

KOMBINERAD FJÄRRVÄRME OCH FJÄRRKYLA



RAPPORT 2011:8



KOMBINERAD FJÄRRVÄRME OCH FJÄRRKYLA TILL NYA KUNDGRUPPER

PER-OLOF JOHANSSON
SVEND FREDERIKSEN
JANUSZ WOLLERSTRAND

ISBN 978-91-7381-076-0

© 2011 Svensk Fjärrvärme AB

FÖRORD

Målet med det här projektet har varit att visa på tekniska möjligheter där fjärrvärme och fjärrkyla kan kombineras för att kunna utnyttja befintliga installationer för kombinationen fjärrvärme och fjärrkyla för nya kundgrupper. Det finns anledning att tro att efterfrågan på komfortkyla kommer att fortsätta öka, kanske inte enbart för kontorsbyggnader utan även för bostäder.

Projektet har också tittat på fjärde generationens fjärrvärmesystem som troligtvis kommer att ha lägre systemtemperaturer än dagens. För att detta ska vara möjligt är det viktigt att temperaturerna i byggnadernas sekundärsystem beaktas och dessa komponenters förmåga att leverera komfort till slutanvändaren.

Då det skiljer sig i installationers förutsättningar för lägre temperaturer mellan nya och befintliga byggnader har detta varit ytterligare en viktig faktor att titta på i detta forskningsprojekt, vilka tekniska möjligheter som finns att förändra traditionella fläktkonvektorer och radiatorer för lågtemperatursystem.

Arbetet har utförts av Per-Olof Johansson. Till projektet har en referensgrupp varit knuten. Gruppen har bestått av Gunnar Nilsson Göteborg Energi, Kenth Sevestedt Karlshamn Energi och Conny Håkansson Svensk Fjärrvärme.

Projektet har ingått i forskningsprogrammet Fjärresyn som finansieras av Energimyndigheten och fjärrvärmebranschen. Fjärresyns mål är att bland annat att utveckla tekniken och att driftoptimera fjärrvärme och fjärrkyla för att stärka konkurrenskraften genom en mer anpassad och behovsstyrd forskning.

Bo Johansson
Ordförande i Svensk Fjärrvärmes teknikråd

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Fjärresyns styrelse eller Svensk Fjärrvärme har tagit ställning till innehållet.

SAMMANFATTNING

Att sänka systemtemperaturer har länge varit ett centralt tema inom fjärrvärme-forskningen och -tekniken. Det förutspås att i framtida fjärrvärmesystem kommer systemtemperaturerna bli ännu lägre än i dagens. För att möjliggöra detta behövs att temperaturerna i de anslutna byggnadernas sekundärsystem sänks.

Vid nybyggnation har man ett urval av möjliga uppvärmningssystem som är anpassade för lågtemperaturdrift. Exempel på sådana system är golvvärme, traditionella fläktkonvektorer och radiatorer anpassade för lågtemperatursystem. Då det gäller den befintliga bebyggelsen är valmöjligheterna betydligt färre. En möjlighet som studerats i detta arbete är att öka den konvektiva värmeövergången vid befintliga radiatorer genom påblåsning med småfläktar som monteras på radiatorn, kallade ”radiatorfläktar”. Fältförsök och simuleringar med denna lösning visar att värmeavgivningen kan ökas med upp till 60 %. Radiatorfläktar är inte bara lämpliga för att sänka radiatortemperaturer i befintlig bebyggelse generellt, utan även som komplement i enskilda rum där värmeavgivningen är för låg.

Genom sänkt temperaturbehov i byggnaders uppvärmningssystem sjunker automatiskt fjärrvärmevattnets returtemperatur. Det lägre temperaturbehovet kan även utnyttjas så att den primära framledningstemperaturen sänks utan att primärflödet ökas. Om t.ex. den möjliga sänkningen av framledningstemperaturen utnyttjas i ett fjärrvärmenät med kraftvärmeproduktion överstiger den ökade elproduktionen elbehovet av radiatorfläktar för de flesta driftssituationer, dvs. det uppkommer en nettovinst. Detta är ett teoretiskt betraktelsesätt, men det illustrerar att lösningen kan vara intressant.

Det finns anledning att tro att efterfrågan på komfortkyla kommer att fortsätta öka, kanske inte enbart för kontorsbyggnader mm utan även för bostäder. Då installation av kylsystem ofta är förknippad med höga kostnader för befintlig bebyggelse har vi i detta arbete undersökt möjligheten att använda radiatorsystemet för kombinerad värme och kyla. Vi har påträffat två svenska byggnader där detta redan tillämpas, respektive testats. Lösningen är i första hand relevant där kylbehovet är måttligt, såsom i bostadsfastigheter, men även i vissa typer av lokaler, t ex kontor som inrättats i gamla bostadsfastigheter. Det är då intressant att utnyttja radiatorfläktar, dvs. även för att öka värmeövergången vid kylning. Vår studie visar att man på det viset kan öka kyleffekten med upp till mellan 34 och 75 %, beroende på radiatortyp.

I detta arbete har vi även översiktligt studerat två typer av byggnadsintegrerade system för kombinerad uppvärmning och kyla s. Det ena är golvvärme/kyla, det andra tak-/väggvärme/kyla. Golvvärme/kyla är en lösning som är tämligen vanlig i USA, och det finns även svenska tillämpningsexempel. Gemensamt för byggnadsintegrerade system är att de främst lämpar sig för nybyggnation eller vid relativt omfattande renovering.

SUMMARY

A long-standing theme in district heating research and practice is how to lower network temperatures. It is foreseen that this trend will continue which prompts provision for lowered temperatures in hydronic building heating systems as well.

As far as new buildings are concerned a wide range of low-temperature solutions are available. Examples are, under-floor heating, traditional (stand-alone) fan coils, and radiator systems according to existing low-temperature standards. Regarding new buildings the spectrum of choice narrows down. An innovative idea studied in this work is to enhance heat transfer across a radiator surface by means of small add-on fans. An investigation based on both experiments and CFD (Computerized Fluid Dynamics) simulations has shown that in this way an improvement up to as much as 60% is possible. Additionally, such add-on fans can be adopted to compensate for insufficient radiator surface area in individual rooms.

When lowering hydronic system temperatures, the district heating circuit return temperature will automatically be lowered as well. Alternatively, there is the possibility to lower the supply temperature without increasing the flow rate. If this method is adopted, for instance in a system with a Combined Heat and Power plant, then at most heat loads there will be a net increase in generated electric power, calculated as the difference between the incremental increase in power from the CHP plant and the power demand for the fans. Although this is a somewhat theoretical way of evaluating the benefit, it gives a good indication that the concept should be viable.

