

Vätskekopplad värmeåtervinning

Förstudie

Utarbetad av
Peter Filipsson & Lars Ekberg
CIT Energy Management AB

Göteborg, december 2018

Beställargruppen lokaler, Belok, är ett samarbete mellan Energimyndigheten och Sveriges största fastighetsägare med inriktning på kommersiella lokaler. Belok initierades 2001 av Energimyndigheten och gruppen har sedan dess drivit utvecklingsprojekt med inriktning mot energieffektivitet i lokalbyggnader.

CIT Energy Management är ett konsultföretag som arbetar med energieffektivisering och inomhusmiljö i olika typer av fastigheter. De har fått i uppdrag av Energimyndigheten att leverera förstudier och utredningar inom verksamhetsområdet lokalfastigheter. Förstudierna och utredningarna genomförs internt eller av extern part och undersöker vilka områden inom energieffektiva lokaler som är intressanta att utveckla och vilka fördjupade utredningar och analyser som kan behövas.

Alla rapporter finns tillgängliga via Beloks hemsida www.belok.se.

Författarna av denna förstudie vill rikta ett stort tack till Eric Eliasson, Per Ingelsten, Olof Peterson och Tove Sandström (Vasakronan) och Jan Sarac (Västfastigheter).

SAMMANFATTNING

Bakgrunden till denna förstudie är att fastighetsägare upplevt att vätskekopplad värmeåtervinning ofta fungerar sämre än förväntat. I synnerhet i ventilationssystem med variabelt luftflöde men även i konstantflödessystem. I förstudien förklaras principiellt hur ett vätskekopplat system fungerar, det ges en ungefärlig bild av hur vanligt det är, hur väl de fungerar samt vad som kan göras för att förbättra dem.

Det finns en stor besparingspotential i att höja prestandan i befintliga system. Bara i Vasakronans bestånd skulle en ökning av temperaturverkningsgraden med en procentenhet innebära en årlig värmebesparing på över 500 MWh.

Med tanke på skillnaden mellan temperaturverkningsgrad i traditionella vätskekopplade system (40-60 %) och det nya ekodesignkravet (68 %) är det nu viktigt att hitta kostnadseffektiva sätt att höja temperaturverkningsgraden i nya system.

Resultatet av förstudien är förslag på fortsättningsprojekt som dels handlar om att kontrollera och optimera befintliga system och dels om att i labbmiljö testa och utveckla nya system.

INNEHÅLL

INLEDNING	5
Bakgrund	5
Syfte och mål	5
TEORI	6
FÖREKOMST	13
Vasakronan	14
Västfastigheter	16
FÖRBÄTTRINGSPOTENTIAL	18
Befintliga system	18
Nya system	19
Ekodesign	22
FÖRSLAG PÅ FORTSÄTTNING	24
E2B2	25

INLEDNING

Bakgrund

Vätskekopplad värmeåtervinning är ett vanligt och väl beprövat sätt att återvinna värme ur frånluft. Systemet består av luft-vätskeväxlar (batterier) i tilluft och frånluft, sammankopplade med en vätske-cirkulationskrets genom vilken värme överförs från från- till tilluft. Vätskekopplad värmeåtervinning innebär två stora fördelar jämfört med andra värmeåtervinningssystem. Dels finns det ingen risk för luftläckage mellan från- och tilluft och dels behöver inte till- och frånluftssystemen vara placerade intill varandra. Att det inte finns någon risk för läckage har gjort att vätskekopplad värmeåtervinning är vanligt i lokaler där frånluften kan vara hälsofarlig eller där man har höga krav på tilluftens renhet. Många byggnader som uppfördes när rökning inomhus var vanligt utrustades följaktligen med vätskekopplad värmeåtervinning. Att till- och frånluftssystemen kan vara placerade långt från varandra har dessutom gjort det vanligt i byggnader med platsbrist där det helt enkelt inte varit möjligt att installera större enhetsaggregat. Vätskekopplad värmeåtervinning ger dessutom stora möjligheter att återvinna överskottsvärme från industriella processer, kylmaskiner och serverhallar etc., vilket kan förväntas bli allt vanligare.

Den stora nackdelen med vätskekopplad värmeåtervinning är att systemen oftast har betydligt lägre verkningsgrad än andra typer av värmeåtervinningssystem. Traditionellt har temperaturverkningsgrader kring 50-60 % ansetts ekonomiskt optimala och trots teknikutveckling och ökade incitament för energibesparing är dessa siffror inte ovanliga än idag. Erfarenheter från driftorganisationer tyder dessutom på att det ofta fungerar ännu sämre än så, och i synnerhet i system med variabla luftflöden (VAV). VAV innebär att anpassa luftflödet efter behovet och görs framför allt för att spara energi. Mycket tyder på att denna åtgärd ofta har genomförts utan att anpassa flödet i vätske-cirkulationskretsen, vilket försämrar temperaturverkningsgraden.

Hypotesen bakom denna förstudie är att det finns brister och kostnadseffektiv förbättringspotential i både befintliga och nya vätskekopplade värmeåtervinningssystem, både gällande driftoptimering och förändringar av den tekniska utformningen.

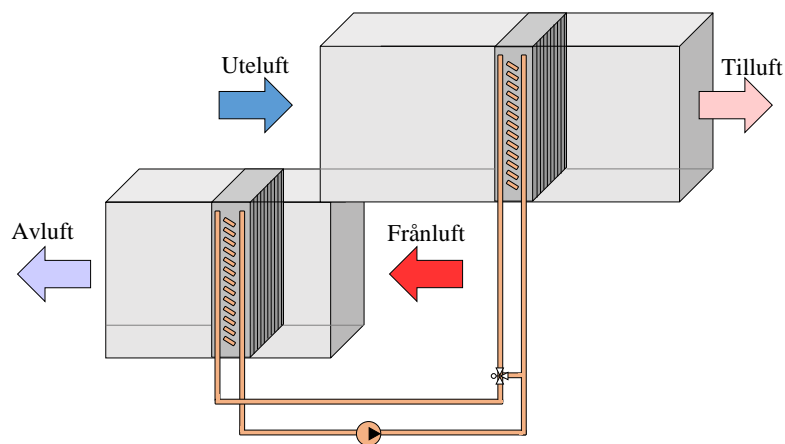
Syfte och mål

Förstudien syftar till att beskriva hur vätskekopplad värmeåtervinning fungerar samt bedöma potentialen i driftoptimeringar och teknikförbättringar. I förstudien sammanfattas erfarenheter från befintliga system för att identifiera vanliga och viktiga problem som försämrar prestandan.

Målet är att förstudien ska utgöra ett underlag för en mer omfattande studie med syfte att ta fram, och praktiskt pröva, konkreta förslag för förbättring av tekniken för vätskekopplad värmeåtervinning. Dessa nya förslag ska tas fram i samarbete med forskare, produkttillverkare och fastighetsägare och tillämpas i praktiken genom ett antal pilotprojekt.

TEORI

I vätskekopplade värmeåtervinningssystem pumpas en värmebärare runt i en krets mellan två luft-vätskevärmväxlare (batterier). I det ena batteriet värms vätskan av frånluften och i det andra batteriet värmer vätskan tilluften (se Figur 1). Batterierna består vanligen av kopparrör och aluminiumlameller. Om till- och frånluftsflöde är lika stora så är det optimalt att även batterierna är lika stora. Lamellerna sitter relativt tätt (ofta med cirka 2 mm mellanrum) eftersom detta ger ungefär lika stort värmemotstånd på luftsidan som på vätskesidan.



