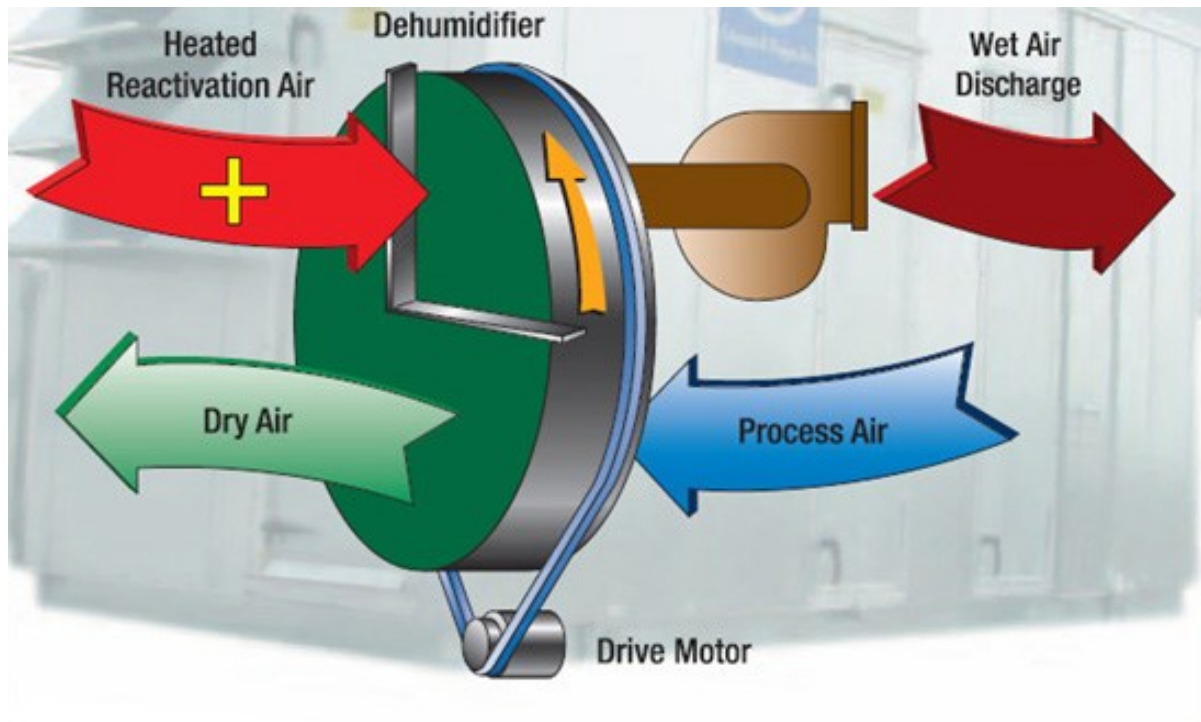




NERIS – Del 2

Metoder och energianvändning för avfuktning i ishallar

22 december 2017

Jörgen Rogstam, Juris Pomerancevs, Simon Bolteau och Cajus Grönqvist

EKA - Energi & Kylanalys AB

TRITA-ABE-RPT-1829

ISBN: 978-91-7873-010-0

Sammanfattning

Projektnamnet NERIS är en initialförkortning på Nordicbuilt: Evaluation and Renovation of Ice halls and Swimming halls. NERIS leds av Institutionen för Bygghälsa på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm, Sverige.

Denna rapport, Metoder och energianvändning för avfuktning i ishallar, är den andra delen i en serie av fyra vars uppgift är att behandla olika aspekter av fukt i ishallar. Arbetet behandlar initialt olika avfuktningsmetoder som är vanligt förekommande i ishallar samt deras funktion. En metod är skylavfuktning vilken går ut på att kondensera ut fukten ut luften. Begränsningen med just denna metod är att det är svårt att komma med i de låga fukthalter som krävs i en ishall. Den vanligaste avfuktningsmetoden är sk sorptionsavfuktning vilken bygger på att fukt bortförs med hjälp av ett fuktabsorberande material som sedan regenereras med högt tempererad värme. Metoden är avfuktningsmässigt effektiv men kräver också stora mängder energi av hög temperatur – ofta i form av el. Årsbehovet ligger i allmänhet mellan 50 och 150 MWh för en mindre eller medelstor ishall.

Faktorer som påverkar energianvändningen är av stort intresse och det visas att det omgivande klimatet spelar stor roll genom att luftläckage är den mest betydande källan till fukten. Samtidigt kan man visa att styrprincipen också spelar en avgörande roll. Att använda det traditionella sättet att styra avfuktningen baserat på relativ fukt kan straffa sig rejält. Inte nog med att man kan få alltför höga fuktnivåer då lufttemperaturen är hög, men det leder ofta också till sk överavfuktning när det väl blir kallare. I ett aktuellt exempel påvisas att över 30% av avfuktningsenergin används till ingen nytta, vilket i fallet som studerats här betyder 44 MWh el i potentiell besparing på årsbasis.

Man kan också illustrera och jämföra energianvändningen i olika anläggningar genom att ta fram sk energisignaturer. Detta är ett verktyg för att förstå hur anläggningar kan jämföras samt vilka faktorer som driver energianvändningen. Inverkan och betydelsen av luftläckage som den mest betydande fuktkällan diskuteras och kommer att behandlas närmare i kommande studier.

Ett intressant område är hur man sparar energi och vilka alternativa energiformer som kan användas i avfuktningsprocessen. Genom det vi kallar första generationens återvinningsdrivna teknik så kombinerar man värme från återvinning, fjärrvärme eller något annat med den vanligen använda i avfuktaren inbyggda elvärmerna för regenereringen. Detta är en bra början och kan spara storleksordningen 40% el till avfuktningsfunktionen. I andra generationens aggregat används vätskeburen värme av ca 60°C temperaturnivå vilket lämpar sig väl för t ex återvinningsvärme från kylsystemet eller annan valfri värmekälla. Erfarenheterna visar på att över 80% av avfuktningsprocessens energibehov kan tillgodoses med t ex återvunnen värme.

Summary

The project name NERIS is an acronym for Nordicbuilt: Evaluation and Renovation of Ice halls and Swimming halls. NERIS is led by the department of Civil Engineering at the Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm, Sweden.

This report is part two in a series of four, which will address moisture in ice rinks. Part two reviews different dehumidification methods that are typically used in ice rinks including their functions. One such method is refrigeration dehumidification which aims to condense the moisture out from the air. The drawback with this method is that it becomes challenging to achieve the low humidity levels that are required in an ice rink. The most common method is desiccant dehumidification, where moisture is removed from the air by a humidity-absorbing material that needs to be reactivated with high-temperature heat. The method is in terms of dehumidification effective, but the amount of high-temperature heating energy required is often quite significant. The yearly demand in a typical ice rink lies between 50 and 150 MWh, where the heat source is often electricity.

The surrounding climate affects highly the dehumidification energy demand since air leakage through the building envelope is the biggest moisture source in an ice rink. The control strategy plays big role in the energy use as well, and it has been found that the traditional strategy based on relative humidity can lead to very bad results. During the warm period of the year the RH-strategy can allow too high levels of humidity in the arena room, while the opposite becomes true during the colder periods where the ice rink gets “over dried”. In a studied ice rink, it could be concluded that 30% of the dehumidification energy had gone to waste due to the used control strategy, which in this case meant that 44 MWh of electricity could be saved on a yearly basis.

The energy use of different ice rinks can also be compared by using so called energy signatures. This is a good way to compare the performance in different conditions and to understand what drives the energy use. Air leakages are the main cause for the dehumidification energy demand and will be discussed further in the latter parts of the NERIS-project.

An interesting field is alternative heat sources for the reactivation of the sorption dehumidifier, since it can potentially lead to significant savings in energy use. In the first generation of the technology recovered heat from the refrigeration system or district heating are typically used in combination with the electric heating, which can save up to 40% in the electricity use in the dehumidification system. In the second generation of the technology it becomes possible to use water-based heat of 60°C to reactivate the dehumidifier, which makes it possible to lower the electricity demand even further. Results and experiences show that more than 80% of the dehumidification energy demand can be covered by recovered heat from the refrigeration system.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary.....	4
Innehållsförteckning.....	5
Figurförteckning	6
1 Introduktion.....	7
1.1 Bakgrund och omfattning av NERIS-projektet.....	7
1.2 Omfattning av NERIS – Del 2: Metoder och energianvändning för avfuktning i ishallar	7
2 Avfuktningssystemer i en ishall	8
2.1 Kylavfuktning	8
2.1.1 Direkt kylavfuktningssystem.....	8
2.1.2 Indirekt system	8
2.2 Sorptionsavfuktare	9
3 Avfuktningssystemets energianvändning.....	12
3.1 Kylavfuktarens prestanda	12
3.2 Sorptionsavfuktarens årliga energianvändning.....	12
3.3 Variationer under säsongen	13
3.4 Avfuktningssystemets energisignatur	14
3.5 Energianvändning för olika styrprinciper	17
4 Energibesparingsåtgärder	19
4.1 Generation 1 – hybridvärmning med återvinning.....	19
4.2 Generation 2 – fullständig regenerering med återvunnen värme	21
5 Slutsatser	25
6 Referenser	26

Figurförteckning

Figur 1. Principschema på kylavfuktare med direkt expansion.....	8
Figur 2. Principskiss på indirekt kylavfuktare.	9
Figur 3. En större sorptionsavfuktare i en svensk arenaanläggning.....	10
Figur 4. Sorptionsavfuktarens arbetsprincip.	10
Figur 5. Illustration av adsorption och desorption i mikroskala (Fuktkontroll).....	11
Figur 6. Avfuktningsystemets energianvändning i analyserade ishallar.....	13
Figur 7. Avfuktningsystemets månatliga energianvändning i olika ishallar.....	14
Figur 8. Avfuktningsystemets energianvändning i förhållande till ångkvotsdifferensen.	15
Figur 9. Ångkvotsförhållandet mellan inne- och uteluften i två ishallar.	16
Figur 10. Avfuktarens energianvändning i % av total årlig energi i förhållande till daggpunkten.	17
Figur 11. Arbetsprincipen för första generationens sorptionsavfuktare med återvinningsvärmning.	19
Figur 12. Första generationens hybridavfuktare (TV) - anslutningen till värmeåtervinningen (TH).	20
Figur 13. Avfuktarens energianvändning - första generationens återvinningsteknik.....	20
Figur 14. Avfuktarens månatliga energianvändning i ishall 5.....	21
Figur 15. Arbetsprincipen i andra generationens sorptionsavfuktare driven med återvinningsvärme (Fuktkontroll).....	22
Figur 16. Andra generationens värmeåtervinningsregenererade avfuktare.	22
Figur 17. Fördelningen av avfuktarens energianvändning med andra generationens teknik.	23
Figur 18. Andra generationens återvinningsdrivna sorptionsavfuktarens månatliga energianvändning.	24
Figur 19. Avfuktarens månatliga energianvändning i olika ishallar.....	24

1 Introduktion

1.1 Bakgrund och omfattning av NERIS-projektet

Projektnamnet NERIS är en initialförkortning på Nordicbuilt: Evaluation and Renovation of Ice halls and Swimming halls. NERIS leds av Institutionen för Bygghälsa på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm, Sverige. Finansiellt stöd har fått från Formas (Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande) och Energimyndigheten. Projektets syfte är att "föreslå metoder för att kunna inspektera och utvärdera funktionsdugligheten i dessa typer av byggnader samt redovisa olika renoveringsåtgärder som kan förbättra prestandan". Detta betyder att man önskar uppnå en informationsbank gällande fukthantering i ishallar och simhallar. NERIS-projektet gick av stapeln 2014 och kommer att slutföras 2018.