It seems likely that the demand for air conditioning cooling will continue to increase in Sweden, as in other industrialized countries with a temperate climate, presumably not only in commercial and institutional buildings, but in private homes as well. Especially regarding the last-mentioned building category there will most often be no air distribution system in case of existing buildings, whereby provision for cooling services tends to be expensive.

We have studied to which extent radiators already intended for heating in the cold season can be utilized for cooling in the warm season as well. An inventory revealed one case of a Swedish building in which this concept has been adopted and another case in which the concept has been tested. The concept is primarily relevant in case of buildings with only a moderate cooling demand, typically private homes, but also some categories of commercial buildings, such as for instance buildings converted from private homes to office buildings. The concept can be combined with the idea of using add-on fans. We have found that this can increase the cooling capacity by up to 34 – 75%, depending on the particular type of radiator.

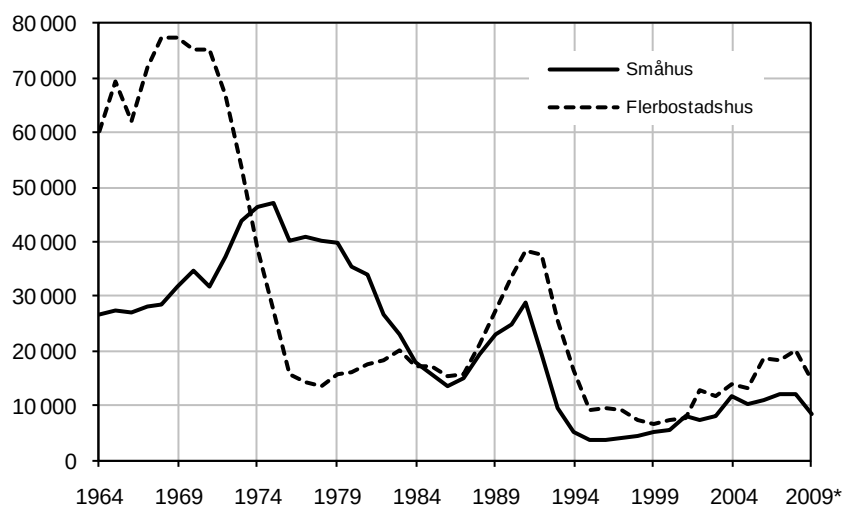
Finally, a survey has been made of two types of building integrated systems for combined heating and cooling. Combined under-floor heating and cooling provides one example, combined heating and cooling beams another. Such solutions are rather common in the USA, and they have been used in some few Swedish buildings as well. These systems are primarily relevant with new buildings or in case of a comprehensive building renovation.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	8
1.1	SYFTE	9
2	FLÄKTKONVEKTORER	10
3	FLÄKTRADIATOR	12
4	KAMELEONT-RADIATORER	15
5	TEORI – PÅTVINGAD KONVEKTION	17
5.1	VÄRMEAVGIVNING/KYLA FRÅN RADIATORER	17
5.2	STRÅLNING	17
5.3	KONVEKTION	18
5.4	LUFTHASTIGHETENS PÅVERKAN PÅ VÄRMEAVGIVNINGEN	19
5.5	INVERKAN PÅ KOMFORT	21
6	SIMULERING	23
7	FÄLTFÖRSÖK- VÄRMEAVGIVNING MED RADIATORFLÄKT	28
8	PRIMÄRTEMPERATUR-PÅVERKAN VID VÄRMEDRIFT	34
8.1	KONSEKVENSER FÖR KRAFTVÄRMEPRODUKTION	36
9	KOMBINERAD VÄRME OCH KYLA	41
9.1	KOMFORTKYLA MED RADIATORSYSTEM UTAN PÅTVINGAD KONVEKTION	41
9.1.1	Systembolagets huvudkontor	41
9.1.2	Akzo Nobel, Stenungsund	42
9.2	BYGGNADSINTEGRERADE SYSTEM FÖR VÄRME OCH KYLA	43
9.2.1	Golvkyla	43
9.2.2	Tak- och väggkyla	45
9.3	UNDERSÖKNING AV KYLA FRÅN RADIATORER MED RADIATORFLÄKT	46
10	SLUTSATSER	51
11	REFERENSER	53
11.1	INTERNETREFERENSER	54

1 INLEDNING

I den befintliga bebyggelsen sker bostadsuppvärmningen oftast med radiatorer. Vid nybyggnation har andra former av uppvärmningssystem, och då främst golvvärme, ökat i popularitet. Dock utgör den relativt gamla bebyggelsen en stor del av byggnadsbeståndet, och kommer även att göra detta på sikt. I Figur 1 är byggnadsåren för bostadshus presenterade för tidsperioden 1964 till 2009.



Figur 1: Byggnadsår för bostadshus i Sverige (1964-2009)¹.

En stor andel av de svenska flerbostadshusen är byggda före 1974, men även i slutet av åttio och början av nittioalet byggdes ett större antal flerbostadshus. För småhus gäller ungefär samma mönster, men här ligger den stora andelen något senare i tiden (fram till början av åttiotalet) än flerbostadshus. Den helt dominerande uppvärmningsformen för flerbostadshus är fjärrvärme (över 80%²). Det vanligaste uppvärmningssystemet i den befintliga bebyggelsen baseras på radiatorer. Det stora byggnadsbeståndet från 60- och 70-talet står inför omfattande renoveringar och uppdateringsbehov för att fungera som moderna bostäder.

Att sänka temperaturnivåerna för uppvärmning i den befintliga bebyggelsen är en stor utmaning, men samtidigt är det till stor nytta för fjärrvärmeföretagen. Genom sänkta temperaturprogram för uppvärmning kan inte enbart fjärrvärmens returtemperatur sänkas, utan detta ligger även till grund för en möjlig sänkning av fjärrvärmens framledningstemperatur. Ofta är dock en sänkning av temperaturer för uppvärmning förknippade med höga kostnader och omfattande ingrepp i byggnadernas uppvärmningssystem. Exempel på traditionella uppvärmningssystem

¹ Statistiska centralbyrån, Nybyggnad av lägenheter i flerbostadshus resp. småhus, hemsida: http://www.scb.se/Pages/TableAndChart____19985.aspx, besökt 2011-01-21

² A-Energi AB, <http://elementflakten.jetshop.se/>, hemsida, besökt 2010-12-16

med låga systemtemperaturer är golvvärme, lågtemperaturradiatorer och fläktkonvektorer. För att utnyttja dessa uppvärmningssystem krävs ofta omfattande omkonstruktioner av byggnaden och/eller dess värmesystem. Ett mindre vanligt alternativ är att utrusta befintliga radiatorer med fläktar för att öka värmeavgivningen och därmed möjliggöra sänkta radiatortemperaturer i befintliga värmesystem utan omfattande ingrepp eller komponentutbyte i det hydrauliska värmesystemet. Metoden bygger på forcerad konvektion till skillnad från naturlig konvektion.