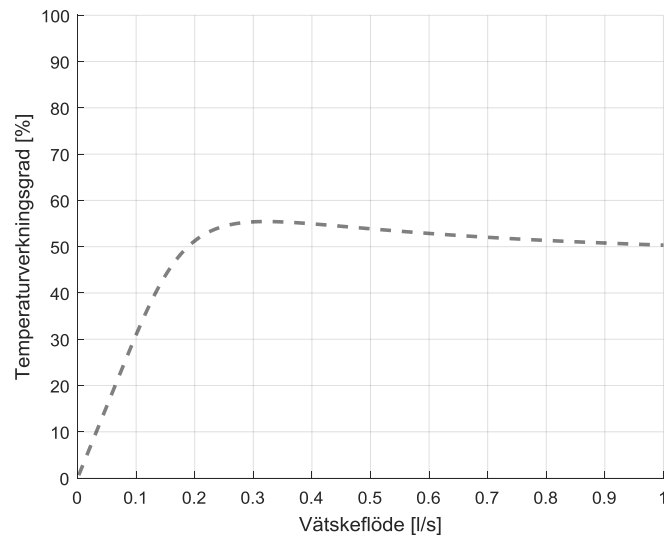
Figur 1 Principiell utformning av vätskekopplad värmeåtervinning

Ett viktigt mått på värmeåtervinningens prestanda är temperaturverkningsgraden. Den motsvarar hur stor den erhållna temperaturökningen är i förhållande till den teoretiskt maximala temperaturökningen, enligt följande ekvation

$$\eta_T = \frac{t_t - t_u}{t_f - t_u} \quad (\text{Ekvation 1})$$

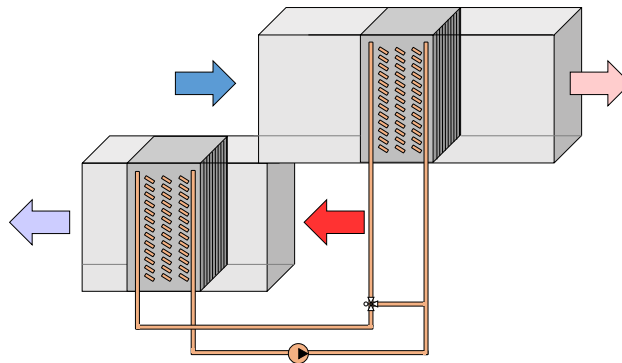
där t_t , t_u och t_f är temperaturen i tilluften, utluften och frånluften. För standardiserad mätning (lufttillstånd, givarplacering etc.) av temperaturverkningsgrad hos vätskekopplad värmeåtervinning hänvisas till kategori IIa i svensk standard SS-EN 308.

Högst temperaturverkningsgrad erhålls när vätskans värmekapacitetsflöde (flöde multiplicerat med specifik värmekapacitet) är lika stort som luftströmmarnas. Vid högre flöde hinner vätskan inte närma sig luftens temperatur tillräckligt och vid lägre flöde blir temperaturskillnaden mellan vätska och luft onödigt låg. Detta medför att temperaturverkningsgrad som funktion av vätskeflöde ser ut som i Figur 2 (Holmberg, 1975). I figuren har ingen hänsyn tagits till att vätskeflödet påverkar det konvektiva värmeöverföringstalet.



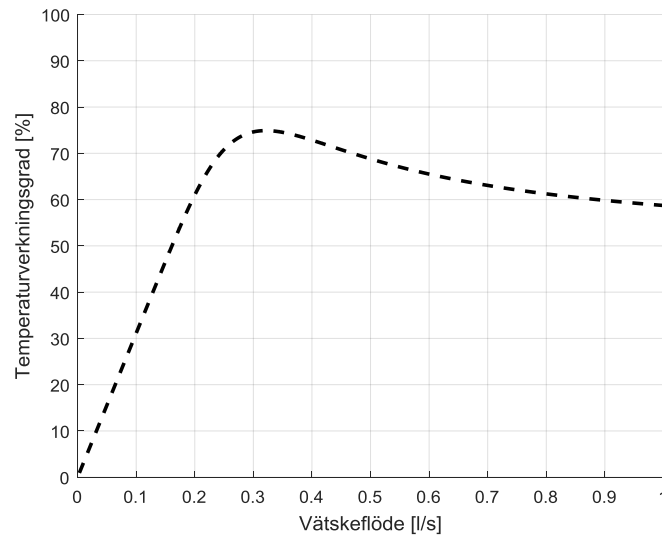
Figur 2 Principiellt samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad för ett system som dimensionerats för 55 % temperaturverkningsgrad och luftflödet 1 m³/s.

Som med all värmewäxling är temperaturverkningsgraden en dimensioneringsfråga. Ett sätt att öka temperaturverkningsgraden är att förstora batterierna och öka antalet rörrader, se Figur 3 och jämför med Figur 1.



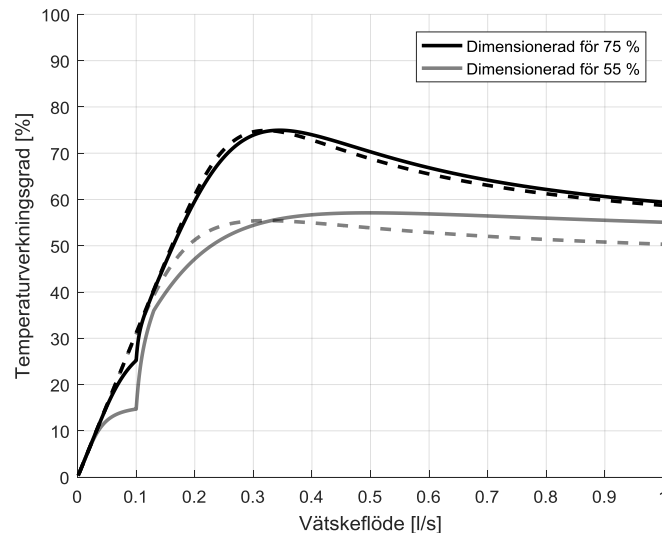
Figur 3 Principiell utformning av vätskekopplad värmeåtervinning dimensionerad för högre temperaturverkningsgrad.

Motsvarande samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad för ett system dimensionerat för 75 % temperaturverkningsgrad visas i Figur 4.



Figur 4 Principiellt samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad för ett system som dimensionerats för 75 % temperaturverkningsgrad och luftflödet 1 m³/s.

Genom att jämföra Figur 4 med Figur 2 kan man se att ju högre temperaturverkningsgrad ett system är dimensionerat för desto viktigare blir det att hålla rätt vätskeflöde. I verkligheten, däremot, påverkas det konvektiva värmeöverföringstalet av vätskeflödet. Med hänsyn till detta blir temperaturverkningsgraderna för de två systemen istället enligt Figur 5¹. Det, för temperaturverkningsgraden, optimala vätskeflödet blir högre och man ser att den laminära strömningen vid låga vätskeflöden försämrar temperaturverkningsgraden abrupt. Observera att man även måste ta hänsyn till pumparbete för att bestämma det verkligt optimala flödet.



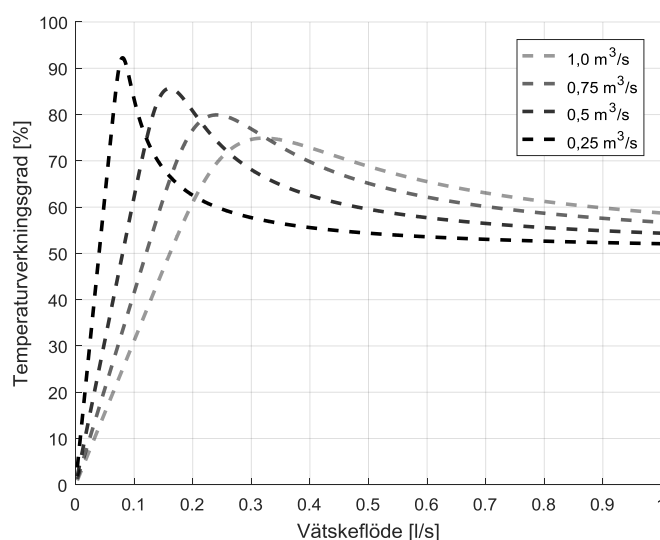
Figur 5 Samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad för system som dimensionerats för 55 % respektive 75 % temperaturverkningsgrad. Streckade linjer är utan hänsyn till att flödet påverkar värmeöverföringen (luftflöde = 1 m³/s).

