende på ytbeläggningarnas jämnhet (täckningsgrad), vätningssegenskaper (vatten). Detta gjordes genom delning av värmeväxlarna i flera delar vilket möjliggjorde inspektion av enskilda flänsar och utvärdering av deras vätningssegenskaper och täckningsgrad.

#### **AP6. Fullskaliga prestandatester av ytbelagda värmeväxlare (Nibe, Danfoss,)**

De mest lovande ytbeläggningarna (2-3 st) baserade på vindtunneltesterna i AP4 och värmeväxlartesterna i AP5, testades i riktiga värmepumpsapplikationer. Prestandan hos de optimerade ytbeläggningarna testades med avseende på termiska egenskaper, frostbildnings- och avfrostningskinetik, etc. Möjliga energibesparingar pga. de ytbelagda värmeväxlarna utvärderades, inkl. COP (coefficient of performance)

## **Resultat**

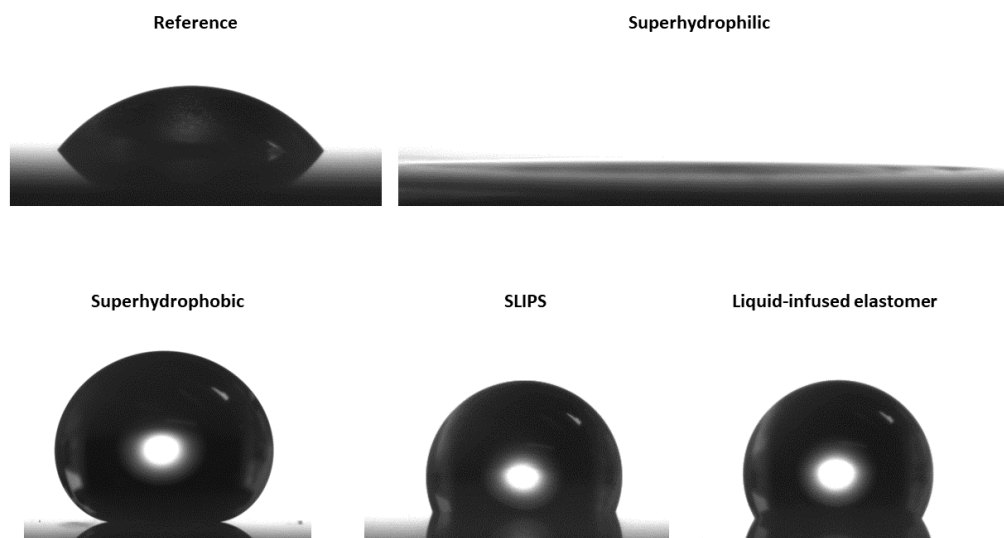
### **AP1. Projektledning**

RISE har koordinerat projektet och sammankallat till regelbundna projektmöten och stått för kommunikationen med Energimyndigheten. Totalt har hela

projektgruppen haft fem (5) stycken projektmöten. Utöver detta har RISE haft en kontinuerlig kommunikation med alla partners för att säkerställa att projektet framskridit enligt plan. Tyvärr lyckades vi inte få ett konsortialavtal undertecknat av alla parter pga. obalansen i inkind-bidrag från företagen.

### **AP2 och AP3. Utveckling av ytbeläggningar och karakterisering av ytbelagda aluminiumplåtar**

RISE har ansvarat för ytbeläggningsutvecklingen i projektet. Inledningsvis utvecklade vi olika ytbeläggningsteknologier för utvärdering i KTH:s vindtunnel. Som substrat användes aluminiumfolier (AA3003), aluminiumrör ämnade för mikrokanalvärmväxlare (AA3102) och aluminiumblock (EN-AW-6060-T6) för KTH:s vindtunnelförsök. De superhydrofila beläggningarna som inledningsvis utvecklades bestod av sol-gelbaserade partikelbeläggningar av SiO<sub>2</sub> där beläggningens ytstruktur bidrar till ökad vätning. En vattendroppe på en sådan yta sprids ut till en tunn film (se Figur 2). Den superhydrofoba ytan skapades genom att en tunn hydrofob beläggning applicerades på SiO<sub>2</sub>-partikelbeläggningen, vilket resulterade i en hög kontaktvinkel (160°) och låg roll-offvinkel (se Tabell 1). SLIPS-ytan skapades genom att fylla den porösa SiO<sub>2</sub>-ytan med silikonolja. Detta leder till en hydrofob yta där en vattendroppe lätt glider av ytan (se Tabell 1). Vi utvecklade även en elastomeryta (PDMS) som fylldes med silikonolja.



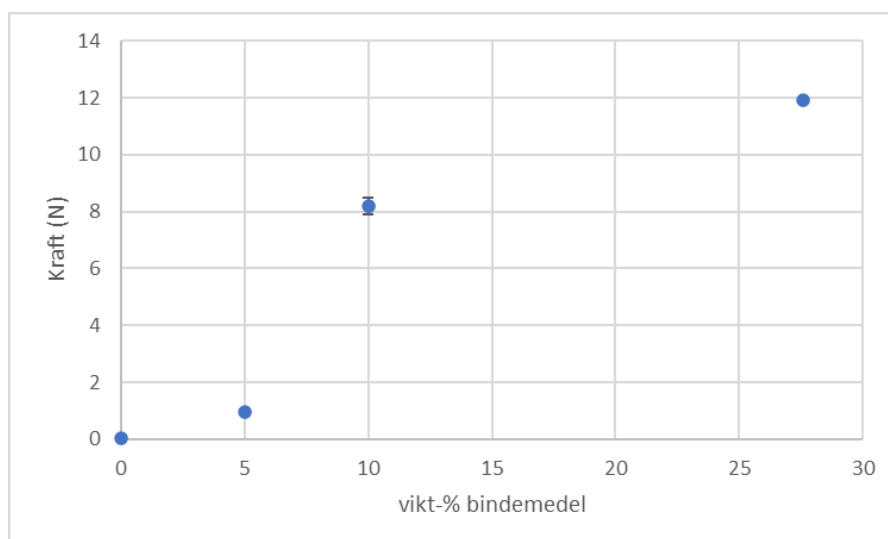
**Figur 2.** Vattendroppar på obelagd aluminium (referens), superhydrofil, superhydrofob, SLIPS och elastomeryta.