Att installera komfortkyla är ofta förknippat med höga installationskostnader för befintlig bebyggelse. Genom att utnyttja befintligt värmesystem för distribution av kyla kan dessa kostnader hållas betydligt lägre. Genom att utrusta befintliga radiatorer med fläktar kan radiatorsystemet uppgraderas till ett lågtemperatursystem samtidigt som dess potential för att utnyttjas för både uppvärmning och kyla ökar. Detta är något som är lämpligt för den befintliga bebyggelsen i de fall då värmesystemet, eller byggnaden, inte står inför omfattande och kostsamma renoveringsarbeten.

I kylasammanhang där luft distributionssystem saknas används ofta fläktkonvektorer för kombinerad värme och kyla. I USA används uttrycket ”dual temperature systems” som en generell beteckning på system i vilka samma element vintertid värmer och sommartid kylar³. När det gäller vattenburna (”hydronic”) system, nämns i första hand fläktkonvektorer, men konceptet är inte snävt avgränsat till dessa, utan även golvvärme / kyla används ibland.

Att sänka temperaturerna i fjärrvärmenäten ligger idag högt uppe på agendan. För att ta ett färskt exempel: I tidskriften Fjärrvärmetidningen⁴, nummer 2 2011, återfinns flera artiklar om fjärrvärmens framtid. En av dessa artiklar fokuserar på att kraftigt sänka temperaturen i fjärrvärmenätet. En betydligt lägre framlednings-temperatur för uppvärmning av bostäder krävs för att möjliggöra låga fjärrvärme-temperaturer. Detta kan ske med golvvärme eller med stora lågtemperaturradiatorer. Detta arbete beskriver ett annat uppslag för att sänka temperaturbehovet i befintlig bebyggelse utan kostsamma ingrepp i fastigheternas värmesystem.

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete är att bana vägen för lågtemperaturfjärrvärmesystem och att introducera fjärrkyla i befintlig bebyggelse. Detta görs genom att fokusera på följande områden:

- Sänka temperaturprogrammet för befintliga värmesystem genom ökad konvektion vid radiatort. Teoretiska studier, simuleringar och fältförsök utförs för att bestämma temperatursänkningen.
- Undersöka möjligheten och finna konkreta exempel för kombinerad värme och kyla i befintliga värmesystem.
- Visa konkreta exempel på några utvalda system för kombinerad värme och kyla.
- Visa att radiatorer kan dra nytta av ökad konvektion även då de används för att kyla

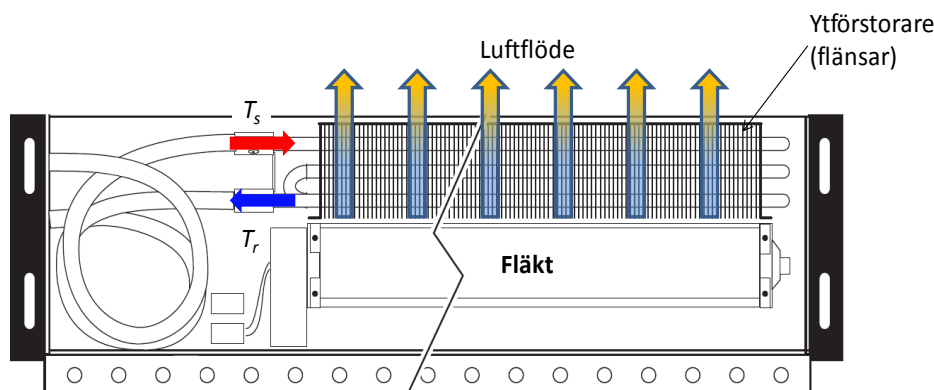
³ HVAC Systems and Equipment, ASHRAE Handbook 2008

⁴ Svensk fjärrvärme, Fjärrvärmetidningen, Tema: Framtidens fjärrvärme, nummer 2 2011, s. 28-29, 2011

2 FLÄKTKONVEKTORER

Det finns ett stort antal vattenburna fläktkonvektorer på marknaden för kombinerad kyla och uppvärmning. Detta avsnitt visar exempel på, och principen för, konventionella fläktkonvektorer för direkt rumsuppvärmning. Med direkt rumsuppvärmning manas system utan något luftburet distributionssystem för värme eller kyla.

En fläktkonvektor är en enhet som används för uppvärmning och/eller kyla. Värmeavgivningen sker med enbart påtvingad konvektion. Typiskt för en fläktkonvektor är att den består av ett rör, eller rörknippe, med ytförstorande flänsar för ökad konvektiv värmeavgivning samt en fläkt för ökad påblåsning, se Figur 2.



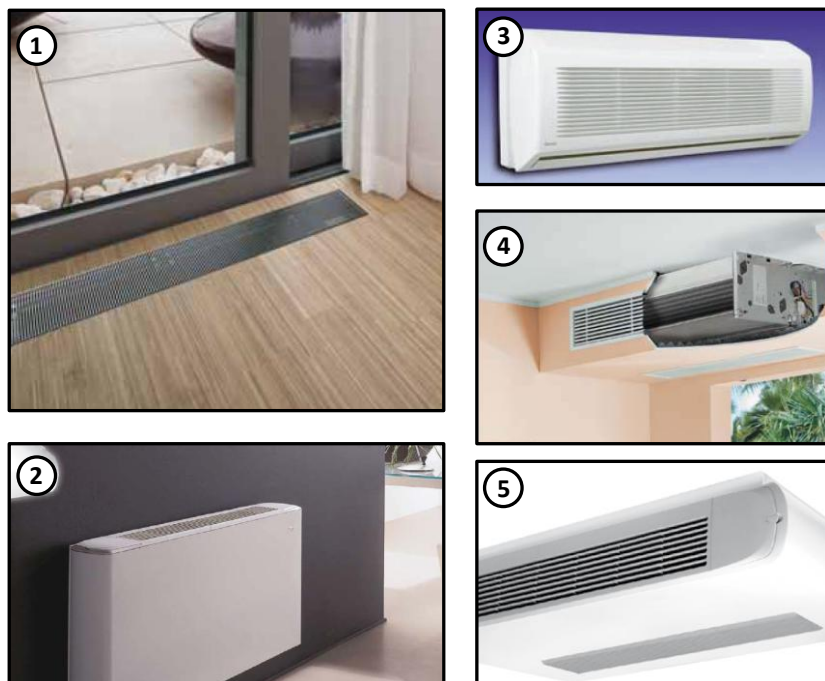
Figur 2: Principbild av en enkel fläktkonvektor. Modifierad efter Clima Canal produktkatalog⁵.