¹ Här har antagits $Nu_d(Re_d < 2300) = 4,36$, att $Nu_d(Re_d > 3000) \sim Re_d^{(4/5)}$ och linjärt interpolerat då $2300 < Re_d < 3000$ samt att Re_d vid dimensionerande flöde är 7500.

Behovsstyrd ventilation

För att spara energi reduceras ofta luftflödet i ventilationssystem. Detta görs i huvudsak när lokalerna inte används men kan också göras mer genomtänkt genom att kontinuerligt styra luftflödet efter behovet (t.ex. genom att mäta CO₂-koncentration i frånluften). Eftersom optimalt vätskeflöde i återvinningskretsen bestäms av luftflödet så bör förstås även detta styras.

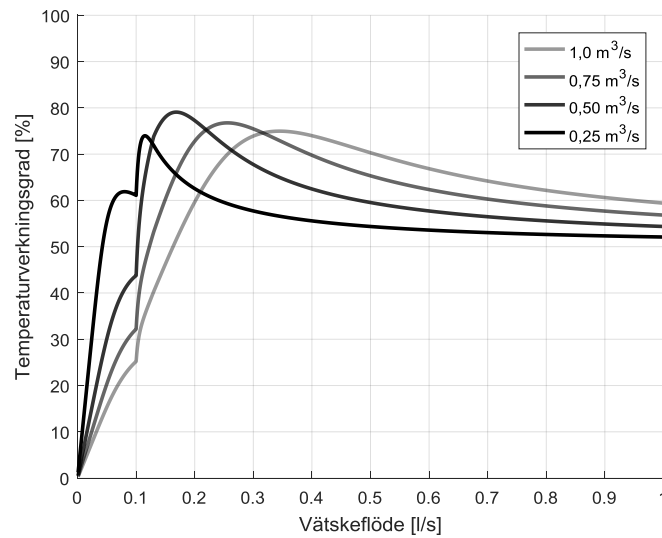
Rent värmekapacitetsmässigt innebär en reduktion av luftflödena att temperaturverkningsgraden ökar, men det förutsätter att vätskeflödet reduceras i samma proportion som luftflödena. Och precis som när man dimensionerar för högre temperaturverkningsgrad, så innebär lägre luftflöde att det är desto viktigare att träffa rätt vätskeflöde, se Figur 6.



Figur 6 Principiellt samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad vid olika luftflöden för ett system som dimensionerats för 75 % temperaturverkningsgrad och luftflödet 1 m³/s.

Om man återigen tar hänsyn till att vätskeflöde, och nu även luftflöde, påverkar värmeöverföringen så blir sambanden istället som i Figur 7².

² Här har antagits att Nusselttalet är proportionellt mot roten ur luftflödet.

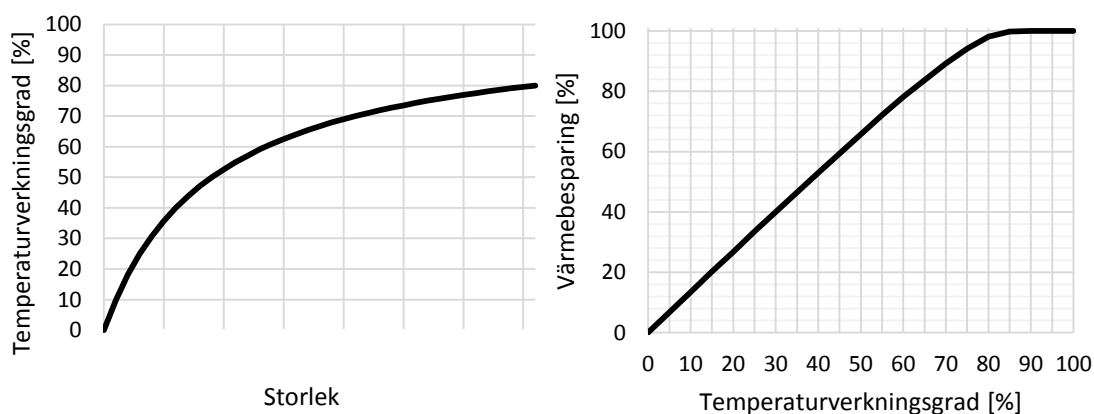


Figur 7 Samband mellan vätskeflöde och temperaturverkningsgrad vid olika luftflöden för ett system som dimensionerats för 75 % temperaturverkningsgrad och luftflödet 1 m³/s.

I figuren syns hur det värmekapacitetsmässigt optimala vätskeflödet krockar med övergången till laminärt flöde vilket illustrerar en tänkbar problematik med vätskekopplad värmeåtervinning i VAV-system.

Även om man vet vilket vätskeflöde som är optimalt så är det inte helt lätt att säkerställa att det hålls i verkligheten. När vätskan åldras ändras dess termofysikaliska egenskaper (densitet, värmekapacitet, viskositet, värmekonduktivitet och fryspunkt). Detta innebär även ändrat optimalt vätskeflöde, erhållet vätskeflöde (vid oförändrat pumparbete) och, om man inte korrigerar för de förändrade egenskaperna, även uppmätt vätskeflöde.

Om man bortser från materialåtgång, platsbegränsningar, fläkt- och pumparbete så är det inga problem att uppnå i princip 100 % temperaturverkningsgrad. I praktiken, däremot, måste man väga energibesparingen mot dessa faktorer. Traditionellt har avvägningen inneburit ekonomiskt optimala verkningsgrader kring 50-60 %. Det enklaste och vanligaste sättet att höja temperaturverkningsgraden är ha större värmeöverförande ytor (t.ex. rörrader). Men medan materialåtgång och fläkt- och pumparbete ökar närmare linjärt med storleken på ytorna så avtar värmebesparingsökningen kraftigt. Detta beror dels på att temperaturverkningsgradsökningen avtar (se vänster i Figur 8) och dels på att värmebesparingsökning som funktion av temperaturverkningsgrad avtar.



Figur 8 Principiellt samband mellan storlek och temperaturverkningsgrad (vänster) och samband mellan temperaturverkningsgrad och värmebesparing (höger). (För värmebesparingen antas göteborgsklimat, tilluftstemperatur 18 °C och frånluftstemperatur 22 °C.)

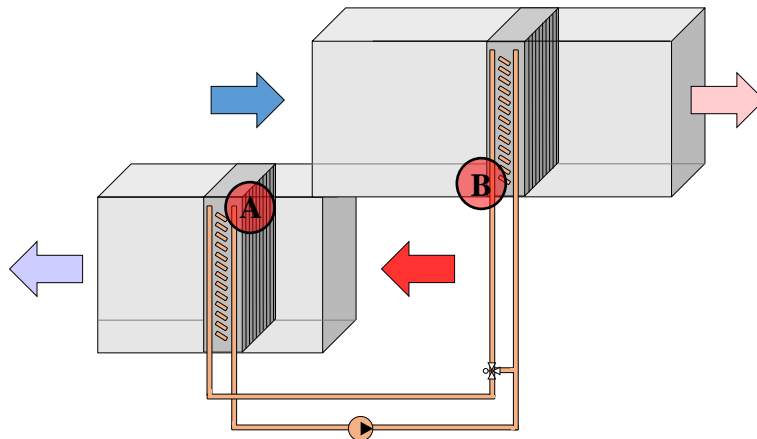
Påfrostning och frysrisk

Påfrostning och frysrisk är två helt olika saker men bägge är väldigt viktiga för prestandan hos vätskekopplad värmeåtervinning.

När man talar om påfrostning menar man isbildningen på luftsidan i frånlufts batteriet som inträffar vid låga utetemperaturer och fuktig frånluft, se punkt A i Figur 9. Avfrostningen, eller åtgärd för att proaktivt undvika påfrostning, består vanligtvis i att vätskan shuntas förbi tillufts batteriet för att höja temperaturen i frånlufts batteriet och därmed motverka frostbildning.