**Tabell 1.** Kontaktvinklar och roll-offvinklar för olika beläggningar.

Prov	Statisk CA (°)	Roll-off vinkel (°)
Superhydrofil	$\approx 0$	-
Superhydrofob	$> 150$	$< 1$
SLIPS	$103 \pm 1$	$< 1$
Elastomer	$114 \pm 1$	$20 \pm 4$

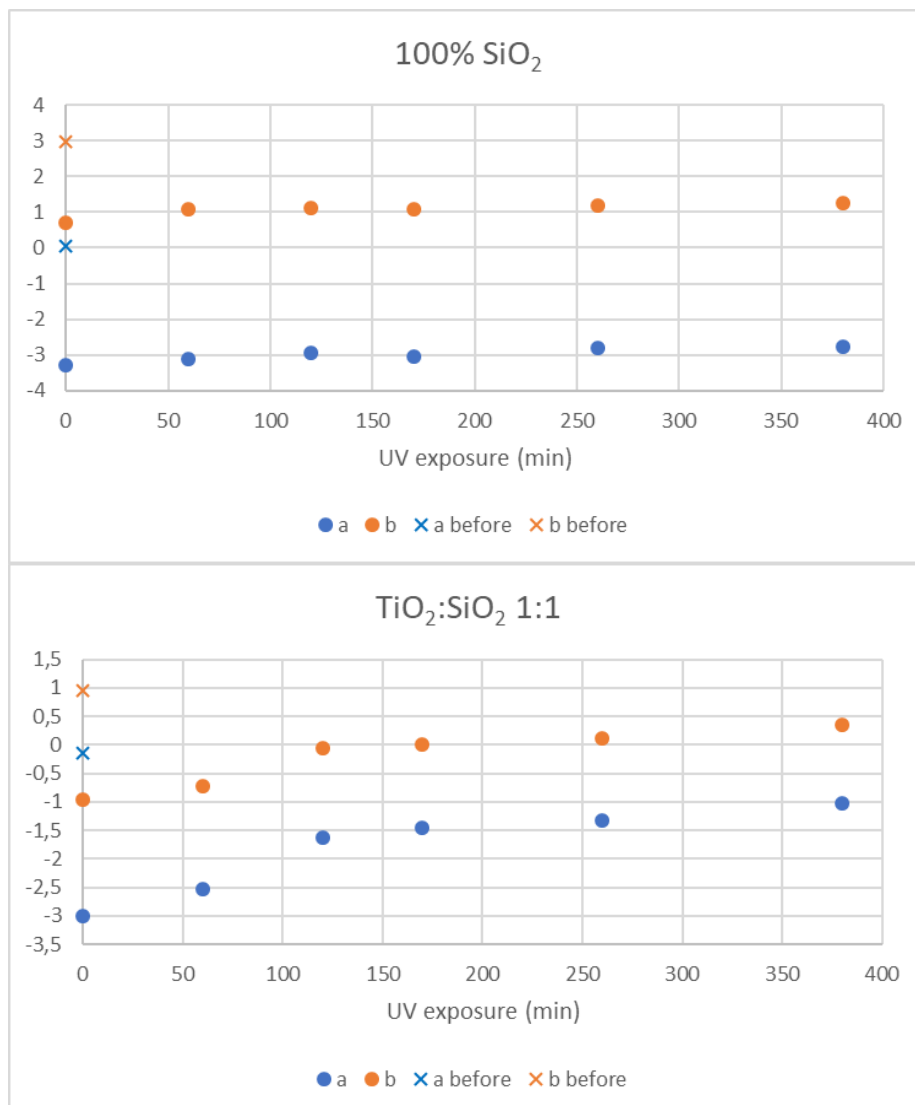
\*roll-offvinkel = den tiltvinkel på substratet då droppen rullar/glider av ytan

Arbetet har sedermera fokuserat kring framställning av hydrofila beläggningar, som presterade klart bäst i KTH:s vindtunnelförsök (se resultat under AP4). Arbetet har bestått av en iterativ process där beläggningar har framställts, testats baserat på vätningsegenskaper och beständighet i AP3 och vidareutvecklats. Utmaningen har främst bestått av att ta fram en beläggning som är hydrofil under lång tid och dessutom är robust. Vi har arbetat med olika spår bl.a. polymera beläggningar bestående av azofärgämnen inkomponerade i epoxysystem eller akrylbaserade zwitterjonytor, samt anodiserade aluminumytor infärgade med azofärgämnen. Vi har dock fokuserat på sol-gelbaserade beläggningar eftersom de har visat sig ha störst potential. För att förbättra robustheten hos sol-gelbeläggningarna utvärderades olika koncentrationer av det oorganiska bindemedlet. Vidhäftningsmätningar med ett tejptest visar tydligt att ökad koncentration av bindemedel ökar kohesionen inom beläggningen. Man kan dock inte gå för högt i bindemedelskoncentration eftersom porositeten i beläggningen fylls igen och därmed förloras de superhydrofila egenskaperna.


**Figur 3.** Uppmätt kraft i tejptestet som funktion av bindemedelskoncentration.

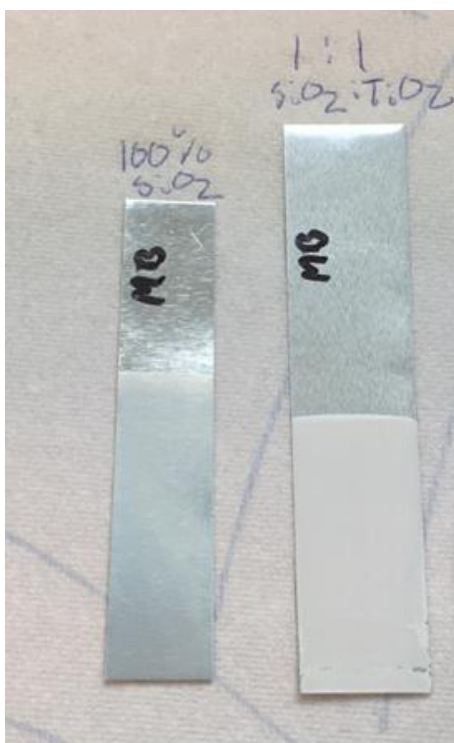


För att förbättra den långvariga hydrofiliciteten hos belägningarna ersattes en del av  $\text{SiO}_2$ -partiklarna med  $\text{TiO}_2$ -partiklar. Det är känt att titandioxid är fotokatalytiskt aktivt, vilket betyder att materialet har förmåga att bryta ner organiska föroreningar ifall det bestrålas med UV-ljus. För att testa detta smutsade vi ner prov innehållande enbart  $\text{SiO}_2$  samt prov innehållande en 1:1 blandning  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  med ett modellsmuts, metylenblå. Proven doppades i en metylenblå-lösning 5 ggr och lät torka varefter de fick en blåaktig färg. Sedan bestrålades proven med en UV-lampa (365 nm) och färgförändringen uppmättes med en kolorimeter som funktion av exponeringstid. Figur 4 visar resultaten för ren  $\text{SiO}_2$  och för  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -kompositen. Man kan tydligt se att i princip inget händer med  $\text{SiO}_2$ -provet medan för  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -belägningen rör sig de uppmätta värdena mot de ursprungliga innan nedsmutsning. Figur 5 visar en bild av proven efter 380 min UV-exponering, vilket visar att  $\text{SiO}_2$ -provet är fortfarande blåaktigt medan  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -provet har återfått sin vitaktiga färg.