En fläktkonvektor kan se ut på många olika sätt, den kan monteras på vägg, i tak, i golv och byggas in i väggar och bänkar. Då värmeövergångstalet mellan den påblåsta luften eller det hydrauliska värmesystemet är högt är fläktkonvektorer väl lämpade för lågtemperatursystem. Ofta är fläktkonvektorena konstruerade för både uppvärmning och komfortkyla. De kan ingå i ett fyrrörssystem, där kylkretsen och värmekretsen är hydrauliskt åtskilda, även i fläktkonvektorn. Det finns även tvårör- och trerörssystem där en trevägsventil i fläktkonvektorn reglerar om den skall avge värme eller kyla. Ett system med konvektor av tvårörstyp möjliggör inte samtidig kyla och uppvärmning till skillnad från ett fyrrörssystem. Vissa modeller av fläktkonvektorer har anslutning för bortledning av kondensvatten för de driftfall då temperaturen på kylvattnet är lägre än dagpunktstemperaturen.

|

Figur 3 finns exempelbilder från produktkataloger för fläktkonvektorer från tre tillverkare.

⁵ Clima canal, Produktkatalog, nedladdad från:
http://www.bicau.ro/data/MasterLink/h35/f3438/clima_canal.pdf, 2011-05-12



Figur 3: Exempelbilder på vattenburna fläktkonvektorer; inbyggd i golv (1)⁶, Vägghmonterad (2)⁷ och (3)⁸ samt takmonterade (4)⁷ och (5)⁷.

System med fläktkonvektorer för kombinerad uppvärmning och kyla är idag en väl etablerad teknik som används på många håll, inte minst i värmepumpssammanhang där nattkyla utomhus utnyttjas.

I befintliga värmesystem är det dock kostsamt och kräver vissa hydrauliska ingrepp för att ersätta befintliga fungerande radiatorer med fläktkonvektorer. I dessa befintliga radiatorsystem kan den konvektiva värmeövergången ökas genom en ökad påblåsning. En radiator kompletterad med fläkt kallas här för fläktradiator. Med det avses kombinationen av befintliga radiatorer kompletterade med fläktar. På så vis erhålls en hybrid mellan rena fläktkonvektorer och radiatorer.

⁶ Epecon, Clima Canal, Produktblad, http://www.epecon.se/flash/pdf/proj/Micro%20Canal%20-%20Technical_handbook%20Engelska%202011-04.pdf, 2011-05-12

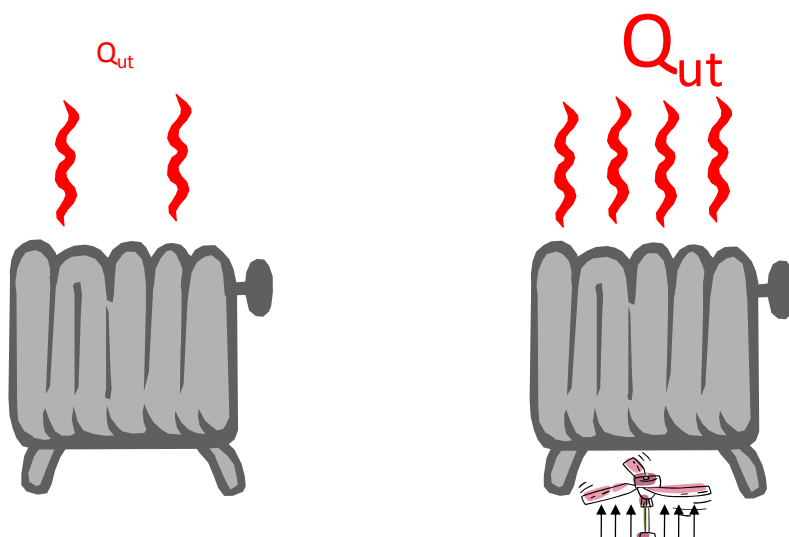
⁷ Eveco, Produktblad, Fläktkonvektorer för värme och eller kyla, nedladdad från: <http://www.eveco.se/Universale.html>, 2011-05-12

⁸ Carrier, Produkblad, <http://www.carrierab.se/produktblad/Carrier-fancoils.pdf>, 2011-05-12

3 FLÄKTRADIATOR

Genom att förse en befintlig radiator med en fläkt kan man öka värmeavgivningen. Vi har valt att använda ordet ”fläktradiator” för detta.

Se Figur 4 för en principbild av en radiator med fläkt för ökad värmeavgivning. Undersökningen av den ökade värmeavgivningen från radiatorer med radiatorfläktar är genomförd som en experimentell studie i ett befintligt radiatorsystem och med simuleringar. Även möjligheten för att använda radiatorfläkt för kyla har undersökts i fjärrvärmelaboratoriet på LTH.



Figur 4: Principbild av ökad värmeavgivning med ökad påblåsning på radiatorer.