Frysrisken däremot, handlar om att vätskan fryser till is, detta hindras av fryspunktsnedsättande tillsatser (glykol) för att undvika isbildning i tillufts batteriet, se punkt B i Figur 9. Inblandningen av glykol medför dessvärre sänkt specifik värmekonduktivitet och värmekapacitet samt ökad viskositet och densitet.

Eftersom avfrostning bara görs när det är som kallast ute, har det marginell påverkan på energibehovet, men kan ha stor påverkan på effektbehovet. Frostskyddsmedlet däremot, har marginell påverkan på effektbehovet, men påverkar energibehovet desto mer, eftersom det är inblandat hela tiden.

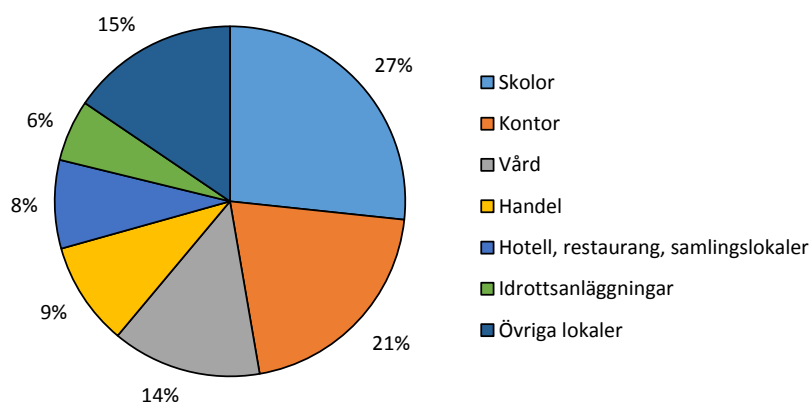


Figur 9 Förklaring var störst påfrostningsrisk finns (A) och var störst frysrisk finns (B).

FÖREKOMST

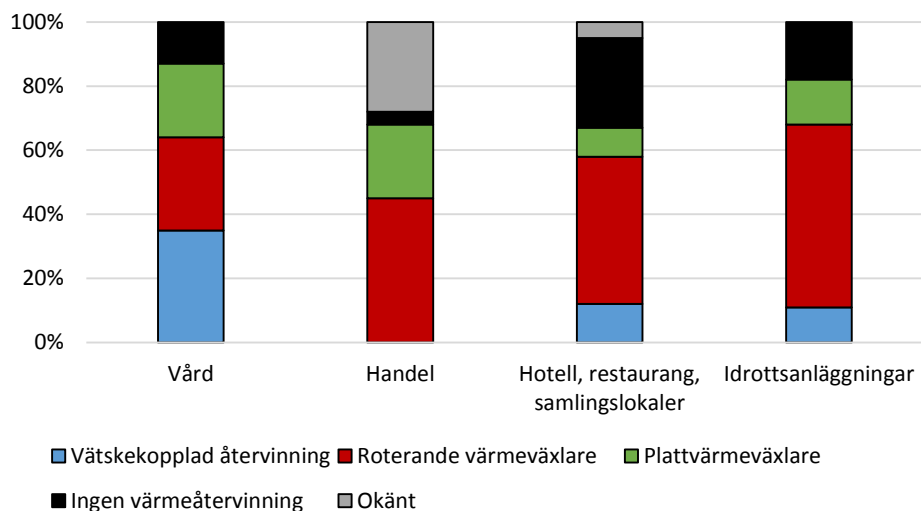
För att kunna motivera fortsatt arbete med att förbättra prestandan i vätskekopplad återvinning är det värdefullt att få en uppfattning om hur vanligt förekommande det är. Dessvärre finns ingen officiell nationell statistik över detta.

Sveriges lokalbestånd utgör cirka 157 miljoner kvadratmeter fördelat enligt Figur 10.



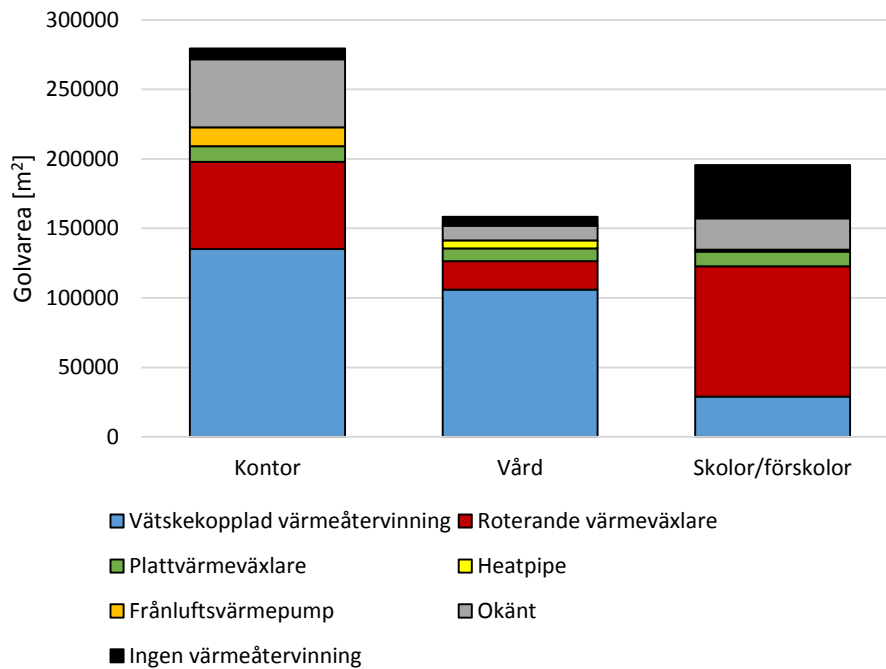
Figur 10 Sveriges totala lokalbestånd, totalt 157 miljoner kvadratmeter (Energimyndigheten, 2017).

Mellan år 2005 och 2010 genomförde Energimyndigheten projektet Statistik i lokaler (STIL2) med syfte att inventera energianvändningen i Sveriges lokalbestånd, dock med fokus på elanvändning. Ett representativt urval av samtliga lokalkategorier inventerades och för kategorierna *Vård*, *Handel*, *Hotell, restaurang och samlingslokaler* samt *Idrottsanläggningar* rapporterades typ av värmeåtervinningssystem. Detta redovisas i Figur 11. Dessvärre framgår inte typ av värmeåtervinningssystem för kategorierna *Kontor* och *Skolor*.



Figur 11 Typ av värmeåtervinningssystem i lokalerna inventerade inom STIL2 (Energimyndigheten, 2007-2011).

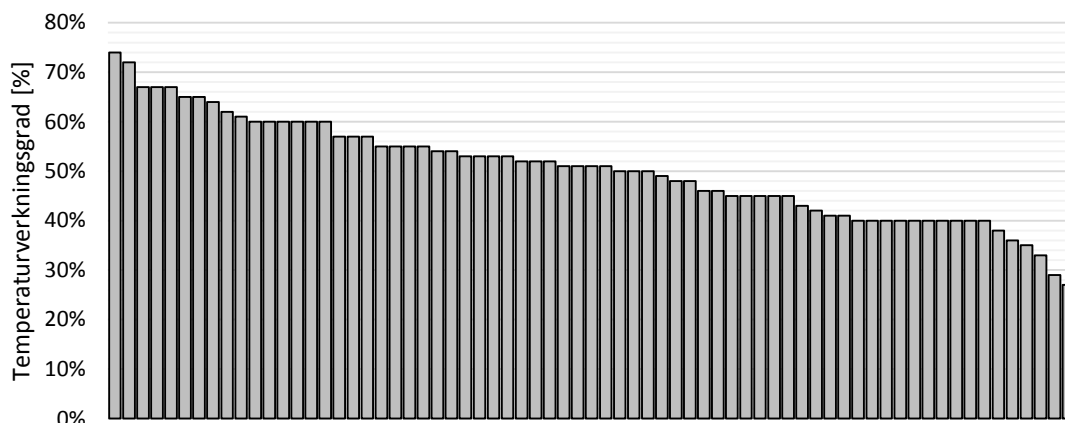
Inom Belok har ett antal lokalfastigheter inventerats i samband med Etapp 1 av Totalprojekt. Totalt rör det sig om 18 kontorsfastigheter, 14 vårdfastigheter och 28 skolor/förskolor. Vilken typ av värmeåtervinningssystem dessa byggnader haft (före renovering) redovisas i Figur 12. Dessa fastigheter har haft ett energieffektiviseringsbehov och kan därför inte anses representativa för hela lokalbeståndet.