Denna rapport är den andra delen i en serie av fyra vars uppgift är att behandla fukt i ishallar. Tillsammans kommer de fyra rapporterna att analysera och förklara fuktens mekanismer i ishallsanläggningar. Inledningsvis kommer ishallstekniken att redogöras samt hur fuktproblematiken i en byggnad kan uppstå vid denna typ av applikation. Tanken är att därefter bygga en logisk ordning av rapporter i vilka fuktrelaterade utmaningar som fuktkällor och andra byggnadsfysikaliska egenskaper tillsammans med avfuktningssystemer samt deras energianvändningspåverkan beskrivs i ishallapplikationer. Målet är att de olika delarna i denna rapportserie ska kunna komplettera varandra samt kunna ge praktiska råd och instruktioner gällande dimensionering och planering av avfuktningssystem i ishallar.

1.2 Omfattning av NERIS – Del 2: Metoder och energianvändning för avfuktning i ishallar

Del 2 av NERIS kommer att behandla olika avfuktningssystemer i ishallar och dess funktion tillsammans med tekniska möjligheter och begränsningar. Ett intressant område är vilken energiform och inte minst hur mycket energi som avfuktningssystemet faktiskt använder. Från aktuella fältmätningar presenteras storleksordningen på energibehovet på säsongs och månadsbasis för olika ishallar.

Det omgivande klimatet är den faktor som rent intuitivt bör påverka avfuktningssystemet och därmed energianvändningen allra mest. Det finns som kommer att belysas här också andra faktorer som påverkar energianvändningen där det till exempel visar sig att styrprincipen också kan spela en avgörande roll. Denna diskussion inleddes i del 1 och kommer här att konkretiseras genom exempel från ishallar med olika styrprinciper och vilken skillnad det gör på energianvändningen. Man kan också illustrera och jämföra energianvändningen i olika anläggningar genom att ta fram sk energisignaturer. Detta är ett verktyg för att förstå hur anläggningar kan jämföras samt vilka faktorer som driver energianvändningen. Mekanismer som påverkar fukttransporten såsom luftläckage kommer att introduceras och studeras närmare i del 3.

2 Avfuktningsmetoder i en ishall

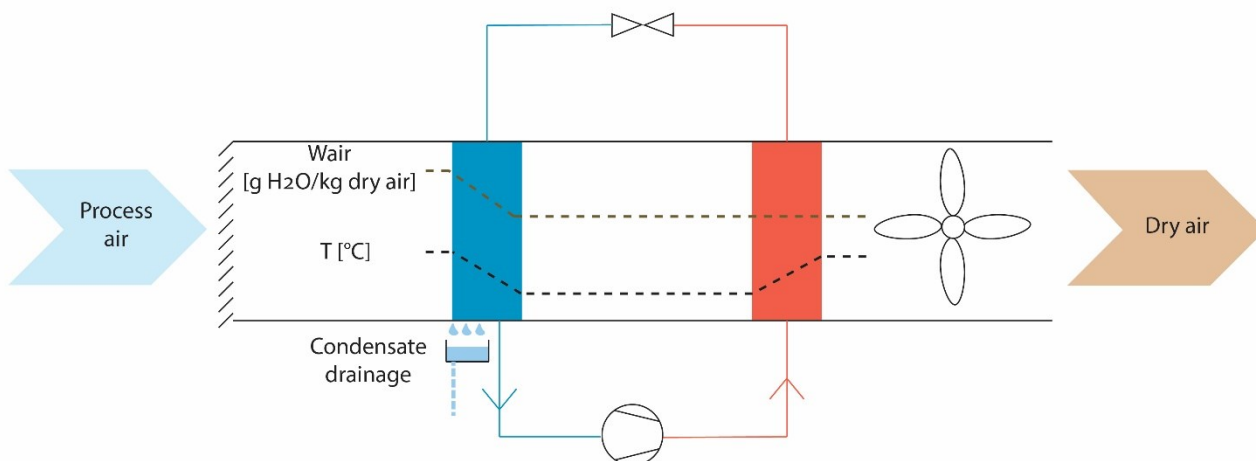
En avfuktarens uppgift är att minska mängden vattenånga i luften till en godtagbar nivå som bestäms av användaren. Den absoluta luftfuktigheten är normalt alltid högre vid avfuktarens inlopp än vid dess utlopp eftersom den tar bort fukt ur luften. Det finns olika sorters avfuktare och deras respektive teknik definieras av den fysikaliska process som tillämpas. I ishallar brukar avfuktare oftast använda sig av sorptions- eller kylteknik.

2.1 Kylavfuktning

När en yta har en temperatur lägre än luftens daggpunkt kommer vattenånga i luften att kondensera på ytan vid kontakt, vilket resulterar i att luften blir torrare. Kylavfuktare (eller kondensavfuktare) fungerar enligt denna princip, där en värmeväxlare med en kall yta "attraherar" luftens vattenånga. För att få till stånd den kalla ytan behövs ett kylsystem och därigenom ett kallt medium. Beroende på hur kylsystemen konfigureras kan dessa klassificeras som ett direkt eller indirekt system. Kylavfuktare är dock inte så vanliga i ishallar, då man har stött på tekniska utmaningar vad gäller deras tillämpning i de förhållanden som normalt förekommer i ishallar. Dessa utmaningar kommer att diskuteras senare i rapporten.

2.1.1 Direkt kylavfuktningssystem

Figur 1 visar principiellt hur en kylavfuktare med direkt expansion fungerar. Först fuktig luft (processluft in) förångaren, där vattenånga tas bort från luften via kondensationsprocessen. Sedan värms luften åter för att minimera belastningen på t ex ishallens uppvärmningssystem. För att eliminera behovet av extern värmekälla brukar kylsystemets kondensorvärme ofta användas för detta ändamål.

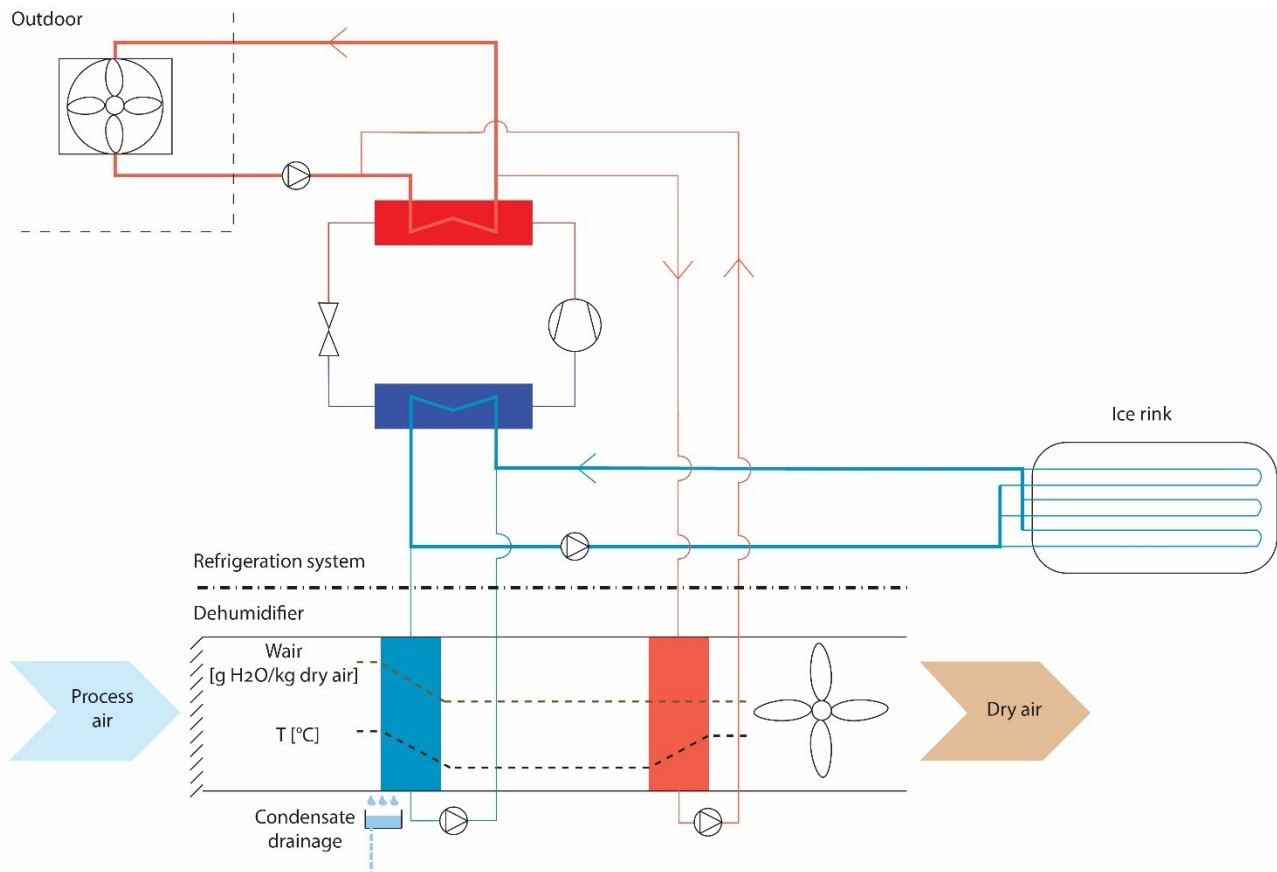


Figur 1. Principschema på kylavfuktare med direkt expansion.