Att öka värmeavgivningen från befintliga radiatorer med fläktar för ökad påblåsning är ingen ny idé, redan 1977 presenterade Brumm denna idé i som en lämplig metod för att minska temperaturprogrammet för befintliga värmesystem⁹. Dock har inte utnyttjande av fläktar för ökad värmeavgivning haft någon större genomslagskraft på den kommersiella marknaden tills nyligen. Vi har vi identifierat tre produkter (Flätkassetten FLK¹⁰, Elementfläkten¹¹, RadiatorBooster¹²) som bygger på iden med att öka den konvektiva värmeavgivningen från en befintlig radiator påblåsning. Dessa tre produkter ser lite olika ut, FLK och flätkassetten bygger på fläktar som monteras eller placeras under radiatören och som sedan blåser luft uppåt längs radiatorytan. Radiator Booster är en plastlåda med en fläkt i ena ändan. Denna låda läggs ovanpå radiatören. Fläkten suger sedan luft som måste passera längs radiatorytan. Den

⁹ Brumm, W.: Fragen der Temperaturspreizung, Fernwärme international, 6. Jahrgang, Heft 3, s. 129-133, 1977

¹⁰ Pyrox, FLK, Produktkatalog, nedladdad från <http://www.pyrox.se/pdf/FLK.pdf>, 2010-12-16

¹¹ A-Energi AB, <http://elementflakten.jetshop.se/>, hemsida, besökt 2010-12-16

¹² Radiator Booster: <http://www.radiatorbooster.com>, besökt 2011-03-16

uppvärmda luften blåses sedan ut i sidan av lådan. Dessa produkter och ett antal hemmabyggda varianter som bygger på dessa principer diskuteras bland annat på Värmepumpsforum, se exempel diskussionstråden "*Har nogen erfaringer med Elementflækten?*"¹³. Huvudlinjerna i diskussionen går ut på att få ut mera värme från radiatorerna i vissa rum, där värmeavgivningen inte längre är tillräcklig med de nya lägre temperaturnivåerna som används då fastigheten konverterats till värmepumpsdrift. Erfarenheter från detta forum tyder på att ökad påblåsning på radiatorer ger en ökad värmeavgivning.

Se

Figur 5 för bilder på tre produkterna för att öka värmeavgivningen från befintliga radiatorer.



<http://www.varmepumpsforum.com/vpforum/index.php?topic=25625.0%3Ball>



Elementflækten, från A-Energi AB



<http://www.ekoprylar.se/butik/energiforbrukning/56-elementflakt.html?gclid=CN73h-f00KcCFYm-zAodSDpXDA>

Figur 5: Produktöversikt på olika metoder för att öka värmeavgivningen från befintliga radiatorer. Överst till vänster: Fläkt av samma typs som FLK. Underst till vänster: Radiatorbooster. Till höger: Elementflækten

I detta arbete har produkten Elementflækten används för fält- och laboratorieförsök eftersom vi hittade den först och den var lättillgänglig. Samtliga produkter bygger dock på samma princip. Sannolikt kan alla tre produkterna vidareutvecklas. Exempelvis kunde Elementflækten effektivitet ökas genom om luftflödet från fläktarna fördelades jämnare över radiatorns bottenyta. Vidare kan det vara en nackdel med att blåsa underifrån (istället för att suga luften ovanifrån) eftersom luftströmmen på radiatorns framsida snabbt viker av och därmed endast verkar på radiatorytan i botten på radiatorn där temperaturen är betydligt lägre än på dess ovansida.

¹³ Värmepumpsforum : <http://www.varmepumpsforum.com/vpforum/index.php?topic=20594.0>, besökt 2011-03-15

I det fortsatta arbetet när en radiatorfläkt nämns i samband med resultat eller försök är det produkten Elementfläkten som avses.

4 KAMELEONT-RADIATORER

På senare år har det växt fram en marknad för såkallade ”estetiska radiatorer”. De kan se ut på många olika sätt; några signalerar t ex lugn kvalitetsmedvetenhet, andra vild kreativitet, se fig. 6.

Även om vår undersökning koncentrerats till rent tekniska frågeställningar har vi för en stund försökt släppa loss fantasin och ställt oss frågan: Hur skulle en estetisk radiator, som är i linje med våra tekniska överväganden och som lyftar fram just fjärrvärme och fjärrkyla, kunna se ut?

Ett av hindern för att utöka den totala radiatorytan i en befintlig fastighet är att det kan vara svårt att hitta platsen, i synnerhet om det finns estetiska begränsningar. Många tycker radiatorer är fula och kan till nöds acceptera dem under fönster, där de i större eller mindre utsträckning kan gömmas bort. Att då föreslå placering av en stor radiator som tekniskt-ekonomiskt visserligen är väl motiverat, men där den kommer att bli iögonfallande, kan således verka provocerande.

Estetiska radiatorer, som vänder på steken, som lyftar fram något vackert i stället för att dölja något fult, kan vara lösningen.



Figur 6: Exempel på ”estetiska” radiatorer i marknaden, en lugn och en ”vild” variant.

Figur 7 visar ett uppslag i den andan. Radiatorn kan likt kameleonten byta utseende beroende på vad som för stunden är fördelaktigt. Således har den på sommaren, när den kylar, en sval, blå färg, och på vintern, när den värmer, är den röd. Som option kan det finnas ett diskret logo som skiftar från: ”Fjärrkyla Ja Tack!” till

”Fjärrvärme Ja Tack”; för den som inte gillar sådan reklam ska optionen på enkelt sätt kunna bortkopplas.

Återstår att bestämma hur en sådan lösning kan åstadkommas på ett billigt och robust sätt. Men när man länge kunnat tillverka falska spisar som visar konstgjorda lågor, borde det med modern teknik inte vara speciellt svårt att klara av den sidan av saken. De optiska kraven ligger inte alls i samma nivå som fordras när det gäller TV-skärmar.



Figur 7: "Kameleont-radiator" – sval och blå på sommaren – varm och röd på vintern.

5 TEORI – PÅTVINGAD KONVEKTION

Detta avsnitt är en teoretisk genomgång hur värmeavgivningen från en radiator påverkas av påtvingat luftflöde. Samma teori som presenteras gäller även för kyl drift.

I detta avsnitt approximeras radiatoren som en platt vertikal yta. Längden (L) på plattan har ansatts till 1 m och höjden (h) till 0,59 m. Inomhustemperaturen (T_i) antas vara konstant 21°C. Det är även denna temperatur som strålningsutbytet sker med ($T_i = T_{inf}$).