Figur 12 Typ av värmeåtervinningssystem i lokalerna inventerade i samband med Totalprojekt

Vasakronan

Vasakronan är Sveriges största fastighetsbolag och äger, utvecklar och förvaltar cirka 2,4 miljoner kvadratmeter kommersiella fastigheter i Stockholm, Göteborg, Malmö, Uppsala och Lund. En grov sammanställning visar att ett totalt luftflöde på cirka 1 000 kubikmeter per sekund har vätskekopplad värmeåtervinning hos Vasakronan (exkl. fastigheterna i Uppsala). I cirka hälften av systemen har man kännedom om temperaturverkningsgraden, den genomsnittliga temperaturverkningsgraden i dessa är cirka 50 %, men det varierar mellan cirka 25 och 75 %, se Figur 13. Sammanställningen visar också att cirka en fjärdedel av det nominella luftflödet i de vätskekopplade systemen är VAV.



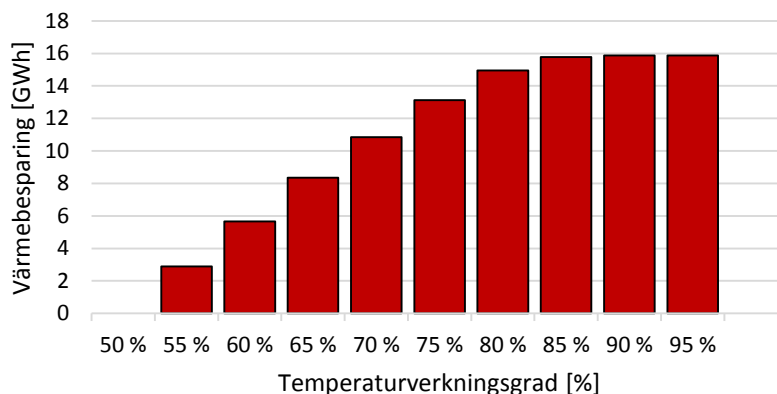
Figur 13 Temperaturverkningsgrad i 69 av Vasakronans vätskekopplade värmeåtervinningssystem.

Vasakronan upplever att deras vätskekopplade värmeåtervinningssystem ofta fungerar betydligt sämre än de borde. De misstänker att de ofta drabbas av laminär strömning vid delflöde då vätskeflödet reduceras som följd av reducerat luftflöde.

Under antagandena i punktlistan nedan skulle Vasakronan spara cirka 585 MWh värme årligen genom att öka den genomsnittliga temperaturverkningsgraden med en procentenhet i sina vätskekopplade värmeåtervinningssystem.

- Idag är temperaturverkningsgraden 50 %.
- Det totala nominella flödet är 1000 m³/s, 25 % av detta är i VAV-system.
- Systemen är jämnt fördelade mellan Stockholm, Göteborg och Lund.
- Tilluftstemperatur är 18 °C och frånluftstemperatur är 22 °C.
- Ventilationen är i drift varje dag 8:00 - 18:00.
- Flödets variation i VAV-systemen antas motsvara mätningar av Maripuu (2009).

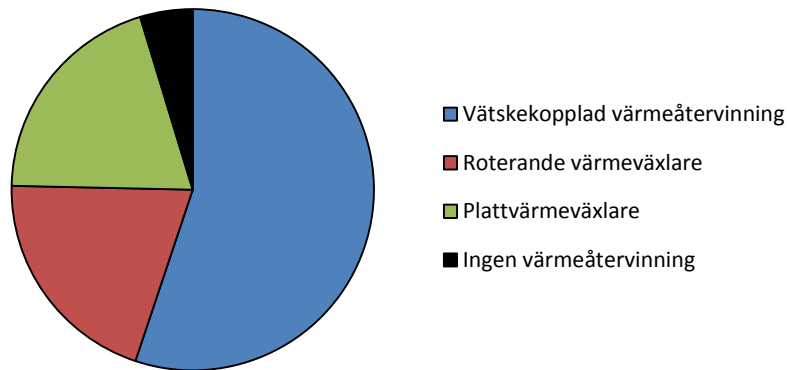
Antagandena ger att Vasakronans värmebesparing som funktion av temperaturverkningsgraden i sina vätskekopplade värmeåtervinningssystem är enligt Figur 14.



Figur 14 Vasakronans årliga värmebesparing som funktion av genomsnittlig temperaturverkningsgrad i sina vätskekopplade värmeåtervinningssystem.

Västfastigheter

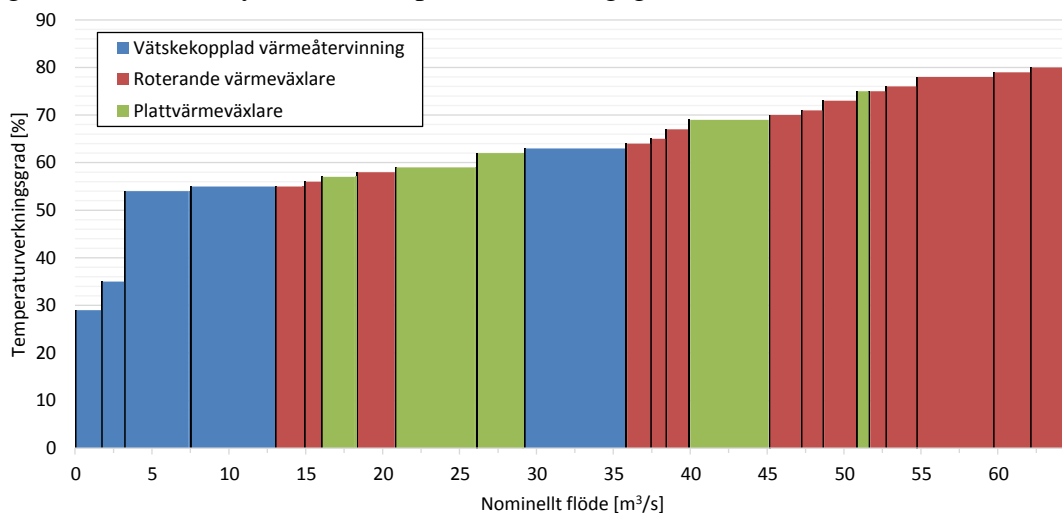
En sammanställning av värmeåtervinningssystemen på Sahlgrenska Universitetssjukhuset i Göteborg visar att drygt 55 % av det totala luftflödet behandlas med vätskekopplad värmeåtervinning, se Figur 15.



Figur 15 Typ av värmeåtervinning på Sahlgrenska. Hela cirkeln motsvarar 410 m³/s.

De vätskekopplade värmeåtervinningssystemen på Sahlgrenska har en genomsnittlig temperaturverkningsgrad på 44 % och de varierar mellan de sämsta 28 % och de bästa 60 %. De roterande värmeväxlarna har ett genomsnitt på 72 % (67-88 %) och plattvärmeväxlarna 45 % (30-55 %).

En sammanställning av värmeåtervinningen på Kungälv's sjukhus visar att knappt 30 % av det nominella luftflödet behandlas med vätskekopplad värmeåtervinning, se Figur 16. I figuren visas även systemens temperaturverkningsgrad.



Figur 16 Flöde och temperaturverkningsgrad i ventilationssystemen i Kungälv's sjukhus.