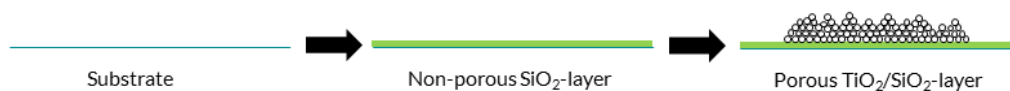
**Figur 4.** Färgmätningar med kolorimeter som funktion av UV-exponering för en  $\text{SiO}_2$ -beläggning och  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -beläggning.





**Figur 5.** Fotografier av SiO<sub>2</sub>-beläggningen och TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-beläggningen efter UV-exponering i 380 minuter.

Beläggningarna har även utvärderats med avseende på vätningsegenskaper, vidhäftning (ASTM D3359), hårdhet (ASTM D3363), "water immersion" (vattenedsänkning enligt ASTM D870), och gnuggtest (ASTM G5402-6). Testerna har utförts av Danfoss i flera omgångar. Proven har i regel uppvisat god vidhäftning till substratet samt goda mekaniska egenskaper, dock har vattenedsänkningstestet varit en utmaning. I standarden bör provet klara av 260 timmar nedsänkt i avjoniserat vatten av temperaturen 38 grader utan degradering. TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-beläggningen är porös för att åstadkomma den superhydrofila effekten men ger ett dåligt korrosionsskydd av Al-plåten. I den sista generationens beläggningar ytbelades därför i ett första steg en icke-porös silika-beläggning för skydd av Al-substratet innan applicering av TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-beläggningen. Se figur 6 för en schematisk bild av ytbeläggningsprocessen. Bilder av dylika prov efter 260 timmar respektive 500 timmars nedsänkning i 38 gradigt vatten ges i Figur 7. Efter 260 timmar är proven fortfarande relativt opåverkade medan efter 500 timmar börjar en viss degradering ske.

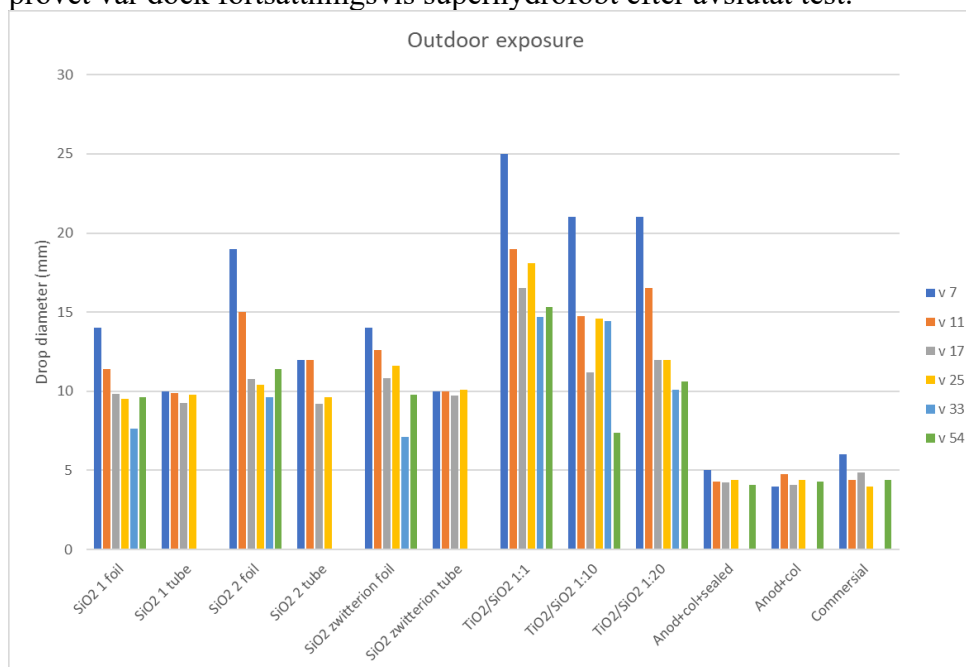


**Figur 6.** Schematisk bild av ytbeläggningsprocessen.



**Figur 7.** Bild av 2 ytbelagda Al-folier efter 260 timmar (vänster) och 500 timmar (höger) nedsänkning i 38 gradigt vatten.

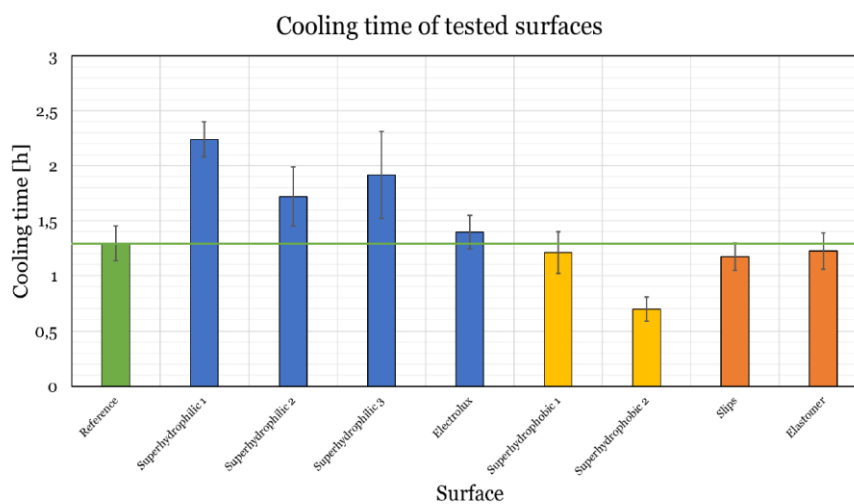
RISE har även studerat hydrofiliteten som funktion av tid vid utomhusexponering. En serie prov placerades utomhus under våren 2021 och hydrofiliteten har utvärderats genom att mäta spridningsdiametern för en droppe av en känd volym (se Figur 8). Testet pågick under 54 veckor från Juni 2021 till Juni 2022. Vattendroppar på prov innehållande titandioxid spred sig mest, och även fast spridningen minskade efter ett års utomhusexponering var proven fortsättningsvis superhydrofila då testet avslutades. Prov innehållande enbart silika bibehöll även sin superhydrofilitet relativt bra under testets gång. Hydrofila prov baserat på anodisering plus infärgning samt ett kommersiellt prov uppvisade betydligt sämre superhydrofila egenskaper. Gränges utförde beständighetsstudier av superhydrofilit och superhydrofobt ytbehandlade aluminiumfolier i Shanghai under 3 månaders tid under 2020. Proven tvättades dock genom indränkning i salpetersyra i 10 min efter avslutat test vilket komplicerade tolkningen av slutresultat. Det superhydrofoba provet var dock fortsättningsvis superhydrofobt efter avslutat test.