2.1.2 Indirekt system

Indirekt kylavfuktning fungerar enligt samma princip som det direkta vad gäller den fysikaliska process som involverar luftens avfuktning. Däremot fungerar avfuktarens kyl- och värmeöverföring på ett annorlunda sätt. I Figur 2 ser man att en ishalls kylsystems köldbärarsida levererar den kyla som behövs för

avfuktningssprocessen, medan dess kylmedelsida levererar den värme som behövs för att återvärma den avfuktade luften. Frågan kan dock ställas huruvida detta är en kostnadseffektiv lösning, då det ökar kapacitetsbehovet på ishallens kylsystem med högre investeringskostnad som resultat. Orsaken till det ökade kapacitetsbehovet är att belastningarna på avfuktning och iskyla når sina respektive toppar samtidigt, dvs. då uteklimatet är som varmast och fuktigast, vilket betyder att kraven som ställs på kylmaskinen för att uppfylla båda behoven snarare staplar på varandra än kompletterar varandra.



Figur 2. Principskiss på indirekt kylavfuktare.

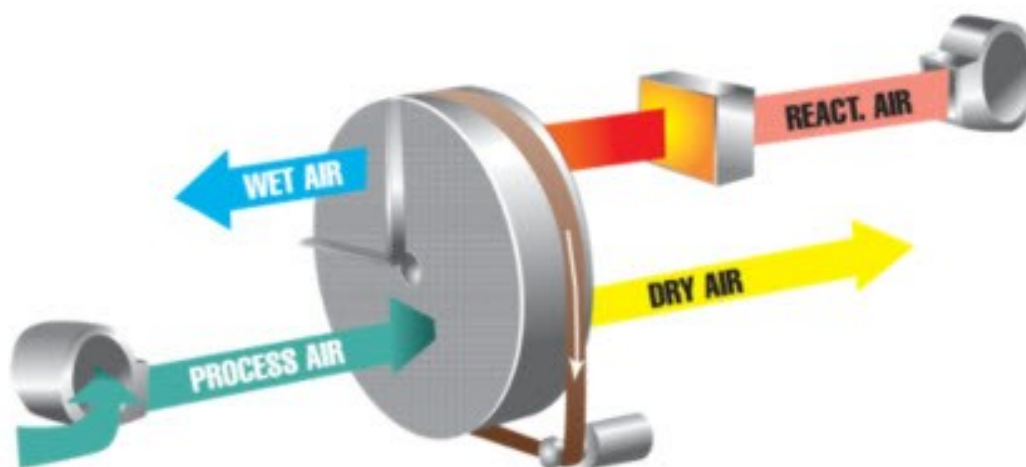
2.2 Sorptionsavfuktare

Sorptionsavfuktare tillämpar en teknik som grundar sig på fuktabsorberande material, dvs. material med kemiska egenskaper som gör att de kan absorbera fukt utan att involvera kondensering eller nedfrysning. Sorptionsavfuktare är idag de vanligaste avfuktarna man finner i ishallar, vilket mycket beror deras kapacitet och prestanda även vid låga daggnivåer. På bilden nedan ses en större sorptionsavfuktare i en svensk ishallsarena.



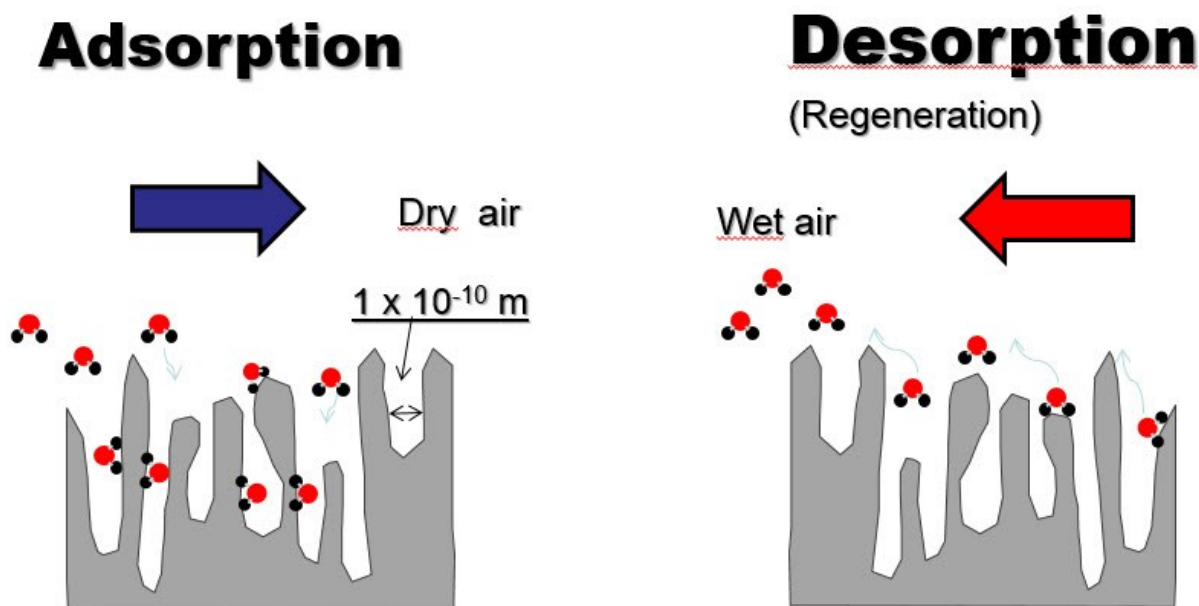
Figur 3. En större sorptionsavfuktare i en svensk arenaanläggning.

Den viktigaste delen i en sorptionsavfuktare är ett roterande sorptionshjul, den sk rotern. Stommen som rotern byggs av är glasfiber vilken utgörs av plana och ett veckade skikt. De veckade skikten är utformade så att många kanaler och en stor yta skapas där luft kan passera igenom. Idag används i större utsträckning silica gel som adsorberande skikt i rotorerna vilket gör att fukten på så vis "fastnar". Rotorn är ofta indelad i två åtskilda sektorer som separerar de två olika luftflöden ifrån varandra, se Figur 4. Ca 75% av hjulets area brukar bilda en sektor där fuktig luft (processluften) leds igenom och dess vatteninnehåll "fångas upp" av fuktabsorbenten, vilket resulterar i torr och något värmd luft som kan föras vidare till t ex ishallen. Hjulet roteras med hjälp av en drivmotor i en låg hastighet, vilket medför en i sammanhanget försumbar energianvändning. Med tiden blir fuktabsorbenten i denna sektor mättad och kan inte absorbera mer vattenånga. För att ta bort fukten från rotern låter man varm regenereringsluft blåsa igenom den återstående delen av hjulet, ca 25%, som bildar en egen sektor. I denna sektor höjer den varma regenereringsluften temperaturen på fuktabsorbenten, vilket förångar dess fuktinnehåll som sedan förs vidare ut i det fria. Det är rotern som bestämmer kapaciteten och livslängden för avfuktaraggregatet och är således en nyckelkomponent i systemet.



Figur 4. Sorptionsavfuktarens arbetsprincip.

Tack vare den fysikaliska process som denna teknik tillämpar kan sorptionsavfuktare arbeta effektivt, dvs med god kapacitet, även vid mycket låga daggpunktsnivåer, under 0°C, utan risk för frostbildning, vilket inte är möjligt med kylavfuktare. Vidare sjunker även kraven på luftflödet som behövs för processen. Största delen av sorptionsavfuktarens energianvändning går till uppvärmningen av dess regenereringsluft, vilket betyder att den mest signifikanta besparingspotentialen finns här. En potentiell lösning är att använda sig av avgiven värme från ishallens kylsystem, som annars släpps ut i omgivningen ifall den inte återanvänds som värmekälla till något annat. Dock måste värmen vara av tillräckligt hög temperaturnivå för att kunna användas i avfuktningsprocessen, vilket gör det till en utmaning att värma regenereringsluften endast med återvunnen värme från kylsystemet.



Figur 5. Illustration av adsorption och desorption i mikroskala (Fuktkontroll).

Som ett litet fördjupande tillägg till sorptionsprocessens funktion så illustreras i figuren ovan hur fukten (vattenmolekylerna) "fångas" (adsorberas) av rotorns ytskikt. Som tidigare beskrivet så leder detta till att den inkommande processluften torkas. För att i nästa läge, under regenereringen, på motsvarande sätt driva ut fukten (desorption) ur materialet så värms ytskiktet genom att varm luft får passera över rotorns yta. När temperaturen ökar i materialet (silica gel) så "släpper" vattenmolekylerna och följer med regenereringsluften ut till omgivningen.

3 Avfuktningssystemets energianvändning

Avfuktningssystemet är ett av de s.k. "big five" energisystemen i en ishall och står för ungefär 5-15% av den totala energianvändningen. Dess andel underskattas dock ofta eftersom avfuktarens kapacitet i många fall är otillräcklig. Detta brukar resultera i att vidare avfuktning snarare uppnås via ishallens kylsystem eftersom vattenånga i luften i större utsträckning kondenserar på isytan, vilket inte är optimalt då det höjer belastningen på kylsystemet i onödan. Å andra sidan kan en bristfällig kontrollstrategi också resultera i att avfuktaren är igång då den inte behövs, vilket leder till energislöseri. Avfuktaren ska därför användas ändamålsenligt och endast vid behov.

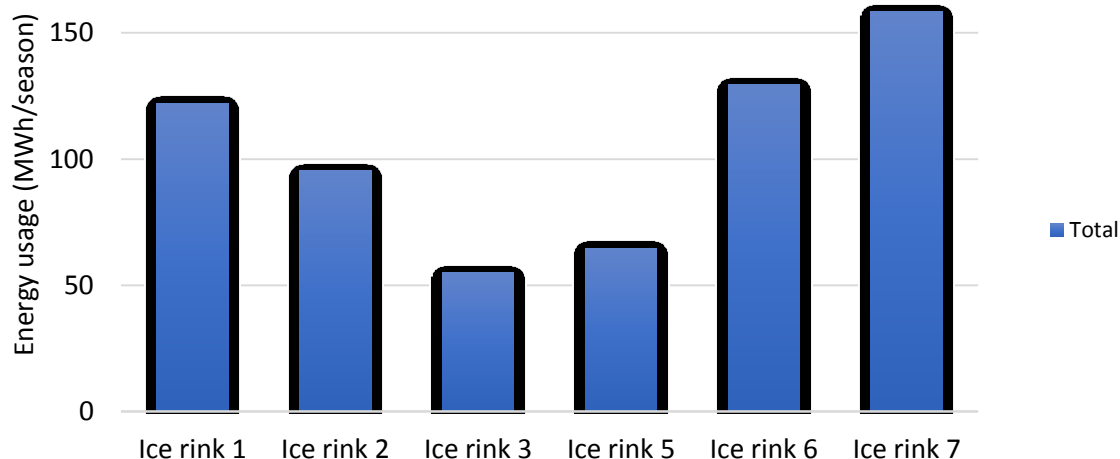
3.1 Kylavfuktarens prestanda

Att åstadkomma tillräckligt torr luft i en ishall med kylavfuktare har visat sig vara svårt och därför används normalt sorptionsavfuktare. Nedan förklaras problemen med att använda kylavfuktare i ishallar.