5.1 Värmeavgivning/kyla från radiatorer

Värmeavgivningen från en vanlig radiator kommer från konvektion och strålning. Ekvation (1) beskriver värmeavgivningen från radiatorvattnet till rummet^{14, 15}.

$$Q = \dot{m}_s \cdot c_p (T_s - T_r) = (k \cdot A) \Delta \theta \quad (1)$$

k är den totala värmetransmissionskoefficienten från vattnet till metallen, värmeledning genom metallen och värmeövergången (konvektion och strålning) från radiatorytan till rummet. Detta beskrivs i ekvation (2).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{water-metal}} + \frac{\delta_{metal}}{\lambda_{metal}} + \frac{1}{\alpha_{conv} + \alpha_{rad}} \quad (2)$$

De dominerande faktorer i den totala värmeövergångskoefficienten består av konvektion och strålning mellan radiatoren och rummet (α_{conv} och α_{rad}). Resterande termer kan, i detta fall, försummas. Detta leder till att ett nytt förenklat samband för värmeavgivningen, se ekvation (3).

$$Q = Q_{rad} + Q_{conv} = \alpha_{conv} \cdot A_{radiator} \cdot \Delta \theta + \alpha_{rad} \cdot A_{rad} \cdot \Delta \theta \quad (3)$$

Där $A_{radiator}$ är den totala radiatorytan, A_{rad} är den effektiva strålningsarean och $\Delta \theta$ är den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan radiatorytan och omgivningen. $\Delta \theta$ beräknas enligt ekvation (4).

$$\Delta \theta = \frac{T_s - T_r}{\ln \frac{T_s - T_i}{T_r - T_i}} \quad (4)$$

5.2 Strålning

Enligt Trüschel kan värmeavgivningen från en radiator beskrivas enligt ekvation (5).

¹⁴ Myhren, J. A. , Holmberg, S.: "Design consideration with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators", Energy and buildings 41, s. 92-100, 2009

¹⁵ Trüschel, A.: "Värmesystem med luftvärmare och radiatorer, En analys av funktion och prestanda", Licentiatavhandling, Chalmers, Göteborg, 1999

$$Q_{rad} = \alpha_{rad} \cdot A_{rad} \cdot \Delta\theta \approx \approx 4 \cdot \frac{\varepsilon_{rad} \cdot \sigma}{\varepsilon_{rad} + \frac{A_{rad}}{A_{radiator}} \cdot (1 - \varepsilon_{rad})} \cdot T_m^3 \cdot A_{rad} \cdot \Delta\theta \quad (5)$$

där temperaturen, T_m , är medeltemperaturen av radiatorytan och ytorna i rummet, se ekvation (6). För en enkel panelradiator är kvoten $A_{rad}/A_{radiator}=1$ ¹⁶.

$$T_m = \frac{\overline{T_{radiator}} + \overline{T_{rum,yta}}}{2} \approx \frac{(T_s + T_s)/2 + T_i}{2} \quad (6)$$

Eftersom A_{rad} och emissiviteten, ε_{rad} , är konstanter för en specifik radiator kan värmeavgivningen från strålningen förenklas enligt ekvation (7).

$$Q_{rad} \approx C \cdot T_m^3 \cdot \Delta\theta \quad (7)$$

5.3 Konvektion

Den konvektiva värmeövergången som uppstår på grund av temperaturskillnaden mellan radiatorytan och den omgivande luften är en funktion av Nusselttalet (Nu):

$$\alpha_{conv} = Nu \cdot \lambda / h \quad (8)$$

Värmeavgivningen från konvektion är uppdelad i tre olika grupper, naturlig, mixad, och påtvingad (forcerad) konvektion.

För naturlig konvektion är Nusselt talet beroende av Rayleigh talet (Ra), vilken är en produkt av Prandtl talet (Pr) och Grashof talet (Gr), se ekvation (11). För luft kan Pr anses vara konstant, $Pr=0.71$, och

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta\theta \cdot \frac{h^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$\beta = 1/T_{inf} \approx 1/T_i \quad (10)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (11)$$

där g är gravitationskraften, ν är den kinematiska viskositeten och β är koefficienten för expansion.

Det finns ett metoder för att beskriva Nusselt talet. I denna studie används en metod beskriven av Churchill¹⁷, se ekvation (12) och (13).

¹⁶ Trüschell, A.: "Värmesystem med luftvärmare och radiatorer, En analys av funktion och prestanda", Licentiatavhandling, Chalmers, Göteborg, 1999

¹⁷ Churchill, S. W.: "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, s. 1323-1329, 1975

$$\overline{Nu} = 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra^{0.25}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad Ra < 10^9 \quad (12)$$

$$\overline{Nu}^{0.5} = 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad Ra > 10^9 \quad (13)$$

För påtvingad konvektion används ekvationerna (14) och (15) beskrivna av Holman¹⁸.

$$\overline{Nu} = 0.664 Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \quad Re < 5 \cdot 10^5 \quad (14)$$

$$\overline{Nu} = Pr^{1/3} \cdot (0.037 \cdot Re^{0.8} - 871) \quad 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \quad (15)$$

Värdet av Gr/Re^2 avgör vilken typ av konvektion som är dominerande. Om $Gr/Re^2 > 10$ är naturlig konvektion dominerande, då $Gr/Re^2 \approx 1$ både naturlig och påtvingad konvektion är av betydelse för värmeövergången, och då $Gr/Re^2 < 1$ påtvingad konvektion är dominerande. När både naturlig och påtvingad konvektion påverkar värmeövergången används ett viktat Nusselt tal. Nusselt talet kan viktas enligt sambandet i ekvation(16)¹⁹.

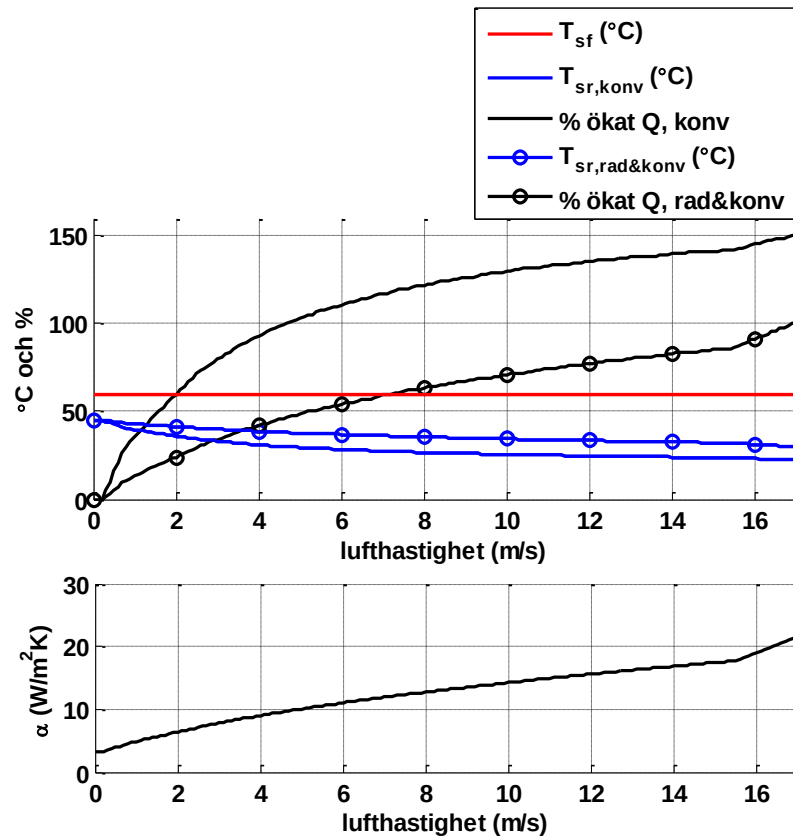
$$\overline{Nu} = (\overline{Nu}_{påtvingad}^3 + \overline{Nu}_{naturlig}^3)^{1/3} \quad (16)$$