**Figur 8.** Spridningsdiametern för en 10 µL droppe på olika beläggningar som funktion av utomhusexponeringstid.

#### AP4. Screening av ytbeläggningskandidater i vindtunneltester

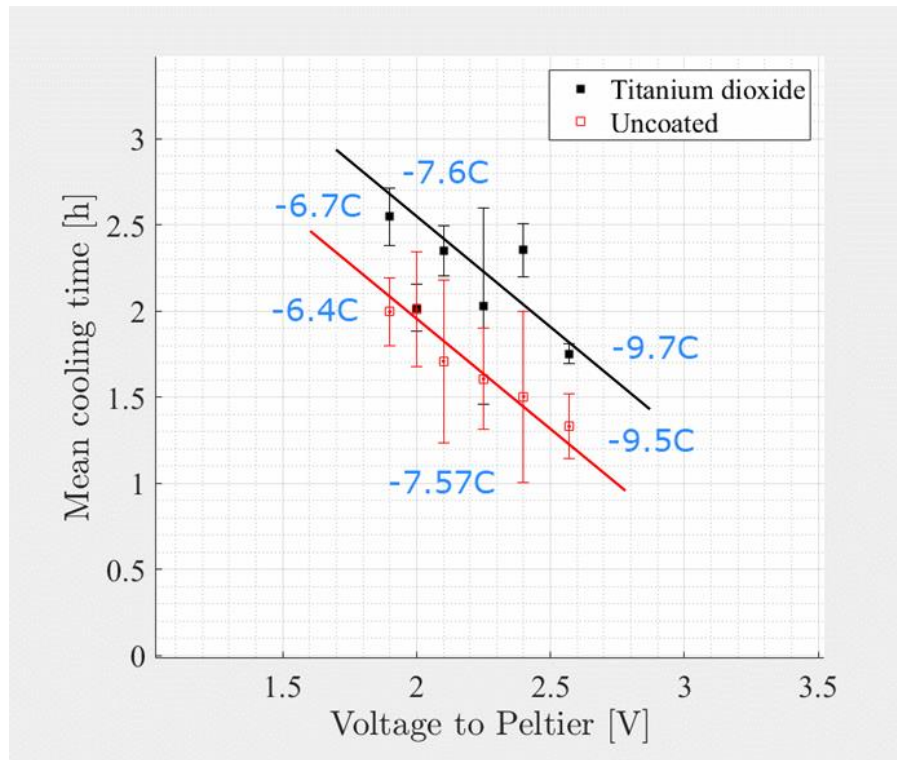
Arbetet delades in i tre delar i enlighet med ansökan. I det första steget utfördes en experimentell jämförelse mellan olika ytbeläggningar samt en obehandlad referensyta. Frosttillväxten studerades med hjälp av en för ändamålet specialbyggd vindtunnel där fuktig luft (84 %) med temperaturen 2 °C och hastigheten 2 m/s svepte över den studerade ytan kyld till -8 °C. För varje yta genomfördes repeterade påfrostningar och avfrostningar. Testförhållandena var valda för att efterlikna en riktig luftvärmepump (för mer information om vindtunneln och testförhållanden se bilaga 2). Totalt jämfördes nio ytor. I Figur 9 redovisas kyltiden för de olika ytorna d.v.s. tiden fram till efterföljande avfrostning. Det är eftersträfvansvärt att denna tid är lång då det betyder långsam frosttillväxt vilket ger färre avfrostningar. Ur figuren framgår att de hydrofila ytorna var genomgående bäst. Avfrostningstiden var relativt lika för de olika ytorna. I projektet drogs därför slutsatsen att hydrofila ytor skulle studeras vidare.



**Figur 9.** Kyltid för olika beläggningar.

I det andra steget var den ursprungliga tanken att modifiera vindtunneln så att inverkan av olika flänsavstånd kunde studeras. Efter en grundligare analys insågs att det var möjligt att genomföra denna studie med hjälp av den befintliga vindtunneln och en parametrisk studie av ytans temperatur. Ombyggnaden bestod därför av diverse förbättringar vilket gjorde att längre mätserier kunde genomföras.

I det tredje steget jämfördes en hydrofil yta (en förbättrad hydrofil yta innehållande titandioxid) med en obehandlad yta vid varierande ytemperaturer. I figuren nedan sammanfattas resultaten. Det framgår att den hydrofila ytan har ungefär en halvtimme längre kyltid än den obehandlade ytan.



**Figur 10.** Kyltid för en obehandlad och en hydrofil yta vid olika temperaturer.

Dessa resultat möjliggjorde en uppskattning av hur stor energivinsten skulle bli för en luftvärmepump med hydrofila värmväxlarytor jämfört en obehandlad yta. I genomsnitt, så ökar kyltiden med 30 % med en behandlad yta. Det innebär att frosten växer ca 30 % långsammare på den behandlade  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -ytan än på den obehandlade ytan. Detta medför att man kan ha fler (tätare) flänsar i en VVX då frosten växer långsammare och därmed inte blockerar passagen lika snabbt. Anta att vi kan ha som mest 30 % fler flänsar/flänsarea. Givet samma kyleffekt ( $Q$ ) så innebär detta att  $\Delta T$  (dvs temperaturdifferensen mellan luften och ytan) sjunker med 30 % (vi antar att  $UA$ -värdet ökar med 30 % genom areaökningen).

$$Q = UA \times \Delta T \quad (1)$$

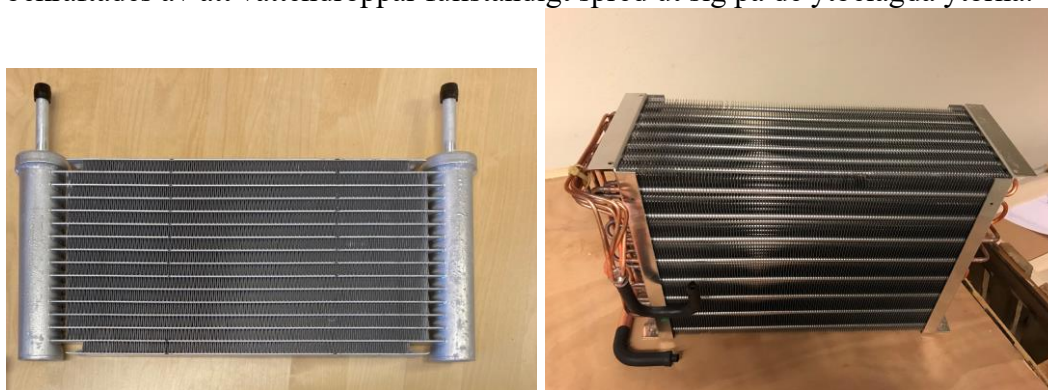
I Tabell 2 visas en sammanställning av den förväntade ökningen av förångningstemperaturen till följd av den hydrofila ytbeläggningen. Som ett genomsnitt blir temperaturökningen ca 3 grader. Det är känt att värmepumpens värmefaktor ökar med ca 2-3 % för varje grads ökning av förångningstemperaturen. Det innebär att en energivinst på 6-9 % är möjlig med en hydrofil ytbeläggning på förångarens flänsar.