För att undvika kondensproblem på isytan och ishallens strukturer, bör daggpunkten i ishallens arenarum hållas mellan 0°C och högst 2°C. I praktiken betyder detta att ytemperaturen på värmeväxlaren i en kylavfuktare måste vara under eller betydligt under 0°C. Detta leder till frostbildning vilket orsakar höga tryckfall i värmeväxlaren, och till sist behövs avfrostning för att åter kunna få igång luftflödet. En klassisk lösning har varit att använda hetgas från kylsystemets varma sida för att avfrosta värmeväxlaren, vilket betyder att avfuktningsprocessen avbryts under tiden. Även om det tekniskt sett är möjligt att nå daggpunktsnivåer under 0°C med en kylavfuktare, kommer dess energieffektivitet starkt att lida av det kontinuerliga avfrostningsbehovet. En daggpunkt på ca 5°C anses vara gränsen för en någotsånär effektiv drift hos en kylavfuktare, ifall denna daggpunktsgrens underskrids kan luften inte avfuktas effektivt till rekommenderad nivå. Vidare ökar behovet av luftflöde ifall fuktnivån på processluften till ishallen inte kan sänkas tillräckligt, vilket i sin tur ökar fläktarnas energianvändning. På det hela taget så leder kylavfuktning praktiskt sett till något för höga fuktnivåer och den sammanlagda energianvändningen för processen blir relativt hög. För tillfället inskränker vi diskussionen till denna slutsats men frågan kommer att hanteras i följande rapporter.

3.2 Sorptionsavfuktarens årliga energianvändning

I den första delrapporten av NERIS-projektet analyserades inneklimatet i åtta ishallar i Stockholmsregionen under säsongen 2015–2016 (samtliga med omkring åtta månaders säsong), samt avfuktningssystemets energianvändning per säsong som visas i Figur 6. Som synes finns det variationer i energianvändningen vilket kan bero på fuktbelastningen, kontrollstrategin eller säsonglängden. Det går dock inte endast på basis av Figur 6 att avgöra hur stor inverkan respektive faktor har på energianvändningen. Eftersom man vet att de analyserade ishallarna har isolerade klimatskal, och att de är av liknande storlek och byggda för liknande syften, visar Figur 6 att summan av faktorerna ändå kan påverka en ishalls energieffektivitet på en märkbar nivå eftersom avfuktningssystemets energianvändning i de olika ishallarna ligger i ett så brett intervall som mellan 55 och 158 MWh per säsong.

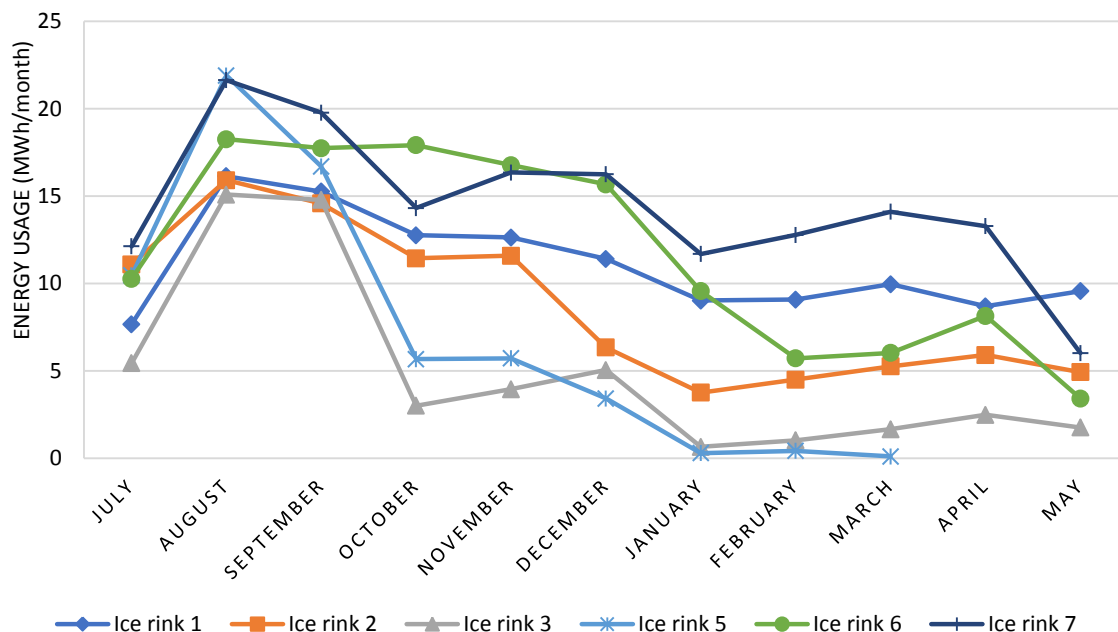


Figur 6. Avfuktningssystemets energianvändning i analyserade ishallar.

3.3 Variationer under säsongen

Luftläckage visar sig vara den överlägset största fuktkällan där läckor i klimatskalet gör att uteluft kommer in i ishallen p.g.a. skillnaderna i lufttryck inne och ute. De geografiska förutsättningarna kommer således att påverka avfuktningens behovet i stor utsträckning. I del 1 i NERIS-projektet analyserades klimatförhållandena i tre städer i Sverige, där det månatliga medelvärdet på ångkvoten i Stockholm noterades variera mellan 2,5 och 9,0 g H₂O per kg torr luft, vilket betyder att dagpunkten typiskt varierar mellan -5°C och 12°C under året. Många ishallar hålls numera i drift från 8 och upp till 12 månader per år, vilket tyder på att variationerna i avfuktningssystemets energianvändning under säsongen kan vara stora.

Figur 7 visar avfuktningssystemets månatliga energianvändning i olika ishallar. Även om skillnaderna ishallarna emellan kan vara stora så ser man att de alla följer en liknande trend, dvs. att energianvändningens topp sker i början av säsongen då uteluften är fuktig och att energianvändningen sjunker i takt med att uteluften blir torrare. De flesta av hallarna sätts igång i spannet juli/augusti och stängs i spannet mars/maj. Att det finns en "uppförsbacke mellan juli och augusti beror på att de flesta startas upp i slutet av juli och då kommer endast en del av månadens potentiella energianvändning för avfuktning med. Av samma skäl "dyker" till synes några anläggningar i slutet av säsongen men det förklaras av att de inte är i drift i hela april eller maj. Något som bidrar till att hålla upp nivåerna i slutet av säsongen är att man ofta låter avfuktarna fortsätta arbeta för att torka upp vid smältning av isen. Rent teoretiskt, med ledning av fukthinnehållet i luften som redovisas i Neris 1, så har man i allmänhet ett minimum i omgivningens fukthinnehåll under januari/februari varefter det ökar igen. Detta borde leda till ett minimum i energianvändning för dessa månader och att det sedan börjar öka igen. För några av anläggningarna i figuren nedan så kan denna trend skönjas.



Figur 7. Avfuktningssystemets månatliga energianvändning i olika ishallar.

Kylbehovet i ishallar har i flera studier observerats vara kopplat, på sätt att det ökar, med ökande utomhustemperatur. Detta betyder att en stigande utetemperatur höjer både kylbehovet och avfuktningens behov. Figur 7 styrker argument att avfuktningens behov ökar och bekräftar därigenom det som tidigare nämnts att indirekta kylavfuktningssystem inte lämpar sig så väl för ishallsbruk. Konsekvensen blir att avfuktningssystemet adderar belastning till ett redan högt kylkapacitetsbehov till isen. Anläggningens kylsystem måste därför täcka båda behoven när de samtidigt når sina respektive toppar. I förlängningen leder det också till större värmeavgivning från kylsystemet när den behövs som minst, vilket gör att det är svårt att få nytta av värmen från ett eventuellt värmeåtervinningssystem.

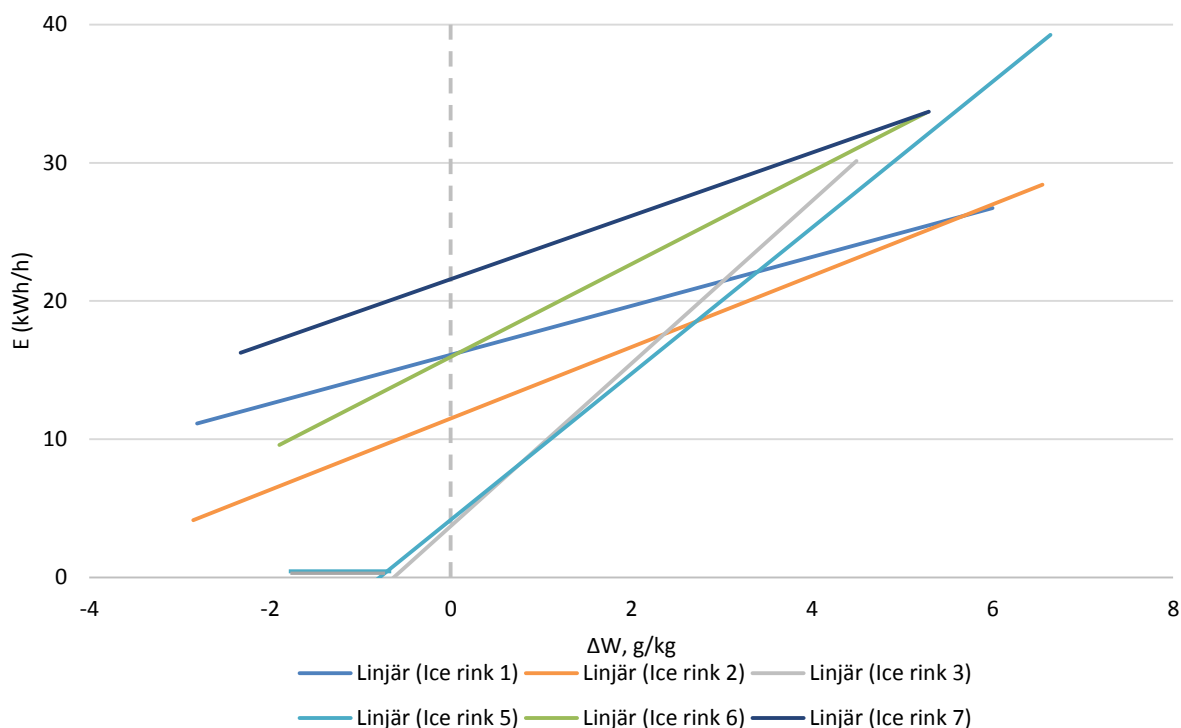
3.4 Avfuktningssystemets energisignatur

Ett klimatskal separerar klimatförhållanden med olika luftegenskaper från varandra, dock är komplett avskiljning i praktiken aldrig möjlig. Den huvudsakliga drivkraften bakom läckage-luftflödet är temperaturdifferensen vilken i sin tur bidrar till en tryckdifferens i byggnaden. Detta fenomen kommer att utvecklas i kommande delar av Neris-projektet. En användbar och viktig parameter som NERIS-projektet använder sig av för att visa på fukttransport är den sk ångkvoten. Omgivande luft av högre temperatur har ofta naturligt ett högre fuktt innehåll så man skulle kunna uttrycka det som att ångkvoten är proportionell mot lufttemperaturen. Till detta kommer att fukt rör sig i riktning mot den lägsta ångkvoten – analogt med värme som transporteras från högre till lägre temperatur. Relativ luftfuktighet, som idag fortfarande används i stor utsträckning för att beskriva fuktnivå, kan inte användas i detta syfte. I bostäder, kontor och andra typiska inneklimat brukar fukt oftast röra sig från inneklimatet mot uteklimatet, medan det i ishallar för det mesta är tvärtom då uteluften oftast bär på mer fukt än ineluften. Denna typ av fuktnivåskillnad kan kallas ångkvotsdifferensen och kan beräknas enligt följande formel:

$$\Delta W = W_{ut} - W_{in}$$

Tillgängliga data från ishallar har använts för att beräkna deras respektive ångkvotsdifferenser, som i Figur 8 i jämförelse med avfuktningssystemets energianvändning i respektive ishall. De linjära trendlinjerna visar alla

liknande mönster, där en högre ångkvotsdifferens leder till ett ökat avfuktningsbehov. Detta bekräftar än en gång att uteklimatet är en signifikant fuktkälla som belastar avfuktningssystemet.