På Kungälv's sjukhus lät Västfastigheter även undersöka hur temperaturverkningsgraden i fem vätskekopplade system kunde ökas genom att optimera vätskeflödet (Samuelsson & Abrahamsson, 2013). Det visade sig att flödet var för högt i tre av systemen och för lågt i två. Att åtgärda detta innebar att den genomsnittliga temperaturverkningsgraden ökade från 41 % till 47 % samt att pumparnas elbehov minskade med 35 %. Man

upptäckte samtidigt att batterierna i två av systemen var underdimensionerade i förhållande till det nominella luftflödet. Dessutom misstänkte man att propylen- och etylenglykol råkat blandas, vilket försämrar systemens prestanda avsevärt.

FÖRBÄTTRINGSPOTENTIAL

Det finns många sätt att förbättra prestandan hos vätskekopplade värmeåtervinnings-system. Vissa av sätten/åtgärderna har i princip inga nackdelar utöver att de kräver arbete. Att höja temperaturverkningsgraden i nya system är däremot inte lika självklart eftersom det i princip alltid handlar om en avvägning som innebär mer fläkt- och pumparbete, mer materialåtgång, kräver mer utrymme och ibland ställer högre krav på drift- och underhållsrutiner.

Förbättring handlar inte nödvändigtvis om högre temperaturverkningsgrad vid nominellt luftflöde. Nämnvärt är att Vasakronan efterlyser förbättrad temperaturverkningsgrad vid delflöden i VAV-system. Vid vilka luftflöden det är viktigast att ha hög temperaturverkningsgrad beror givetvis på luftflödets varaktighet och korrelation med utomhustemperaturen.

Befintliga system

Att befintliga system inte fungerar optimalt beror delvis på att vissa saker försämras med tiden och delvis på att man redan från början har säkerhetsmarginaler på temperaturverkningsgradens bekostnad.

Avluftning

En av de vanligaste orsakerna till dålig temperaturverkningsgrad är att vätskan innehåller för mycket luft. På grund av den jämförelsevis låga temperaturen är det betydligt svårare att avlufta dessa system än ett vanligt värmesystem. Det krävs speciella vakuumpumpar som måste verka på systemet ett par dagar innan det är ordentligt avluftat.

Vätskekvalitet

Vätskans kvalitet blir sämre med tiden. Även om systemet är korrekt avluftat så bör vätskan bytas ut minst vart tionde år p.g.a. att dess kvalitet försämrats. Vid byte är det viktigt att rörsystemet och batterierna rengörs invändigt innan ny vätska fylls på.

Läckande ventiler

Effektregleringen sköts vanligtvis av en trevägsventil som shuntar vätska förbi tillufts batteriet. När man vill ha så hög temperaturverkningsgrad som möjligt så ska ingen vätska shuntas. I en projektuppföljning genomförd av Byggnadsstyrelsen (Kölgren et al. 1986), visserligen från 1986, konstaterades denna typ av läckage i samtliga undersökta vätskekopplade återvinningsystem.

Försmutsade batteriytor

Om luften inte filtreras ordentligt innan den kommer till batterierna så finns risk att smutsen istället fastnar på lamellerna och därmed försämrar värmeöverföringen. Även detta visade sig vara ett vanligt problem i systemen undersökta på uppdrag av Byggnadsstyrelsen.

Frostskydd

För att undvika att vätskekretsen fryser sönder så tillsätts frostskyddsmedel, ofta i form av etylenglykol eller propylenglykol. För att sänka fryspunkten till -15 °C krävs 30 % etylenglykol eller 35 % propylenglykol. För att vara på den säkra sidan tillsätts mer glykol

än nödvändigt så att vätskan inte ens fryser vid stillestånd. En nackdel är glykolens värmetekniska egenskaper som medför att 10 % högre glykolhalt ger cirka 1 % lägre temperaturverkningsgrad (Holmberg & Strindehag, 1981).

Påfrysning

För att undvika påfrysning på frånlufts batteriet så sänks temperaturverkningsgraden när det är kallt ute. Detta görs vanligen genom att shunta vätskan förbi tillufts batteriet, som funktion av vätsketemperaturen uppströms frånlufts batteriet. Detta påverkar effektbehovet i betydligt högre grad än energibehovet, åtminstone på platser där det inte är mycket kallt mer än korta perioder. Det är mycket viktigt att prova sig fram och ställa in påfrysningsregleringen med hänsyn till de aktuella förhållandena. Risken för påfrysning brukar vara mycket mindre än man tror (Björnbom, 2005).

Flöde

Vanligtvis rekommenderas att man har högre flöde än optimalt för att ha en säkerhetsmarginal mot för lågt flöde, vilket är betydligt skadligare för temperaturverkningsgraden. Ju högre temperaturverkningsgrad, desto mer skada gör denna säkerhetsmarginal.

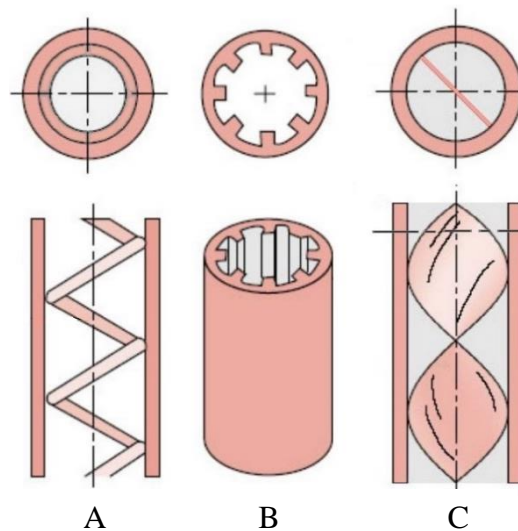
Nya system

Utformning och dimensionering av nya system är alltid en avvägning där mer värmeöverförande yta innebär högre temperaturverkningsgrad men samtidigt oftast ökat fläkt- och pumparbete, mer materialåtgång, kräver mer utrymme och ställer högre krav på drift- och underhållsrutiner. Traditionellt har temperaturverkningsgrader kring 50-60 % ansetts ekonomiskt optimala.

En ökning av temperaturverkningsgraden kan ske genom att ändra batteriernas utformning med avseende på antal rörader, kretsar och vattenvägar vilket på olika sätt påverkar tryckfall, vätskehastighet, temperaturverkningsgrad samt möjlighet att rengöra rören. Ett tänkbart sätt att bibehålla turbulens vid låga vätskeflöden är att sektionera kretsar i batterierna, vilket å andra sidan leder till minskad värmeöverförande yta. Nedan ges exempel på några andra mindre konventionella sätt att förbättra värmeöverföringen.

Turbulatorer

Ett sätt att öka värmeöverföringen är att på olika sätt påverka strömningen inne i rören. Detta är speciellt intressant då vätskeflödet är så lågt att strömningen riskerar att bli laminär. Principiellt kan tekniken delas in i tre helt olika strategier, se Figur 17. Lindad tråd (A) består av en spiralformad metalltråd som följer rörets insida. Denna stör flödet vid rörets insida och genererar därmed turbulens vilket i hög grad gynnar värmeöverföringen. De longitudinella flänsarna (Figur 14 B) förbättrar värmeöverföringen genom att förstora den värmeöverförande ytan. Vridet band (Figur 14 C) ökar vätskans hastighet och genererar virvlar och därmed bättre värmeöverföring.



Figur 17 Olika strategier att förbättra värmeöverföringen i rör. A: Lindad tråd, B: Longitudinella flänsar och C: Vridet band (bildkälla: Bergman et al. 2011).

I praktiken finns väldigt många olika varianter av turbulatorer och många utnyttjar kombinationer av de tre principerna i Figur 17. Den förbättrade värmeöverföringen måste givetvis vägas mot nackdelarna som är ökat tryckfall, mer komplex tillverkning och svårare rengöring.