**Tabell 2.** Förväntad ökning av förångingstemperatur

							Genomsnitt
Spänning/ $T_{\text{evap}}$	2,57	2,4	2,25	2,2	2	1,9	
TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	-9,7	-7,4	-8,7	-7,6	-8,3	-6,7	
$\Delta T$	11,7	9,4	10,7	9,6	10,3	8,7	
Nytt $\Delta T$	8,19	6,58	7,49	6,72	7,21	6,09	
Nytt $T_{\text{evap}}$	-6,19	-4,58	-5,49	-4,72	-5,21	-4,09	
Ökning $T_{\text{evap}}$	3,51	2,82	3,21	2,88	3,09	2,61	<b>3,02</b>

### AP5. Beläggning och karakterisering av fullskaliga värmeväxlare

RISE har ytbelagt mikrokanalvärmeväxlare från Danfoss (334 mm x 150 mm x 30 mm) och fin-tube värmeväxlare från Nibe (400 mm x 250 mm x 250 mm) med några av de mest lovande ytbeläggningarna (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>) baserat på resultaten i AP2-AP4. Bilder av värmeväxlarna ges i Figur 11. Eftersom en färdigt monterad värmeväxlare är ett utmanande objekt att belägga, har vi utvärderat olika ytbeläggningstekniker. Vi applicerade beläggningarna genom dipcoating och med en spraymetod, nFOG. Nibes värmeväxlare ytbelades enbart genom manuell dipcoating (se figur 9) pga. tjockleken hos värmeväxlaren. Danfoss' mikrokanalvärmeväxlare ytbelades både genom dipcoating (Figur 12) och med nFOG-metoden (Figur 13). I nFOG-metoden skapar man en fin dimma av formuleringen, och värmeväxlarna ytbelades genom att dimman sögs genom värmeväxlaren genom skapandet av en tryckskillnad. Bekräftelse på att beläggningen fastnade på värmeväxlarna gjordes med elektronmikroskopmätningar (Figur 14) efter att värmeväxlaren sågats itu. Bilderna visar tydligt att folien respektive rören är ytbelagd med partikelbeläggningen. De superhydrofila egenskaperna hos beläggningen bekräftades av att vattendroppar fullständigt spred ut sig på de ytbelagda ytorna.



**Figur 11.** Mikrokanalvärmeväxlare (vänster) från Danfoss och fin-tube värmeväxlare (höger) från Nibe.

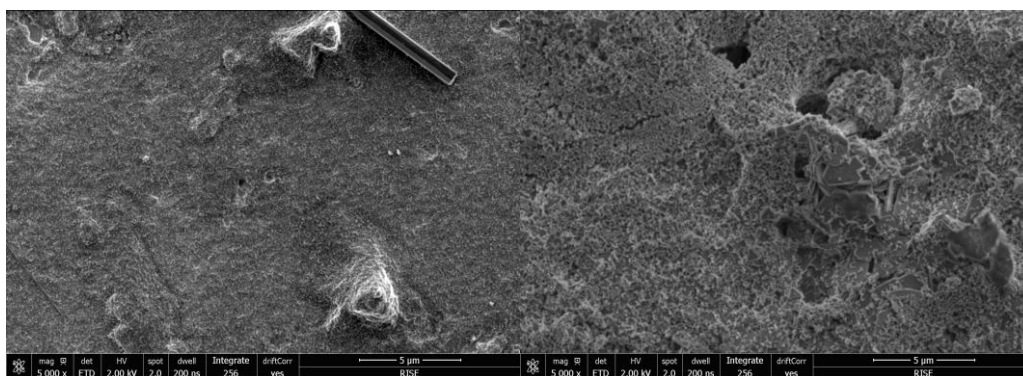




**Figur 12.** Manuell dipcoating av Nibe:s fin-tube värmeväxlare (vänster) och maskinell dipcoating av Danfoss' mikrokanalvärmeväxlare (höger).



**Figur 13.** Beläggning av mikrokanalvärmeväxlare med nFOG-metoden.



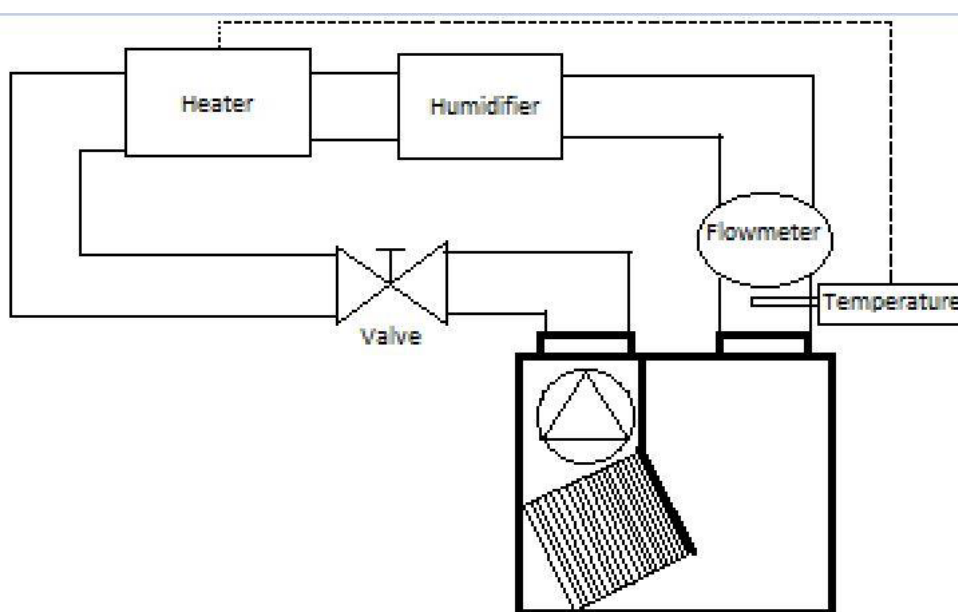
**Figur 14.** Elektronmikroskopibilder av en nFOG-belagd mikrokanalvärmeväxlare. Den vänstra bilden är tagen från Al-folie och den högre från Al-rör.

## AP6. Fullskaliga prestandatester av ytbelagda värmeväxlare

### Fin-tube värmeväxlare

Nibe utförde prestandatester på ytbelagda värmeväxlare (förångare) samt obelagda värmeväxlare som referens. Testerna utfördes vid ett konstant luftflöde av