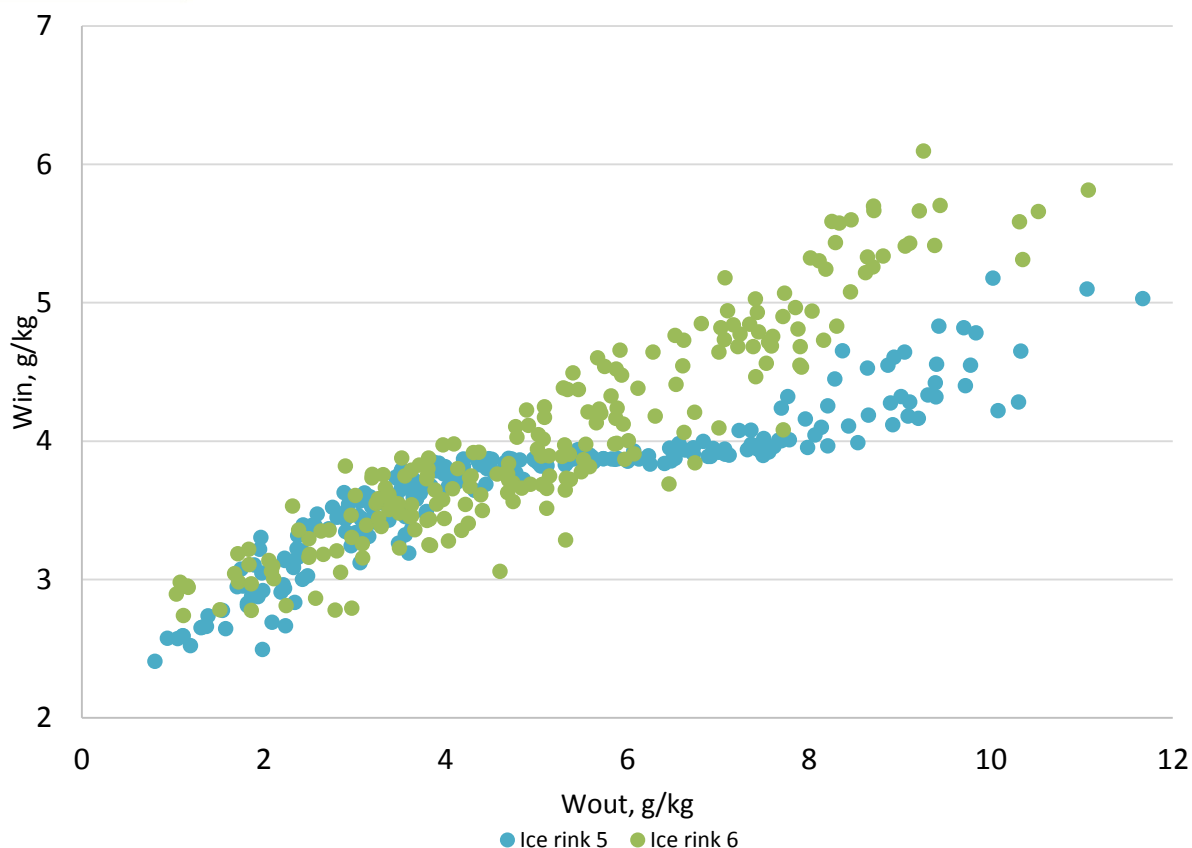


Figur 8. Avfuktningssystemets energianvändning i förhållande till ångkvotsdifferensen.

Teoretiskt sett har uteluften en ångkvot som är acceptabel för inneklimatet då ångkvotsdifferensen ligger vid noll, eftersom det då inte finns ett märkbart fuktutbyte mellan de olika klimatförhållandena. Detta betyder att luftläckage inte längre är en fuktkälla för ishallen och att återstående fuktkällor endast borde vara interna i så fall (t.ex. användare, publik, mm). Ifall uteluften är torrare än inneluften blir ångkvotsdifferensen negativ, vilket vänder på fuktutbytets riktning och i samband med detta avfuktas inomhusluften delvis via en naturlig process av luftläckage eller ventilation. I Figur 8 kan man se att avfuktningssystemen i ishallarna 1, 2, 6 och 7 använder 5 - 22 kWh i medeltal per timme trots en negativ ångkvotsdifferens, vilket tyder på att det antingen finns interna fuktkällor och/eller en bristfällig kontrollstrategi som fortfarande håller avfuktaren i drift. Ishallarna 3 och 5 visar mycket lägre aktivitet i avfuktningssystemet på den negativa sidan, samt att avfuktaren tas ur drift när den negativa differensen nått en viss gräns. Detta tyder på att fukt från interna källor förs ut via det naturliga luft-/fuktutbytet och att avfuktaren då inte behövs. I ishall 5 styrs avfuktaren enligt absolut luftfuktighet, vilket undviker risken för att "övertorka" ishallsutrymmet vilket annars ger ett onödigt bidrag till energianvändningen.

Exakt hur stor inverkan interna fuktkällor har på energisignaturen är fortfarande oklart då det inte kan avgöras huruvida en negativ ångkvotsdifferens endast representerar belastningen från interna fuktkällor eller ifall också en bristfällig kontrollstrategi spelar en roll. Detta kommer diskuteras vidare nedan.

Frågan uppstår dessutom hur nödvändigt det verkligen är att driva en avfuktare vid negativ ångkvotsdifferens. För att undersöka den frågan vidare illustrerar Figur 9 ångkvotsförhållandet mellan inne- och uteluften i två ishallar.



Figur 9. Ångkvotsförhållandet mellan inne- och uteluften i två ishallar.

Då man studerar inneluftens ångkvot (W_{in}) ser man att ishallarna följer ett liknande mönster upp till omkring 4 g vatten per kg torr luft. Efter det bibehåller avfuktaren i ishall 5 en mer eller mindre konstant nivå fram till den punkten då kapaciteten inte längre räcker till för att effektivt ta bort de höga fuktmängderna från uteluften. Vidare så hjälper Figur 8 också till att indikera huruvida interna fuktkällor spelar en stor roll för energisignaturen vid en negativ ångkvotsdifferens. Den negativa ångkvotsdifferensen tar slut vid omkring 3,8 g vatten per kg luft i Figur 9. Fram till denna punkt har båda ishallarna ett mycket liknande mönster vad gäller ångkvotsförhållandena. Dock kan man i dessa förhållanden observera skillnader driften av respektive ishalls avfuktare, där den i ishall 5 i praktiken står still och i ishall 6 är igång med en eleffekt högre än 10 kW i snitt.

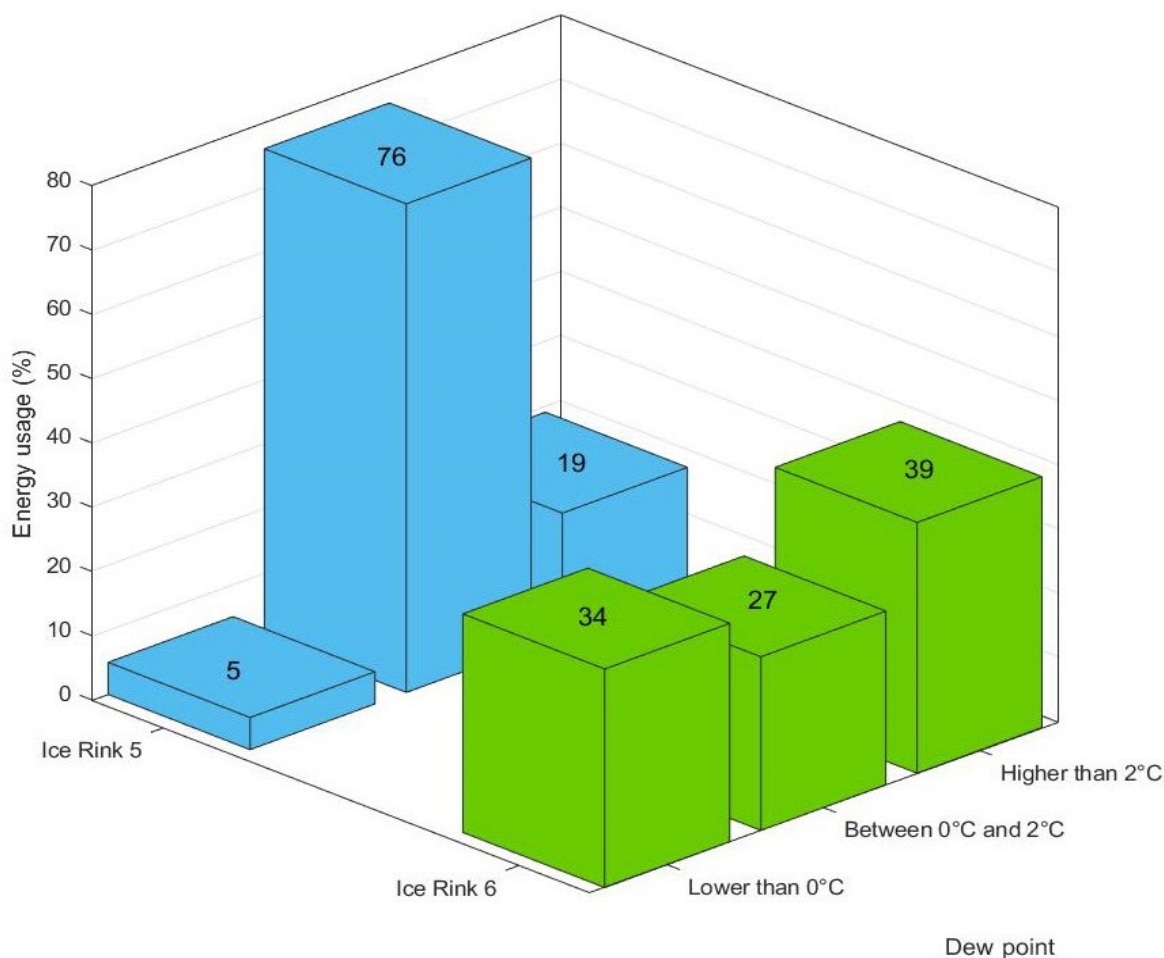
Om en acceptabel ångkvot har uppnåtts inne i ishallen under dessa uteklimatsförhållanden borde det inte finnas någon anledning att fortsätta köra avfuktaren eftersom "den naturliga luftläckageprocessen" kan sköta jobbet istället. Framförallt Figur 8 ovan illustrerar på ett mycket tydligt sätt hur principen för fuktstyrningen påverkar energianvändningen. Ishall 6 fortsätter att använda energi trots att "fuktmålet" är uppnått dvs den övertorkar således luften till ingen nytta. Ishall 5 som styrs på fuktkvoten (alt. daggpunkt) slutar att gå vid en negativ fuktkvotsdifferens om ca 0.5 g vatten per kg luft.