Det har gjorts väldigt mycket experimentella studier på olika typer av turbulatorer för att utreda vilken typ och vilka geometrier som passar bäst för olika förhållanden. Då longitudinella flänsar är komplext att tillverka och vridna band ger väldigt höga tryckfall vid turbulent flöde så verkar lindad tråd vara det som ligger närmast till hand att använda i vätskekopplade värmeåtervinningssystem. Dess främsta fördel är att den sänker Reynoldstalet för övergång mellan laminär och turbulent strömning till cirka 700 jämfört med cirka 2300 för släta rör (Liu & Sakr, 2013). Detta skulle kunna vara en lösning på Vasakronans farhågor om laminär strömning vid låga flöden i VAV-system.

Nanovätskor

Traditionellt används en blandning av vatten och glykol (etylen eller propylen) som värmebärande vätska. Glykolen tillsätts för att sänka vätskans fryspunkt. Tillsatsen av glykol medför dessvärre dessutom att värmekonduktiviteten och den specifika värmekapaciteten sjunker samt att densiteten och viskositeten ökar. Detta både försämrar värmeöverföringen och ökar erforderligt pumparbete.

I mitten av 1990-talet upptäcktes att man kunde öka en vätskas värmekonduktivitet avsevärt genom att blanda i partiklar av ett material med betydligt högre värmekonduktivitet (Choi & Eastman, 1995). Till exempel leder koppar värme 1600 gånger effektivare än etylenglykol. För att undvika sedimentering och erosion krävs att partiklarna är väldigt små (vanligen 10 – 100 nm) och vätskorna kallas med anledning av detta för nanovätskor. Antalet vetenskapliga artiklar om nanovätskor har ökat kraftigt under 2000-talet (från ett par per år till 2500 publicerade under 2017). Tillsatsen av

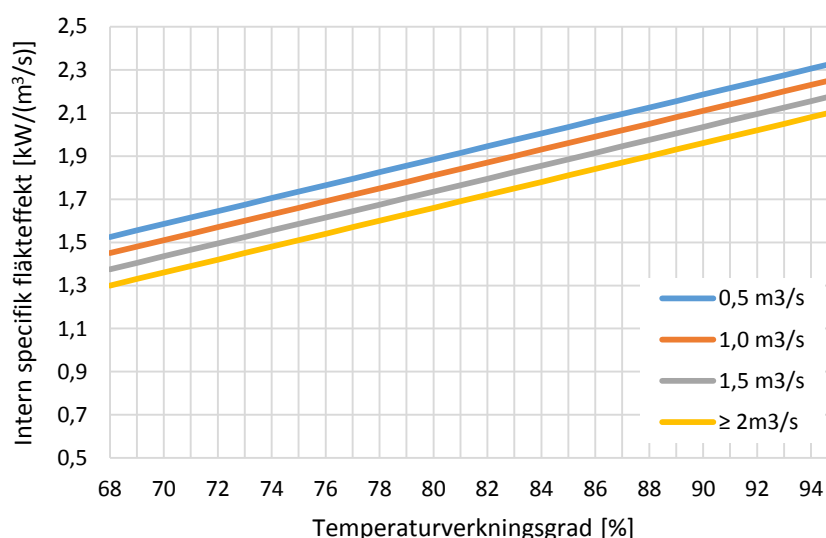
nanopartiklar medför högre värmekonduktivitet, högre värmekapacitet, högre densitet och högre viskositet. Den förbättrade värmeöverföringen sker därmed, precis som med många andra lösningar, på bekostnad av ökat tryckfall.

Kontinuerlig glykolhaltskontroll

Att kontinuerligt styra glykolhalten är ett sätt att minska problemet med att (den för frysrisken nödvändiga) glykolen försämrar vätskans värmeöverförande egenskaper. Istället för att alltid ha glykol i vattnet så tillsätts det när det behövs och avskiljs när någon frysrisk inte längre föreligger. Locum, som förvaltar två miljoner kvadratmeter vårdfastigheter åt Stockholms läns landsting har ett patent på denna strategi (Nutsos, 2013).

Ekodesign

Vid installation av nya vätskekopplade värmeåtervinningssystem är EU:s ekodesignkrav mycket relevanta. Inte minst eftersom de kräver högre temperaturverkningsgrad än vad man traditionellt har dimensionerat dessa system för. För vätskekopplade värmeåtervinningssystem krävs sedan 1 januari 2018 att temperaturverkningsgraden³ är minst 68 %. I förordningen anges även ett *riktvärde*, 80 %. Ekodesign ställer även krav på tryckfallet över värmeåtervinningssystemet, uttryckt som maximalt tillåten intern specifik fläkteffekt. Detta krav ställs som funktion av både nominellt flöde och temperaturverkningsgrad, se Figur 18.

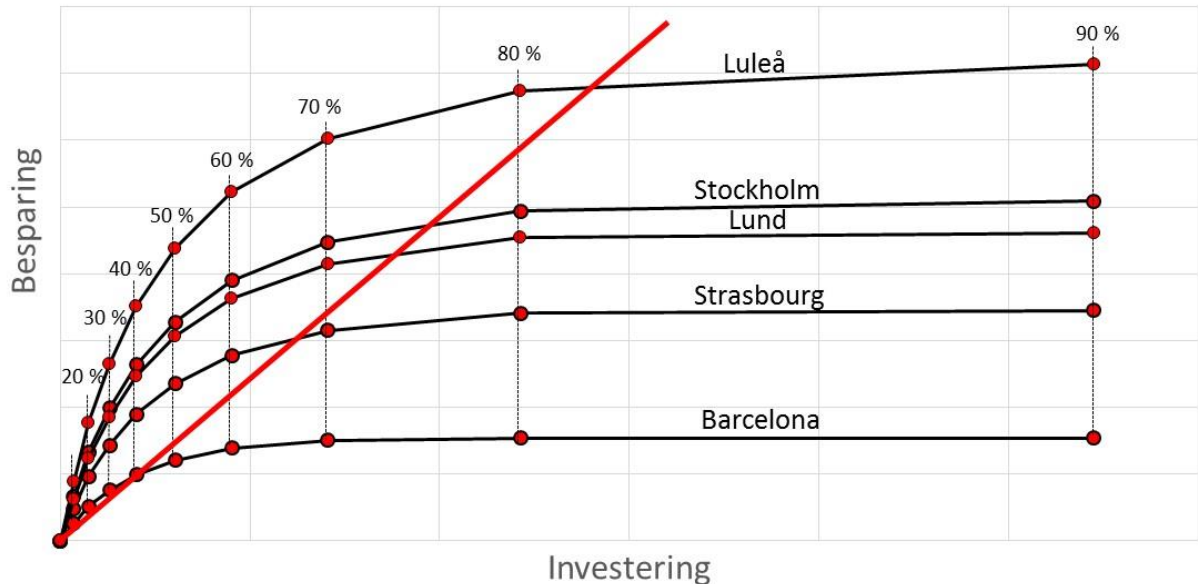


Figur 18 Maximalt tillåten intern specifik fläkteffekt som funktion av temperaturverkningsgrad och nominellt flöde.

Att ekodesignkravet är detsamma i hela EU beror i huvudsak på att tillverkarna inte rör över i vilket klimat systemen installeras. I realiteten är den kostnadsoptimala temperaturverkningsgraden starkt beroende av klimatet och därmed högre i norra än i södra EU. Genom att anta systemets investeringskostnad är proportionerlig mot dess storlek kan sambanden i Figur 8 användas för att illustrera hur lönsamheten skiljer sig mellan olika klimat. I Figur 19 visas investering och värmebesparing som funktion av temperaturverkningsgrad i fem europeiska städer. Lutningen mellan origo och respektive punkt i diagrammet motsvarar lönsamheten. Det röda strecket motsvarar lönsamheten med 68 % temperaturverkningsgrad på ett system i Strasbourg (som kan ses som ett genomsnittligt EU-klimat). Diagrammet visar t.ex. att om 68 % är kostnadsoptimalt i Strasbourg så är cirka 75 % kostnadsoptimalt i Stockholm. Detta enkla exempel bortser

³ I kommissionens förordning (EU) nr 1253/2014 används begreppet termisk verkningsgrad med den obegripliga definitionen ”Förhållandet mellan tilluftens temperaturökning och frånluftens värmeminskning, båda i förhållande till utomhustemperaturen [...]”. I denna förstudie används utan undantag begreppet temperaturverkningsgrad definierat enligt Ekvation 1, vilket istället överensstämmer med definitionen i förordningens bilaga IX.

från möjligheten till kylåtervinning, men tyder ändå på att ekodesignkravet inte ska ses som en universell dimensioneringsprincip.