temperaturen  $20^{\circ}\text{C}$  och relativ luftfuktighet 38%. Frånluftsflödet justerades till  $150\text{ m}^3/\text{h}$  vilket är typiskt för ett  $120\text{ m}^2$  hus i Sverige. Två olika experiment utfördes. Det första experimentet utfördes vid en förångningstemperatur av  $-6,7^{\circ}\text{C}$  ( $\approx$  ytttemperaturen hos aluminiumflänsarna), vilket simulerar milda vinterförhållanden. I det andra experimentet justerades förångningstemperaturen till  $-16^{\circ}\text{C}$  vilket simulerar kalla vinterförhållanden. Förångningstemperaturen kontrollerades genom justering av kompressorfrekvensen. Avfrostning initierades när frånluftsflödet hade minskat med 10% ( $15\text{ m}^3/\text{h}$ ). Förångarna avfrostades genom att slå av kompressorn, dvs. genom passiv avfrostning. När all is hade smält och frånluftsflödet återgått till ursprunglig nivå slogs kompressorn på igen. De viktigaste parametrarna som uppmättes och dokumenterades var den inkommande frånluftstemperaturen, luftfuktigheten hos inkommande frånluft, den utgående frånluftstemperaturen, frånluftsflöde, värmemediets flödes hastighet, värmemediets ingångstemperatur, värmemediets utgångstemperatur, ingångseffekt, utgångseffekt, kompressorfrekvens, förångningstemperatur, tid mellan avfrostningar, avfrostningstid, kondensationstemperatur, samt några andra interna temperaturer i värmepumpskretsen. Mätdata som presenteras är medelvärden över åtminstone 5 kontinuerliga avfrostningscykler i rad ( $>9$  timmar vid milda vinterförhållanden och  $>6$  timmar vid kalla vinterförhållanden) Testriggen som är en kontinuerlig slinga bestående av ett värmelement och luftfuktare som kontrollerar den inkommande frånluften till önskade förhållanden (Figur 15).



**Figur 15.** Schematisk bild över Nibe:s testrigg.

Den obelagda förångaren uppvisade sämst prestanda vid båda testförhållandena. Båda förångare var laddade så att samma medelutgångseffekt och ingångstemperatur uppnåddes (2,08 kW vid milda vinterförhållanden). Vid milda vinterförhållanden var tiden mellan avfrostningar i medeltal 104,6 minuter för den obelagda förångaren och 105,9 minuter för den ytbelagda. Ytbeläggningsen verkade



bara förlänga tiden mellan avfrostningar med 1,2% i medeltal. Detta var en relativt liten skillnad men avfrostningstiden förbättrades även med 7,6% (från 490 sekunder till 453 sekunder). Förbättringen i COP, dvs. förhållandet mellan utgångseffekt och ingångseffekt, blev därmed 3,6% (ökning från 3,31 till 3,43). Den huvudsakliga orsaken till förbättringen för den ytbelagda förångaren var att den obelagda förångaren måste kompensera för den ökade andelen avfrostningar med en högre ingångstemperatur, ca 2K högre kondensationstemperatur under drift. Bilder av respektive förångare 2/3 in i påfrysningsfasen visar tydliga skillnader mellan förångarna, där isen verkar mer koncentrerad till luftgränsskiktet för den obelagda medan isen är bättre fördelad för den ytbelagda (Figur 16).

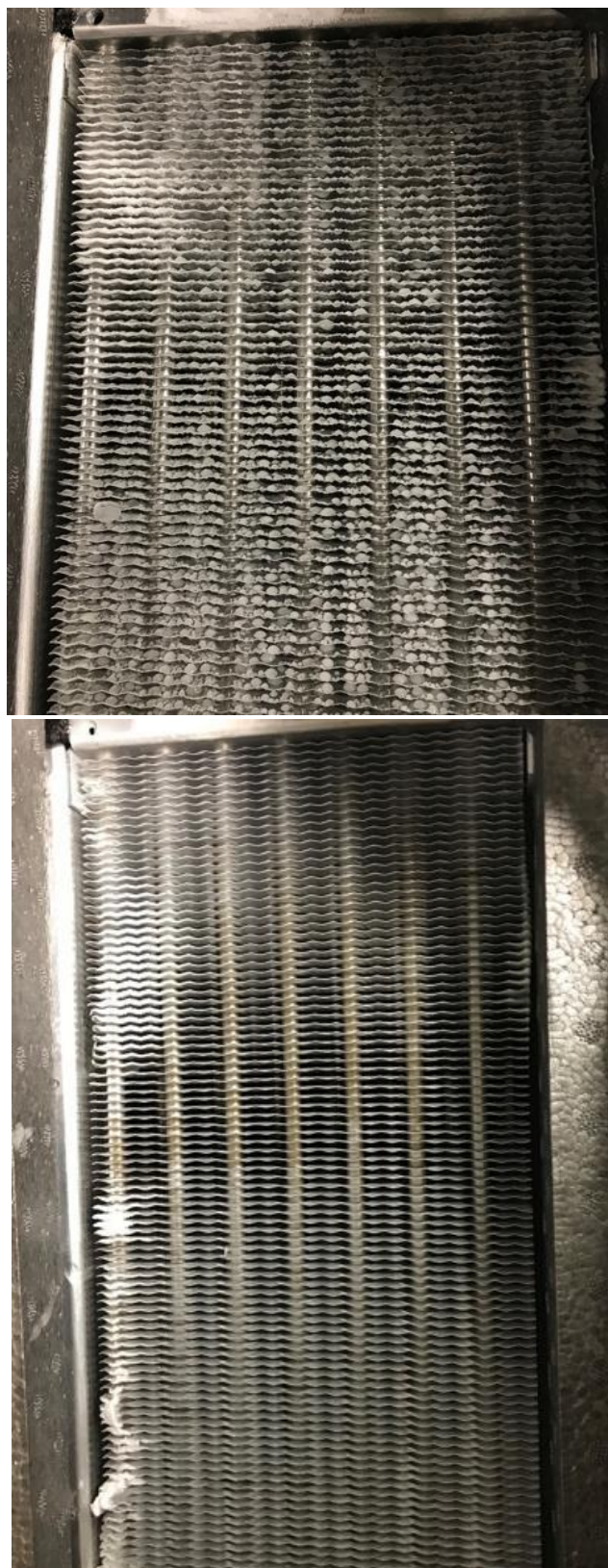




**Figur 16.** Bild av övre sidan av obelagd (övre bild) och ytbelagd (nedre bild) förångare under drift, 60 min efter att senaste avfrostning utfördes.

Skillnaderna mellan obelagd och ytbelagd blir ännu större vid kalla vinterförhållanden. Precis som tidigare var båda förångarna laddade så att samma medelutgångseffekt och ingångstemperatur uppnåddes (3,05 kW vid kalla vinterförhållanden), som ett medeltal för åtminstone 5 cykler. Tiden mellan avfrostningar var i medeltal 55,0 minuter för den obelagda och 62,8 för den ytbelagda. Den superhydrofila beläggningen förlängde tiden mellan avfrostningar med 14% i medeltal, vilket är signifikativt. Avfrostningstiden förkortades även från 480 sekunder till 414 sekunder, en minskning med 13,7%. COP gick därmed från 2,28 till 2,40, en ökning med 5,3%, vilket är en betydande förbättring från bara denna enda modifiering. Den huvudsakliga förklaringen till ökningen i COP var även i detta fall att den obelagda förångaren var tvungen att kompensera för ökningen i avfrostningar med en temporär högre ingångstemperatur, i form av ca 3K högre kondensationstemperatur. Skillnaden i isuppbyggnad mellan förångarna är enorm, vilket bilder tagna 5 min innan avfrostning tydligt demonstrerar (Figur 17). Den kraftiga isbildningen på den obelagda förångaren orsakar ett större tryckfall för fläkten, och avfrostningen initieras därmed tidigare än för förångaren med den superhydrofila ytbeläggningen.