3.5 Energianvändning för olika styrprinciper

Korrekt styrning av fuktnivån är som konstaterats viktigt för att kunna åstadkomma god iskvalitet och ett hälsosamt inneklimat i byggnaden. När luftens fuktighet i ishallar diskuteras så utgår man, som tidigare konstaterats, ofta från att den relativa luftfuktigheten. Problemet är att den varierar med lufttemperaturen, som i sin tur ofta varierar under säsongen i ishallar. Därför bör luftfuktigheten diskuteras i "absoluta termer" för att få rätt bild. Detta kan också göras genom att använda begreppet "daggpunkt".

Det visar sig av skäl, som här ska diskuteras vidare, att daggpunkten i en ishall bör vara någonstans mellan 0°C och ca 2°C. Är daggpunkten lägre än 0°C så ökar fuktbelastningen av att t ex läggvattnet förångas i större utsträckning. Om å andra sidan daggpunkten är högre än ca 2°C så ökar risken för oönskad kondens på sarg och andra byggnadsdelar som framförallt kyla av isen. Kondensen på sargen skapar ispåväxt som i sin tur gör att isen måste "knackas" bort vilket skapar mycket extraarbete.

Figur 10 illustrerar avfuktarens energianvändning i ishall 5 och 6, som också använts i exemplen ovan, vid tre olika inneklimatsförhållanden med avseende på daggpunktsnivå: torrt (daggpunkt lägre än 0°C), nominellt (mellan 0°C och 2°C) och vått (över 2°C).



Figur 10. Avfuktarens energianvändning i % av total årlig energi i förhållande till daggpunkten.

Driften av avfuktaren i ishall 5 sker huvudsakligen vid "nominella", dvs önskade förhållanden, vilket förklaras av att den tillämpade kontrollstrategin som baserar sig på reglering mot den absoluta

luftfuktigheten. Endast 5% av driften (ca 3 MWh) sker i torra förhållanden vilket beror på interna fuktkällor, eftersom största delen ineluften därefter avfuktas via luftläckage till den torrare uteluften, samt att avfuktaren inte används vid lägre fukthalter. I Figur 9 kunde det noteras att avfuktarens kapacitet inte räckte till då ångkvoten utomhus når höga nivåer och i Figur 10 ser man att 19% av drivenergin används under dessa, dvs. "våta" förhållanden. Detta illustrerar behovet av något högre avfuktningskapacitet i anläggningen även om den befintliga kapaciteten räcker till under största delen av året.

Ishall 6 uppvisar märkbart annorlunda resultat i Figur 10. Avfuktarens energianvändning är relativt sett minst under nominella förhållanden (dvs när daggpunkten är 0-2°C), vilket kan leda till fuktproblem även om avfuktaren är i drift. Den är således i drift men arbetar med för låg kapacitet, dvs den borde styras mot en lägre daggpunkt än den i praktiken gör. Hög energianvändning under fuktiga förhållanden skulle kunna indikera bristfällig kapacitet, men eftersom energianvändningen även är hög under torra förhållanden är det snarare frågan om det energislöseri som uppstår p.g.a. kontrollstrategin baserad på relativ luftfuktighet. Relativt sett så använder avfuktaren i ishall 6 34% av sin årliga energianvändning i onödan – dvs den övertorkar luften pga felaktig styrprincip. I absoluta termer är avfuktarens "onödiga" energianvändning ca 34% av 129 MWh (se Figur 6) = 44 MWh.

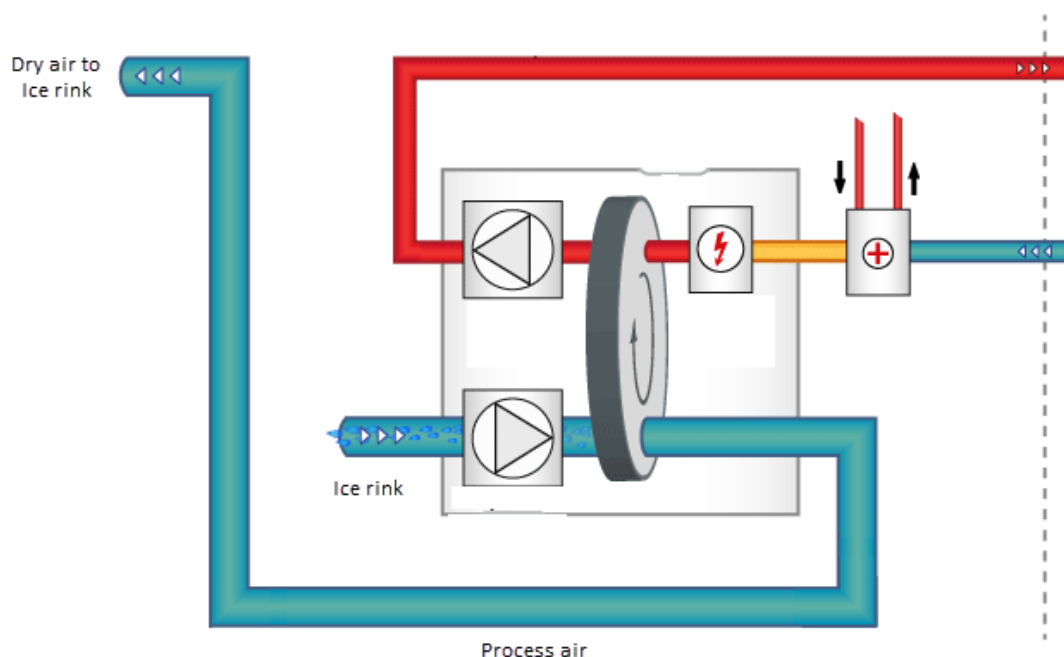
Med denna kunskap och kännedom om att befintliga styrsystemen ofta går att ställa om till rätt styrprincip så framstår besparingen som "en lågt hängande frukt", dvs med minimal investering kan en relativt stor besparing göras. Även om en ny styrenhet skulle behövas så är det i sammanhanget en liten investering att göra uppgradering.

4 Energibesparingsåtgärder

Enligt resonemanget ovan så har sorptionsavfuktning visat sig normalt vara den teknik som är bäst lämpad för ishallar. Tekniken kan avfukta luft till mycket låga daggpunktsnivåer (i °C) utan tekniska problem och dessutom leder det till ett mindre luftflöde i jämförelse med kylavfuktning. Största delen av en sorptionsavfuktarens energianvändning går till uppvärmningen av dess regenereringsluft, vilket betyder att den mest signifikanta besparingspotentialen också kan uppnås här. Dock måste uppvärmningen uppnå en tillräckligt hög temperaturnivå, ofta omkring 110°C, vilket är utmanande om man tittar på alternativa värmekällor som vanligen har låg temperatur. Det som kan vara av stort potentiellt intresse i en ishall är möjligheten att användas återvunnen värme och nedan ska vi titta på ett par olika alternativ för att göra just detta.

4.1 Generation 1 – hybridvärmning med återvinning

En sorptionsavfuktare kan använda sig av vilken tillgänglig värmekälla som helst som kan leverera den efterfrågade kapaciteten på rätt temperaturnivå. I Sverige används oftast elvärme till detta syfte, medan det i andra länder kan vara naturgas som är värmekällan. I en ishall där kylsystemet avger värme på 60°C har man försökt utnyttja denna värme enligt principerna illustrerade i Figur 11 där regenereringsluften tas från omgivningen. För minska belastningen (effektbehovet) på elvärmaren används här återvunnen värme från kylsystemet till att förvärma regenereringsluften.



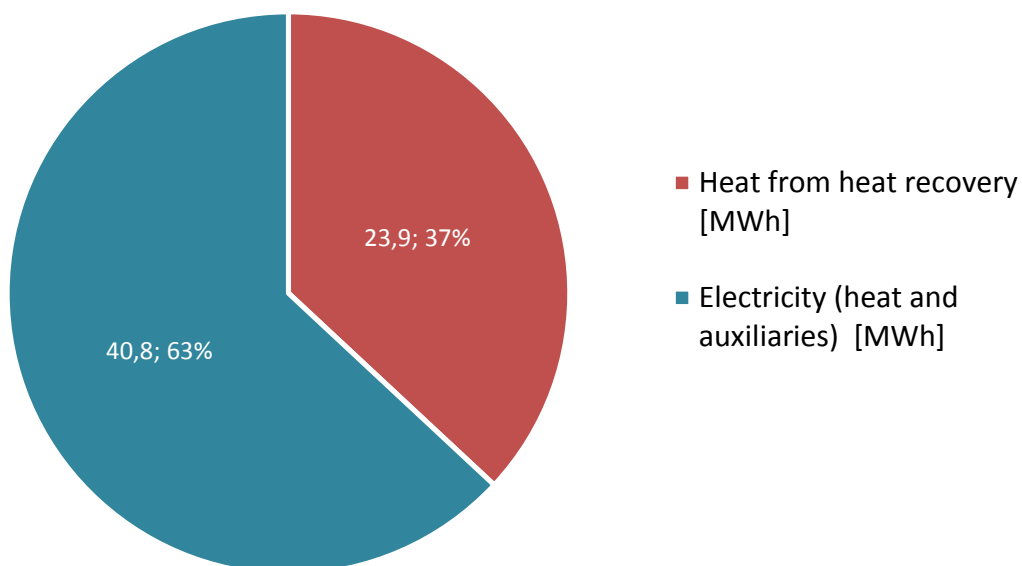
Figur 11. Arbetsprincipen för första generationens sorptionsavfuktare med återvinningsvärmning.