5.4 Lufthastighetens påverkan på värmeavgivningen

Teoretiska beräkningar, baserade på ovan presenterad teori, för värmeavgivningen från en radiator vid olika påblåsningshastigheter visas i Figur 8 och Figur 9. Värmeavgivningen som funktion av påblåst lufthastighet visas i Figur 8 för en radiator designad för ett 60/45°C temperaturprogram. Beräkningen är utförd med en konstant framledningstemperatur på 60°C. Flödet genom radiatoren är även det konstant. I Figur 8 visas värmeavgivningen för två fall, ett med endast konvektion, ett med värmeavgivning från både konvektion och strålning. För beräkningen med värmeavgivning från strålning har emissiviteten satts till $\varepsilon=0.9$. Andelen av värmeavgivningen från strålning blir då 65 % vid DUT.

¹⁸ Holman, J. P.: "Heat transfer", 9th edition, 2002

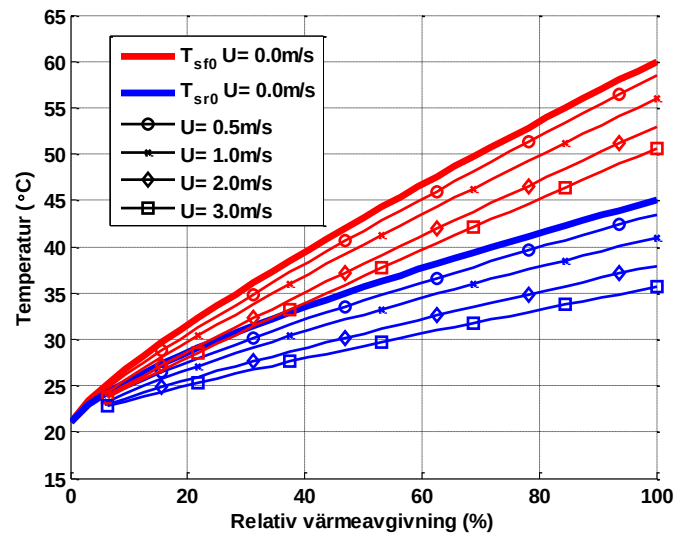
¹⁹ Sundén, B., Personlig kommunikation med Professor B. Sundén, April 2010



Figur 8: Beräknad ökad värmeavgivning som funktion av lufthastigheten. $T_{ss}=60^{\circ}\text{C}$, $T_{sr0}=45^{\circ}\text{C}$, m_s oförändrad.

Som ses i Figur 8 så ökar värmeavgivningen från konvektion kraftigt då lufthastigheten ökar. Då värmeavgivningen från strålning tas med är ökningen inte lika kraftig vilket beror på att medeltemperaturen, T_m , på radiatoren sjunker, se ekvation (7).

Då värmeavgivningen ökar med ökad lufthastighet kan framledningstemperaturen till radiatoren sänkas utan att värmeavgivningen förändras. I Figur 9 är nya radiatorprogram beräknade för fyra olika lufthastigheter. Temperaturlast påverkan av påblåst lufthastighet är större för högre relativ värmelast.



Figur 9: Nya temperaturprogram för radiatorn för fyra olika lufthastigheter. Röda linjer: T_{sf0} , Blå linjer: T_{sr0} . $Q_{rad,0}=65\%$ vid DUT.

Beräkningarna av värmeövergången från en radiator bygger på ett antal antaganden: Värmeavgivningen från radiatorytan är lika stor från radiatorns fram- och baksida. Lufthastigheten antas vara jämnt fördelad över hela radiatorns höjd och bredd. Så är naturligtvis inte fallet i verkligheten med radiatorfläktar. Dock kan resultaten från en verklig radiatorfläkt förväntas följa samma mönster.

5.5 Inverkan på komfort

De tidigare avsnitten visar att samtidigt som radiatorernas prestanda ökar vid påtvingad konvektion så ökar lufthastigheterna vid radiatorn och strålningen minskar i och med att radiatorns ytemperatur minskar. Man kan undra hur detta påverkar rummets termiska komfort.

Termisk komfort betyder att människan upplever jämvikt med omgivande klimat. Det känns varken för kallt eller för varmt, man känner ingen dragkänsla eller obehaglig temperaturskillnad. För att detta ska upplevas måste en mängd olika parametrar vara i balans, bl a:

- inte för stora luftrörelser
- lagom strålning från t ex värmekällor ytor mot människan eller från människan mot kallare ytor
- lufttemperaturen får inte vara för hög eller låg
- ytemperaturer på t ex golv och väggar får inte vara för hög eller låg

Fler faktorer finns men i vårt fall är det luftrörelserna och värmekällornas strålning som påverkas varför vi kort får diskutera dessa. Ett vanligt förekommande krav är att

²⁰ SP: "Fönster, Fukt & Innemiljö; Kyla och drag"

den genomsnittliga lufthastigheten i rummet inte ska överskrida 0,15 m/s ²¹. I simuleringar längre fram förutsätter vi därför en genomsnittlig lufthastighet på 0,1 m/s, för att hindra att drag upplevs.

När en person klagar på drag beror det dock inte alltid på för höga lufthastigheter, utan har istället att göra med strålningsdrag, det vill säga förhållandet när den varmare människan avger värme genom strålning mot kallare ytor som till exempel dåligt isolerade ytterväggar, fönster och balkongdörrar. Detta förhållande kan således vara anledningen att fönster kan påverka känslan av drag i en byggnad. Den svalare fönsterytan ”strålar kyla” mot människor i närheten (skillnad i strålningstemperatur på fönsterytan respektive människans hud) vilket upplevs som drag (strålningsdrag) om temperaturskillnaden är för stor. Om luftens temperatur utefter inre fönsterytan är tillräckligt låg uppstår en nedåtgående luftström, ett kallras, som ibland blir stort nog för att upplevas som drag. En radiator placerad under fönstret skapar en motverkande luftrörelse av varmluft, en varmluftpływ, vilket förhindrar att drag uppstår intill fönster ²².