Figur 19 Investering och värmebesparing för olika temperaturverkningsgrader i fem europeiska städer. Procentsatserna representerar temperaturverkningsgrad. Röd linje motsvarar den lönsamhet som 68 % temperaturverkningsgrad i Strasbourg innebär.

Ekodesignkraven omfattar alltså temperaturverkningsgrad och fläktelbehov vid nominellt flöde, men inte vid delflöde och inte heller krav på erforderligt pumparbete, materialåtgång eller avfrostningsprestanda. Påfrostning blir ett större problem desto högre temperaturverkningsgraden är och avfrostningsstrategi är mycket avgörande för systemets värmeeffektbehov, i synnerhet i kalla klimat.

FÖRSLAG PÅ FORTSÄTTNING

Med stöd i förstudien anses det lämpligt att genomföra ett större projekt som syftar till att förbättra prestandan hos vätskekopplad värmeåtervinning, både i befintliga och nya system. Ett flertal områden med förbättringspotential har identifierats och det större projektet föreslås delas upp i ett antal delprojekt.

Delprojekt 1 - Kontrollera

Ur Vasakronans och Västfastigheters bestånd väljs mellan 5 och 10 lämpliga vätskekopplade värmeåtervinningssystem ut för noggrann uppföljning. Temperaturverkningsgrad mäts både före och efter att alla fel och brister rättats till. Fel och brister kan avse läckande ventiler, försmutsade batteriytor, dålig vätske kvalitet, felaktig glykolhalt, luft i systemet, felaktiga styrinställningar etc.

Projektet utförs med ledning av Statens Fastighetsverks dokumenterade rutiner, kompletterade med rutiner som tillämpas vid Vasakronan och Västfastigheter.

Mål: Att kartlägga förbättringspotentialen och ge värdefulla råd och riktlinjer för drift och underhåll av vätskekopplade värmeåtervinningssystem.

Delprojekt 2 - Optimera

Ett par vätskekopplade värmeåtervinningssystem som sitter i VAV-system väljs ut. Den projekterade funktionen klarläggs och jämförs med hur det funkar på riktigt. Mätningar görs vid olika luftflöden för att se hur vätskeflöde och temperaturverkningsgrad styrs och påverkas av luftflödet. Eventuella förbättringsåtgärder vidtas och följs upp.

Mål: Att visa hur väl vätskekopplad värmeåtervinning fungerar i VAV-system och ge insikter i hur systemen på bästa sätt ska dimensioneras och styras, t.ex. för att undvika laminär strömning.

Delprojekt 3 - Demonstrera

Följ upp och dokumentera ett nyinstallerat system. Utvärdera vad som krävdes för att uppfylla ekodesignkraven, och jämför med system som inte uppfyller kraven. Inte bara med avseende på energieffektivitet, utan även kostnader, materialåtgång, pumparbete, effektbehov etc.

Mål: Att visa ett gott exempel på hur ett nyinstallerat vätskekopplat värmeåtervinningssystem kan/ska se ut för att klara ekodesignkraven.

Delprojekt 4 - Utveckla

Bygg upp en laboratorierigg⁴ och praktiskt forska på alternativa utformningar av vätskekopplade värmeåtervinningsystem. Här kan man med stor anpassbarhet testa och jämföra för- och nackdelar med olika dimensioner, rörkonfigurationer, glykolhalter, effektreglering- och avfrostningstrategier. Kostnadsoptimal utformning och strategi beror på många faktorer, t.ex. uteklimat, tilluftstemperatur, frånluftsfuktighet, luftflödesreglering, drifttider m.m. vilket inte alltid tas hänsyn till idag.

Mål: Att utreda kostnadsoptimal temperaturverkningsgrad och möjliga prestanda-förbättringar till nytta för både fastighetsägare tillverkare.

Delprojekt 5 - Utforska

Laboratorieriggen från delprojekt 4 utnyttjas för att testa mer innovativa lösningar. För- och nackdelar med t.ex. turbulatorer, nanovätskor och kontinuerlig glykolhaltstyrning testas och utvärderas grundligt. Detta för att driva på utvecklingen av vätskekopplad värmeåtervinning och visa hur långt man kan nå med teknik som ännu inte är konventionell.

Mål: Att utreda om det är möjligt att med idag okonventionell teknik avsevärt förbättra prestandan hos vätskekopplad värmeåtervinning.

Resultat av delprojekten förväntas bli väldigt värdefullt för såväl fastighetsägare/förvaltare som för tillverkare och lagstiftande myndigheter. Det finns inget som säger att delprojekten ovan behöver göras i någon särskild ordning.

E2B2

För att genomföra projekten som föreslås ovan krävs finansiering. Energimyndighetens forskningsprogram om energieffektivt byggande och boende (E2B2) syftar till att ta fram ny kunskap, teknik, tjänster och metoder som bidrar till en hållbar energi- och resursanvändning i bebyggelsen. Detta skall ske genom forskning, utveckling, innovation och demonstration. Ett av områdena som E2B2 omfattar är *Tekniska installationer* och en underkategori till detta är *Från- och tilluftssystem (FTX) med hög effektivitet och driftsäkerhet*.

I skrivande stund är programperiodens andra utlysning öppen och den stänger den 6 november 2018. I denna utlysning prioriteras bland annat *Marknadsnära utvecklingsprojekt, demonstrationsprojekt samt utvärderingar av nya tekniklösningar*. Projekt som beviljas stöd i denna utlysning kan tidigast starta 31 januari 2019 och som längst pågå till 31 december 2021. Stöd till en eventuell fortsättning på denna förstudie bör lämpligen sökas ur E2B2.

⁴ Avdelningen för installationsteknik på Chalmers tekniska högskola har en försökshall med syfte att genomföra laboratorietester, praktiska försök och testa hur teoretiska kunskaper fungerar i praktiken. Här finns utrymme att bygga upp en laboratorierigg för vätskekopplad värmeåtervinning.

REFERENSER

Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Björnbom, S. Statens Fastighetsverk Fortlöpande driftoptimering: Rutiner för systematiskt energiarbete i driftförvaltning, Statens Fastighetsverk, 2005.

Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME-Publications-Fed*, 231, 99-106.

Energistatistik för lokaler 2016, ES2017:05, Energimyndigheten, 2017.

Förbättrad statistik för lokaler (STIL2) ER2007:34, ER2007:11, ER2008:09, ER2009:10, ER2010:17, ER2011:11, Energimyndigheten, 2007-2011.

Holmberg, R. B. (1975). Heat transfer in liquid-coupled indirect heat exchanger systems. *Journal of Heat Transfer*, 97(4), 499-503.

Holmberg, R., & Strindehag, O. (1981). Vätskekopplade värmeåtervinningsystem. *VVS-Special*, 21-28.

Kölgren, G., Wingsell, B. & Frykhult, G. Värmeåtervinning – Projektuppföljning, Tekniska byråns information nr 83, Byggnadsstyrelsen, 1986.

Liu, S., & Sakr, M. (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and sustainable energy reviews*, 19, 64-81.

Maripuu, M. L. (2009). *Demand controlled ventilation (DCV) in commercial buildings* (doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Installationsteknik).

Nutsos, M. *Method and arrangement for optimizing heat transfer properties in heat exchange ventilation systems*. U.S. Patent No 8,464,783, 2013.

Samuelsson, J. & Abrahamsson, M. Injustering av glykolflöden i värmeåtervinningsystem, Kungälv's sjukhus. ÅF Infrastructure AB, 2013.