Den extra hårdvaran som krävs är en värmeväxlare med anslutning till kylsystemets värmeåtervinningssystem. Figur 12 visar avfuktaren och dess förvärmningsfunktion som är en relativt liten enhet. Elvärmaren är installerad i själva avfuktaren, medan värmeåtervinningskopplingen är en option som i det här fallet kan installeras utanför avfuktarenheten. Istället för återvunnen värme är det också möjligt att använda fjärrvärme eller vilken annan värmekälla som helst som kompletterande värmekälla.



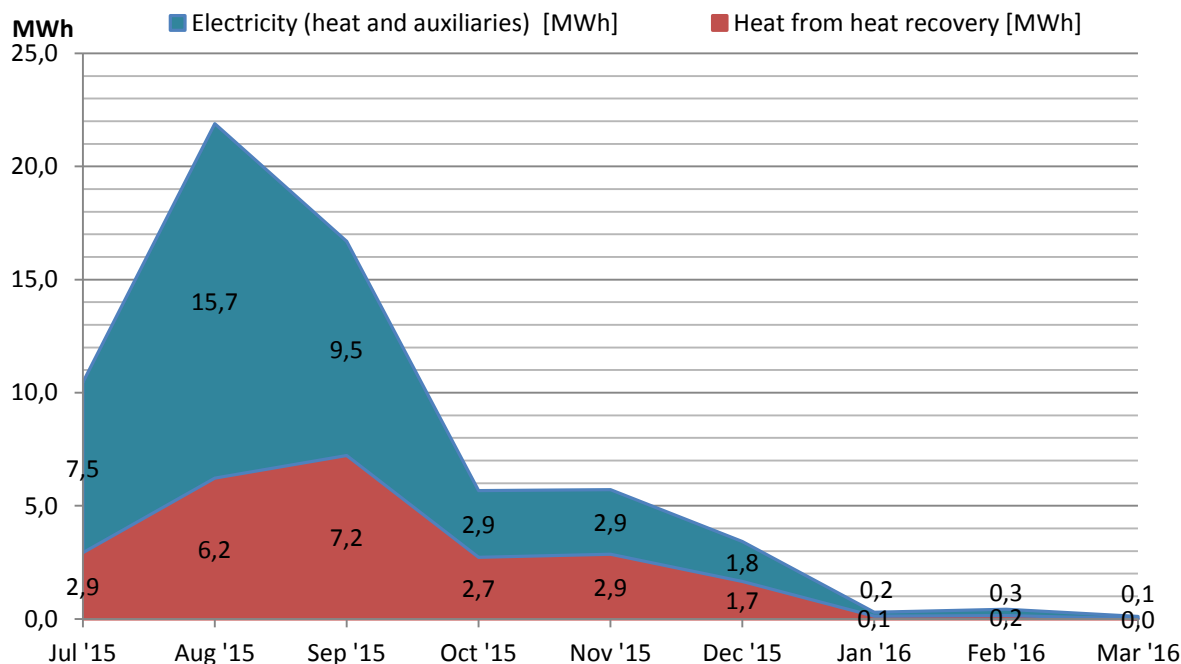
Figur 12. Första generationens hybridavfuktare (TV) - anslutningen till värmeåtervinningen (TH).

Energibesparingen hänger främst på hur hög temperaturnivå förvärmningen kan uppnå, vilket då leder till att mindre värmeeffekt behöver tillföras med elvärmaren för att höja temperaturen till den efterfrågade nivån. I detta fall höjer förvärmaren luftens temperatur från utomhusnivå till omkring 55°C, medan elvärmaren står för resten där temperaturen då höjs från 55°C till maximalt 110°C. Fördelningen mellan använd återvunnen värme och el vid drift av avfuktaren för denna installation syns i Figur 13. Resultaten visar att nästan 40% elenergi kan sparas i denna typ av avfuktarlösning då man använder återvunnen värme som annars skulle släppts ut till uteluften via kylsystemets värmeavgivningssystem.



Figur 13. Avfuktarens energianvändning - första generationens återvinningsteknik.

Den månatliga energianvändningen för installationen ovan kan studeras i Figur 14. I början av säsongen, då uteluften är varmare/fuktigare, är elanvändningen mer än dubbelt så hög som mängden återvunnen värme, medan fördelningen mellan dem båda blir alltmer jämn då uteluften blir svalare. Detta beror på att den värmeeffekt man kan ta ut från återvinningssystemet ökar då omgivningstemperaturen sjunker, dvs temperaturdifferensen ökar i återvinningsväxlaren.



Figur 14. Avfuktarens månatliga energianvändning i ishall 5.

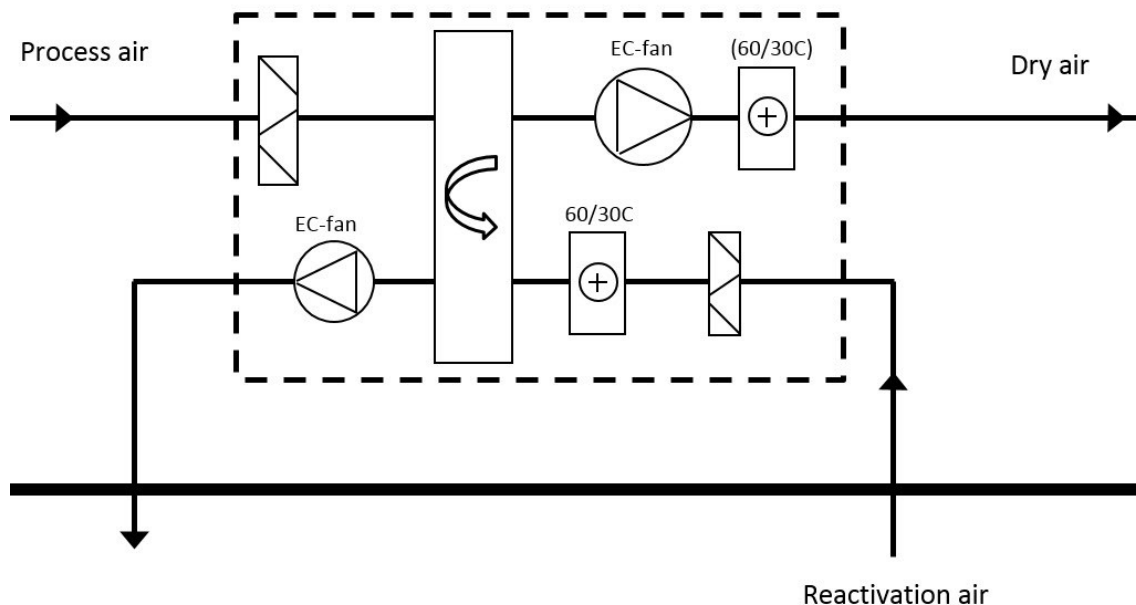
När, senare på säsongen, avfuktningsbehovet minskar med lägre fukthalter i omgivningsluften så ökar återvinningsens relativa andel av energitillförseln, även om det absoluta tillskottet också gradvis sjunker till dess avfuktaren i princip inte används mer.

4.2 Generation 2 – fullständig regenerering med återvunnen värme

Den första generationens begränsningar är kopplade till temperaturnivån på den återvunna värmen. För att göra avfukningssystemet mindre beroende av en kompletterande värmare, vore en lösning att styra kylsystemet så att temperaturnivån på dess avgivna värme blir högre. Dock skulle detta sänka kylsystemets energieffektivitet till en nivå där dess förluster skulle bli högre än de potentiella vinsterna man skulle uppnå i en effektivare avfuktningsprocess. Det finns således en teknisk och ekonomisk gräns för hur hög temperatur man kan ta ut ur ett värmeåtervinningssystem.

En annan möjlighet är att öka rotorns area, med dess fuktabsorbent, så att regenereringsluften får jobba mot en större aktiv yta, men samtidigt med en mindre temperaturdifferens mellan värmande luft och rotor. Detta gör det möjligt att åstadkomma en tillräcklig avfuktningskapacitet med värme av lägre temperaturnivå. Ett avfukningssystem har utvecklades enligt denna princip och finns illustrerat i Figur 15. Målet var att täcka avfuktarens värmebehov endast med återvunnen värme från kylsystemet. I en traditionell sorptionsavfuktare passerar regenereringsluften genom en fjärdedel av rotorns yta, medan

resten används av processluften. I detta fall har fördelningen ändrats till 50/50 medan som ovan antytts den totala adsorberande arean har utökats.



Figur 15. Arbetsprincipen i andra generationens sorptionsavfuktare driven med återvinningsvärme (Fuktkontroll).

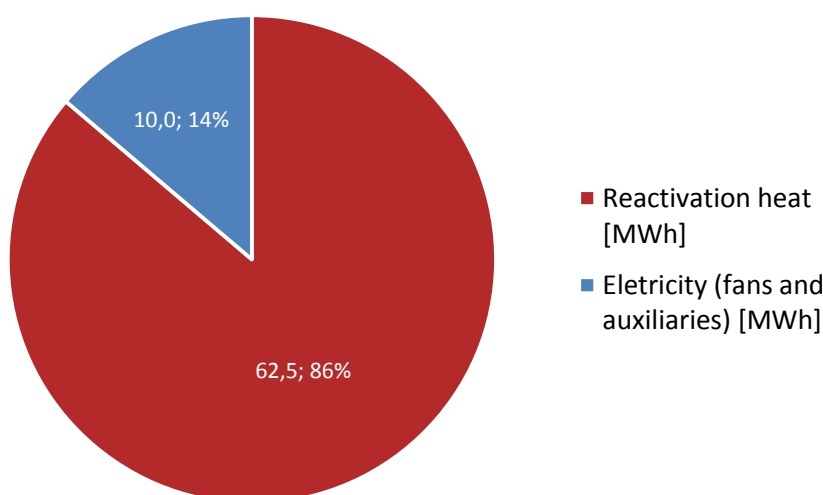
Eftersom en lägre temperaturnivå används till värmeregenerering så blir processluftens fuktnivå inte lika låg som i de fall högre temperaturer används. I klassiska sorptionsavfuktare kan ångkvoten bli näst intill 0 g vatten per kg torr luft, dvs. i princip fullständigt torr luft, medan man i den andra generationens sorptionsavfuktare kan notera att motsvarande siffra är omkring 2 g vatten per kg torr luft. Därför behövs något högre luftflöden för att åstadkomma samma fuktnivåer i ishallen, vilket i sin tur leder till något högre fläkteffekter.