Testerna kördes under 100 påfrysings/avfrostningscykler vilket ungefär motsvarar 1 veckas drift. Ingen försämring i prestanda kunde noteras under testets gång. Det uppmätta mätdata är presenterat i Tabell 3. Se bilaga 3 för mer detaljerad information om testerna.



**Figur 17.** Bild av övre sidan av obelagd (övre bild) och ytbelagd (nedre bild) förångare under drift, 5 min innan en avfrostning initierades.



**Tabell 3.** Mätdata från Nibes värmepumpsförsök.

	<u>Uncoated evaporator</u>		<u>Superhydrophilic evaporator</u>	
	<u>Mild winter day</u>	<u>Cold winter day</u>	<u>Mild winter day</u>	<u>Cold winter day</u>
<u>Exhaust air temperature (°C)</u>	<u>19,9</u>	<u>19,9</u>	<u>19,9</u>	<u>19,9</u>
<u>Relative humidity (%)</u>	<u>38,0</u>	<u>38,0</u>	<u>38,0</u>	<u>38,0</u>
<u>Exhaust air flow rate (m<sup>3</sup>/h)</u>	<u>150,1</u>	<u>147,5</u>	<u>150,6</u>	<u>147,0</u>
<u>Heating media flow rate (l/h)</u>	<u>192,1</u>	<u>299,0</u>	<u>195,6</u>	<u>300,8</u>
<u>Supply temperature (°C)</u>	<u>41,5</u>	<u>50,3</u>	<u>41,1</u>	<u>50,5</u>
<u>Return temperature (°C)</u>	<u>31,8</u>	<u>41,4</u>	<u>31,8</u>	<u>41,6</u>
<u>Heating power (kW)</u>	<u>2,08</u>	<u>3,02</u>	<u>2,08</u>	<u>3,07</u>
<u>Input power (kW)</u>	<u>0,63</u>	<u>1,32</u>	<u>0,61</u>	<u>1,28</u>
<u>Evaporation temperature (°C)</u>	<u>-5,6</u>	<u>-12,5</u>	<u>-6,2</u>	<u>-13,3</u>
<u>Condensation temperature (°C)</u>	<u>42,2</u>	<u>51,6</u>	<u>39,6</u>	<u>48,7</u>
<u>Defrost time (s)</u>	<u>490</u>	<u>480</u>	<u>453</u>	<u>414</u>
<u>Time between defrosts (min)</u>	<u>104,6</u>	<u>55,0</u>	<u>105,6</u>	<u>62,8</u>

### Mikrokanalvärmväxlare

Danfoss utförde fullskaliga prestandatest på obelagda och ytbelagda mikrokanalvärmväxlare (MCHX). Värmväxlarna som ytbelades med nFOG-metoden användes i testerna. Värmväxlarna monterades i en testrigg i en vindtunnel enligt Figur 18. De experimentella betingelserna beskrivs i Tabell 4. Värmväxlarnas tryckfall och dräneringsförmågan var de huvudsakliga parametrarna som studerades.

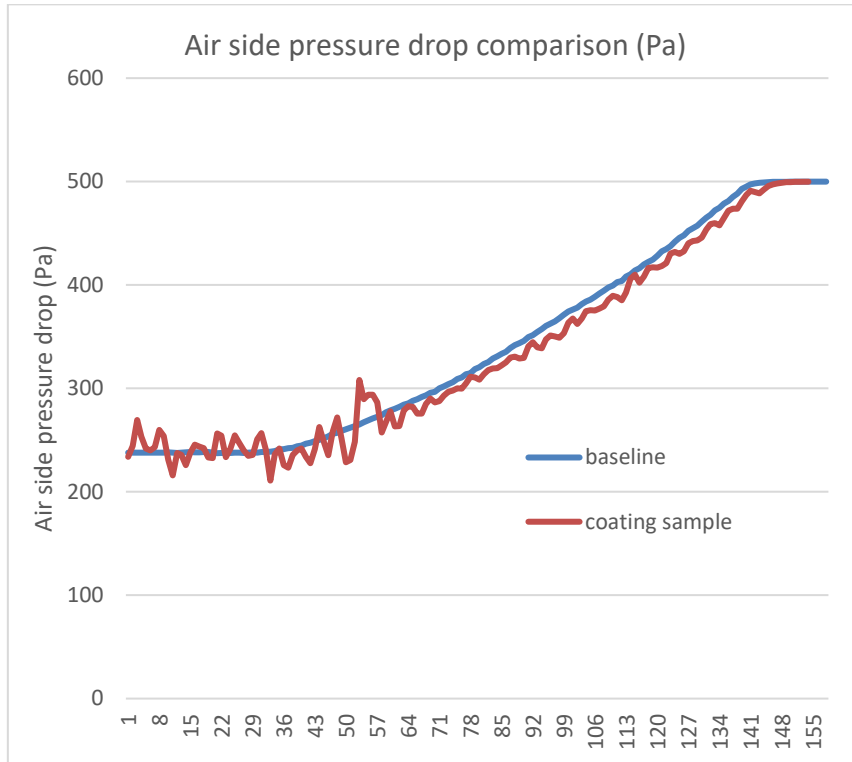


**Figur 18.** Testuppställningen för obelagda (vänster) och ytbelagda (höger) MCHX.

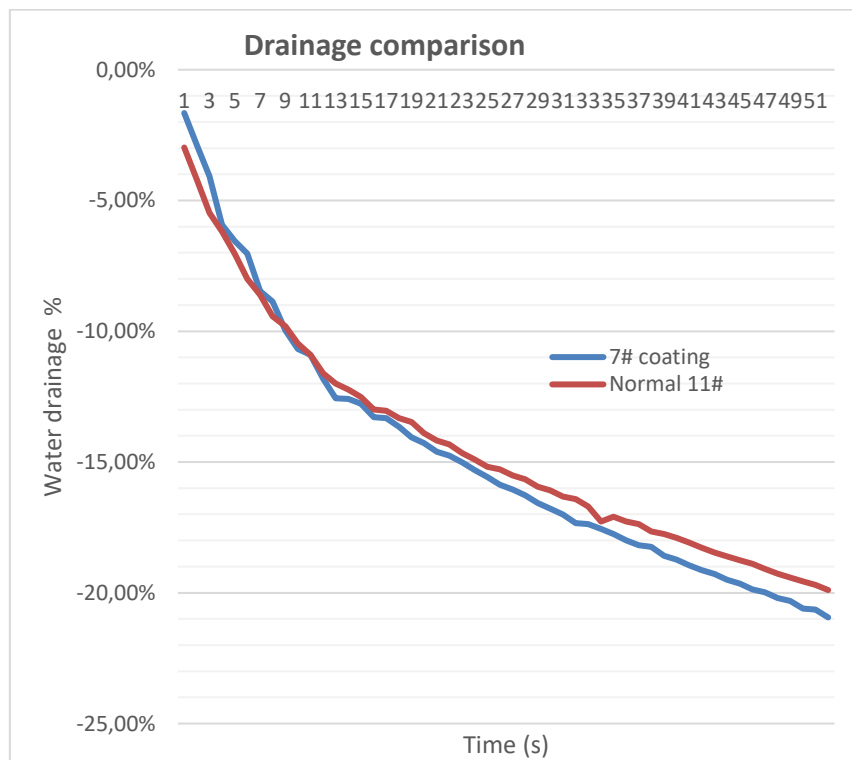
**Tabell 4.** Experimentella betingelser i Danfoss fullskaliga test.