Figur 16. Andra generationens värmeåtervinningsregenererade avfuktare.

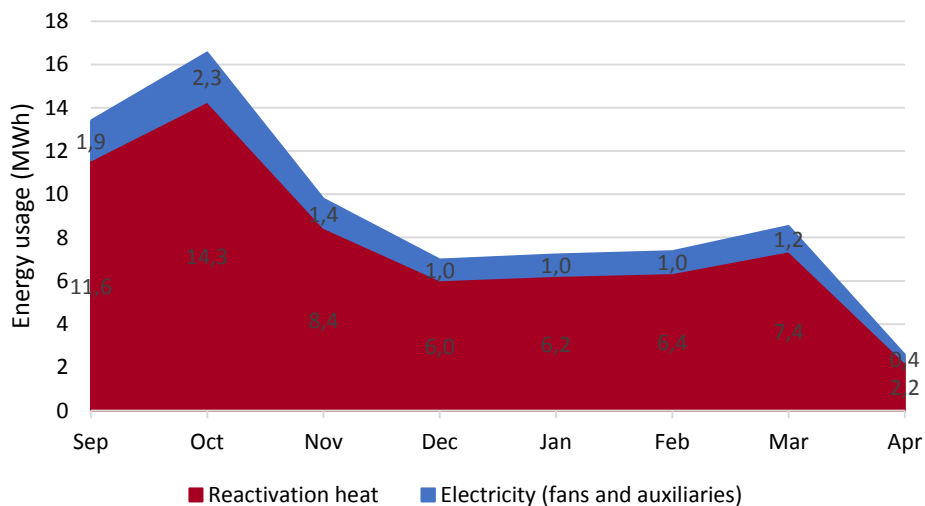
Denna uppostring i form av högre fläkteffekter görs för att kunna täcka avfuktningens värmebehov med endast återvunnen värme från kylsystemet. Detta betyder samtidigt att en balans mellan rotorns storlek och värmeåtervinningens avfuktningsskapacitet måste hittas. I gengäld har leverantörerna i större grad börjat kapacitetsreglera de ingående fläktarna vilket i någon mån kompenserar för ökat behov av luftflöde och i sin tur distributionseffekter.

Fördelningen av avfuktarens energianvändning med andra generationens teknik syns för en specifik installation i Figur 17. I detta fall avser energidata resultaten för en hel säsong. Resultaten visar att en satsning på högre fläkteffekter trots allt ger en bra besparing, då huvuddelen av energianvändningen fortfarande täcks av återvunnen värme, som dessutom är nära "gratis" eller i alla fall mycket billig. Det ska tilläggas att systemet som syns på bilden ovan inte har "intern återvinning", vilket är en option som kan läggas till för att internt i maskinen återvinna en del av värmen i våtluft till den inkommande regenereringsluften. Vinsten med en intern återvinning är att värmebehovet kan minskas med ca 40%, vilket kan vara intressant om man har avsättning för en stor mängd (all) återvunnen värme.



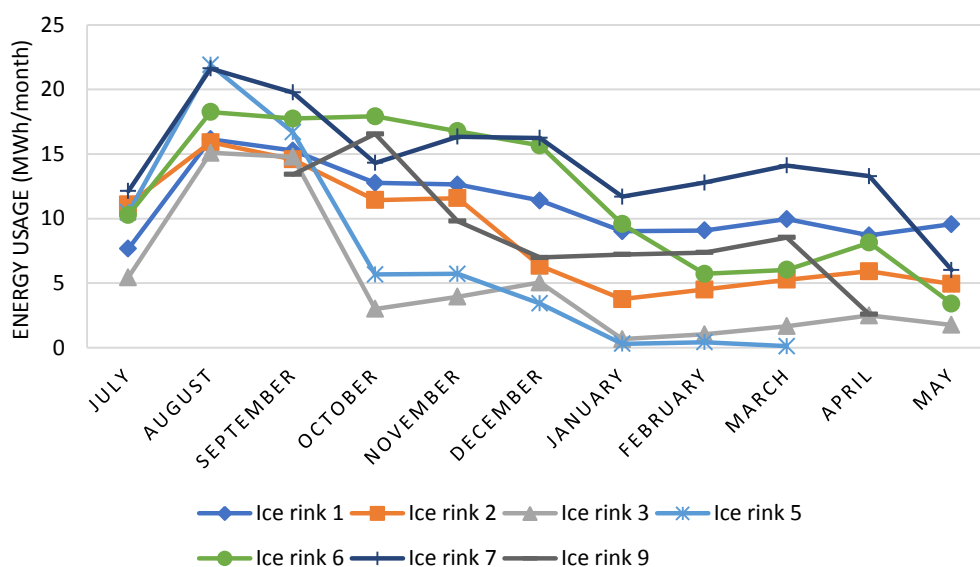
Figur 17. Fördelningen av avfuktarens energianvändning med andra generationens teknik.

När det gäller mängden avgiven värme från ishallens kylsystem under säsongen, så kan man konstatera att mer värme avges då utetemperaturen är högre, vilket normalt sett brukar vara vid början av issäsongen. Hur mycket värme som finns tillgängligt under olika förhållanden diskuteras vidare i referensen Rogstam et al 2015. Figur 18 visar den andra generationens återvinningsdrivna sorptionsavfuktarens månatliga energianvändning, där det kan noteras att mängden återvunnen värme räcker till under hela säsongen för att täcka avfuktarens värmebehov. Elanvändningen rör sig på en nivå som är storleksordningen 16% av totalt tillförs energi, medan värmen uppenbarligen utgör resten dvs ca 84%.



Figur 18. Andra generationens återvinningsdrivna sorptionsavfuktarens månatliga energianvändning.

För att få en uppfattning om hur väl denna avfuktningsteknik energimässigt presterar i förhållande till andra traditionella avfuktare, så jämförs avfuktningssystemens energianvändning i olika ishallar i Figur 19, där ishall 9 använder sig av andra generationens återvinnings-sorptionsavfuktare. Även om det i detta fall är olika säsonger som jämförs så bör resultaten vara principiellt jämförbara. Det visar sig att andra generationens teknik som väntat inte minskar avfuktningens totala energianvändning. Däremot kommer besparingen genom att den återvunna värmen från kylsystemet i denna systemlösning är ”nära gratis”.



Figur 19. Avfuktarens månatliga energianvändning i olika ishallar.

Kostnaden för återvunnen värme är ett eget kapitel som den intresserade läsaren kan fördjupa sig igenom Bolteau et al 2016. För att göra en lång historia kort så kan det sägas att om anläggningen ändå återvinner värme och/eller att sagda värme används när det är varmt ute så är kostnaden nära 0! Om återvinningssystemet är aktiverat så är marginalkostnaden för ytterligare värmeanvändning mycket liten. Vid varmt klimat så jobbar normalt sett kylsystemet ändå vid en hög temperatur och då blir likaledes den tillkommande kostnaden för återvinningsfunktionen försumbar.

5 Slutsatser

Delrapport 2 inom forskningsprojektet NERIS - Metoder och energianvändning för avfuktning i ishallar - av har behandlat olika avfuktningsmetoder i ishallar och dess funktion tillsammans med tekniska möjligheter och begränsningar. En metod som diskuteras är sk kylavfuktning vilken går ut på att kondensera ut fukten ut luften. Begränsningen med just denna metod är att det är svårt att komma med i de låga fukthalter som krävs i en ishall. Vidare så driver denna metod kylbehovet, ofta från kylsystemet, vid den tid på året då kylbehovet från isen ändå är som störst. Detta leder till en mismatchning av effektbehoven. Den vanligaste avfuktningsmetoden är sorptionsavfuktning vilken bygger på att fukt fångas i ett roterande hjul och sedan drivs ut av högt tempererad värme. Metoden är avfuktningsmässig effektiv men kräver också stora mängder värmeenergi av hög temperatur – ofta i form av el. Årsbehovet ligger i allmänhet mellan 50 och 150 MWh för en mindre eller medelstor anläggning.

Det omgivande klimatet är den faktor som intuitivt mest påverkar energianvändningen men det visar sig att styrprincipen också kan spela en avgörande roll. Det visar sig att det traditionella sättet att styra avfuktningen baserad på relativ fukt kan straffa sig rejält. Inte nog med att man kan få alltför höga fuktnivåer då lufttemperaturen är hög, som i början på säsongen när det är varmt ute, men det leder ofta också till sk överavfuktning när det väl blir kallare – både inne och ute. I ett aktuellt exempel så påvisas att över 30% av avfuktningsenergin används till ingen nytta, vilket i fallet som studerats här betydde att 44 MWh el slösades bort på årsbasis.

Man kan också illustrera och jämföra energianvändningen i olika anläggningar genom att ta fram sk energisignaturer. Detta är ett verktyg för att förstå hur anläggningar kan jämföras med varandra samt vilka faktorer som driver energianvändningen. Inverkan och betydelsen av luftläckage har diskuterats och kommer att studeras närmare i kommande delrapporter.

Ett intressant område är hur man sparar energi samt vilka alternativa energiformer som kan användas i avfuktningsprocessen. Genom det vi kallar 1sta generationens återvinningsdrivna teknik så kombinerar man värme från återvinning, fjärrvärme eller något annat med den vanligen i avfuktaren inbyggda elvärmen för regenereringen. Detta är en bra början och kan spara storleksordningen 40% el till avfuktningsfunktionen. I andra generationens aggregat används bara vätskeburen värme av ca 60°C temperaturnivå vilket lämpar sig väl för t ex återvinningsvärme från kylsystemet – givet att man har tillräckligt med värme! Erfarenheterna är goda och besparingarna kan bli stora. Resultaten visar att över 80% av energibehovet för avfuktning kan tillgodoses med t ex återvunnen värme.

6 Referenser

- Rogstam, J., Pomerancevs, J., Bolteau, S., Grönqvist, C. NERIS - Del 1, Fuktproblematiken i ishallar - en introduktion. EKA/KTH NERIS 2017.
- Rogstam, J., 2016. Evolution of CO₂ as refrigerant in ice rink applications. 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Edinburg, 2016
- Rogstam, J., Bolteau, S., 2015. Ice rink of the future - evaluation of energy and system solutions. EKA, www.ekanalys.se.
- Bolteau, S. et al., 2016. Evaluation of heat recovery performance in a CO₂ ice rink. 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Edinburg, 2016
- Rogstam, J., et al., 2016. Cooling and Heating Ice Rinks With CO₂. ASHRAE Journal August 2017.
- Rogstam, J., Energy usage statistics and saving potential in ice rinks. Stockholm, 2010.
- Rogstam, J., Mazzotti, 2014. W. Ice Rink Dehumidification Systems Energy Usage and Saving Measures, in 11th International Energy Agency Heat Pump Conference, Montréal.
- Fuktkontroll, www.fuktkontroll.se