Dry bulb Temp (°C)	2
Wet bulb Temp(°C)	1
Entering glycol Temp (°C)	-5
Glycol flow rate (m <sup>3</sup> /h)	4
Air speed (m/s)	4,4

Efter 15 minuter studerades frostuppbyggnaden på respektive grupp av värmeväxlare, och ingen synlig skillnad mellan obelagda och ytbelagda MCHX kunde observeras. När luftsidas tryckfall nått den maximala nivån av vindtunnelns kapacitet avbröts testet, vilket tog ca 20 minuter för en cykel. Den jämbördiga prestandan för obelagd och ytbelagd värmeväxlare illustreras ytterligare av tryckfallskurvan och vattendränningen i Figur 19 och 20. Orsaken till att en superhydrofil beläggning på MCHX inte gav någon positiv effekt på prestandan är oklar.



Figur 19. Tryckfallet på luftsidan för obelagd respektive ytbelagd MCHX.



Figur 20. Jämförelse av dräneringen från en ytbelagd vs. obelagd MCHX.

## Diskussion

Vi har visat att med en superhydrofil beläggning på värmeväxlarytan kan man förlänga tiden mellan avfrostningar genom att frostsiktet som byggs upp är tunnare och mera jämnt fördelat, vilket leder till en högre verkningsgrad (COP) för värmepumpen. Prestandatester av ytbelagda värmeväxlare (förångare) utfördes av Nibe vid typiska vinterförhållanden. Vid milda vinterförhållanden ledde den hydrofila beläggningen till en ökning i COP dvs. förhållandet mellan utgångseffekt och ingångseffekt, med 3,6%. Skillnaderna mellan obelagd och ytbelagd förångare förstärktes ytterligare vid kalla vinterförhållanden. Den superhydrofila beläggningen förlängde tiden mellan avfrostningar med 14% i medeltal, vilket är signifikativt. Avfrostningstiden förkortades även från 480 sekunder till 414 sekunder, en minskning med 13,7%. COP gick därmed från 2,28 till 2,40, en ökning med 5,3%, vilket är en betydande förbättring med enbart denna modifiering. Standard på marknaden är någon typ av antikorrosionsbeläggning på värmeväxlarytan, vilket i praktiken leder till aningen sämre värmeöverföring vilket betyder att förbättringen i COP egentligen är ännu större med en hydrofil beläggning. En ytterligare förbättring i COP skulle kunna uppnås med ett kortare avstånd mellan flänsarna i förångaren, vilket demonstrerades av en parametrisk studie utförd i KTH:s specialbyggda vindtunnel. Hypotesen består av att man kan ha fler (tätare) flänsar i en värmeväxlare då frosten växer långsammare och därmed inte blockerar passagen lika snabbt. Resultaten visar att en förbättring i COP upp till 9% skulle kunna uppnås med en hydrofil beläggning och kortare flänsavstånd.

Dessa resultat kan i förlängningen leda till att luftvärmepumpar i större utsträckning kan användas som uppvärmningskälla även i kalla klimat. Detta skulle ha en positiv effekt på energisystemet som helhet, då det finns ett starkt behov av ersättning av fossila energikällor med mera hållbara alternativ. Närmast behöver de framtagna ytbeläggningarna testas under längre tid för att säkerställa funktion samt beständighet.

## Publikationslista

Resultat från projektet presenterades med en muntlig presentation på ASHRAE:s vinterkonferens i Las Vegas i januari 2022. En konferensartikel publicerades också, se nedan.

Humire Nyholm, E., Järn, M., Björk, E., Investigation of influence of superhydrophilic and superhydrophobic coated aluminum surfaces on frost formation, ASHRAE Transactions, Atlanta, Vol 128 (2022): 357-365.

Presentationsmaterial om projektet har framtagits för publicering på TERMO:s kommunikationskanaler (<https://termoinnovation.se/projekt/utveckling-av-energieffektivare-luftvarmepumpar/>)



## Referenser, källor

1. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/europe-air-source-heat-pump-market>
2. 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, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 75 (2016) 25–34.
3. J. Drelich, E. Chibowski, Superhydrophilic and Superwetting Surfaces: Definition and Mechanisms of Control, *Langmuir* 26 (2010) 18621-18623
4. A. B. D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday. Soc.* 40 (1944) 546-551.
5. J. B. Boreyko, C. P. Collier, Delayed Frost Growth on Jumping-Drop Superhydrophobic Surfaces, *ACS Nano* 7, 1618-1627, **2013**
6. T-S. Wong, S. H. Kang, S. K. Y. Tang, E. J. Smythe, B. D. Hatton, A. Grinthal, J. Aizenberg, Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity, *Nature* 477, 443., 2011
7. M. J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg, Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? *Nature Reviews Materials* 2016, 1, 15003.
8. Zhu, L., Xue, J., Wang, Y., Chen, Q., Ding, J., Wang, Q., Ice-phobic coatings based on silicon-oil-infused polydimethylsiloxane, *ACS Applied Mater Int* 5 (2013), 4053-4062.
9. Han Yeong, Milionis, A., Loth, E., Sokhey, J., Self-lubricating icephobic elastomer coating (SLIC) for ultralow ice adhesion with enhanced durability, *Cold Regions Science and Technology* 148 (2018), 29-37.
10. Tao, C., Li, X., Liu, B., Zhang, K., Zhao, Y., Zhu, K., Yuan, X., Highly icephobic properties on slippery surfaces formed from polysiloxane and fluorinated POSS, *Progress in Organic Coatings* 103 (2017), 48-69.
11. Zhuo, Y., Håkonsen, V., He, Z., Xiao, S., He, J., Zhang, Z., Enhancing the mechanical durability of icephobic surfaces by introducing autonomous self-healing function, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10 (2018) 11972-11978.

## **Bilagor**

Bilaga 1: Administrativ bilaga

Bilaga 2: Description of the wind tunnel and testing conditions

Bilaga 3: Test of superhydrophilic coated evaporator

Bilaga 4: Humire Nyholm, E., Järn, M., Björk, E., Investigation of influence of superhydrophilic and superhydrophobic coated aluminum surfaces on frost formation, ASHRAE Transactions, Atlanta, Vol 128 (2022): 357-365.