I vårt fall ökar lufthastigheten längs fönsterytan något vilket ökar ytans temperatur och minskar strålningsdraget. Att radiatorytans temperatur sjunker har mindre betydelse eftersom temperaturen är högre än människokroppens ytemperatur. Däremot förbättras luftomblandningen i rummet vilket borde leda till jämnare ytemperatur på golv, tak och väggar samt mindre temperaturskillnad mellan olika luftskikt i höjdlid. Därför anser vi att ökad värmeavgivning från en radiator genom påtvingat luftflöde såsom beskrivs här kan ge viss förbättring av den termiska komforten i rummet.

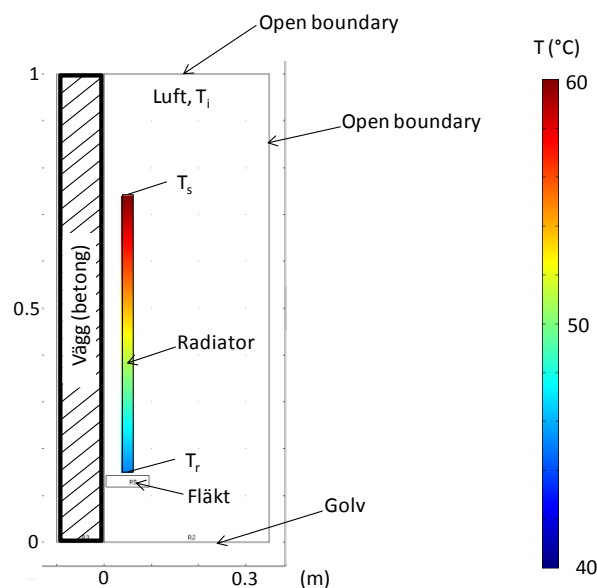
²¹ Socialstyrelsens allmänna råd om temperatur inomhus, SOSFS 2005:15

²² SP: ”Fönster, Fukt & Innemiljö; Kyla och drag”

6 SIMULERING

Fältförsöken över värmeavgivningen från radiatorer med radiatorfläkt har begränsningar i vilka temperaturer och för vilka fläkthastigheter som de är utförda för. Genom CFD-simuleringar av en radiator med radiatorfläkt kan fläkthastigheten varieras fritt. Även framledningstemperaturen till radiatorerna kan väljas fritt, vilket innebär att returtemperaturer från radiatorerna kan beräknas i det fall då framledningstemperaturen till radiatorerna bibehålls och radiatorflödet sänks för att kompensera för den ökade värmeavgivningen. Detta resulterar i sänkta returtemperaturer från radiatorerna.

För simulering av radiatorn med fläkt för ökad värmeavgivning har programvaran COMSOL använts. Modellen är en 2-dimensionell modell av en förenklad panelradiator. Se Figur 10 för illustration av den modellerade radiatorn. En detaljerad redovisning av modellen och validering av densamma återfinns i en konferensartikel²³ och i en institutionsrapport av Wijst²⁴.



Figur 10: Modell av radiator i COMSOL.

Modellen av radiatorn är förenklad och bygger på ett antal antagande: inga värmeförluster genom ytterväggen, konstant golvtemperatur (21°C), linjärt temperaturfall genom radiatorn samt ett jämt fördelat luftflöde från fläkten.

²³ Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.: "Heat Output from Space Heating Radiator with Add-on-fan Blowers" Conference proceeding from COMSOL – conference, Paris, Frankrike, 2010

²⁴ van der Wijst, R.P.M.M: "Improved performance of hydronic heating systems connected to district heating" Energivetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2011

Inomhustemperaturen är satt till 21°C. Den modellerade värmeavgivning från radiatoren uppkommer från strålning, naturlig- och påtvingad konvektion. Fläkten representeras av en låda där en vertikal fläktkraft appliceras (F_y).

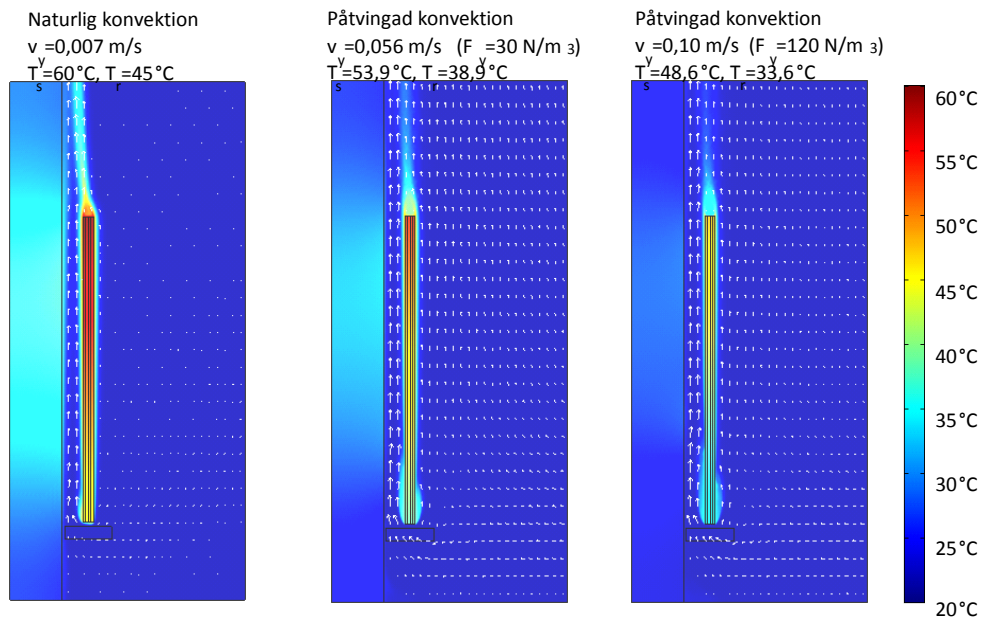
Den modellerade radiatorns mått är 1×0,59×0,02 m (b×h×d). Måtten på lådan som representerar fläkten är 0,090×0,025×0,09 (b×h×d). Tabellvärde från Lenhovda radiatorfabrik²⁵ ger en enkel panelradiator med dessa mått en värmeavgivning på 330W vid 60/45°C. Denna värmeavgivning stämmer väl överens med den simulerade värmeavgivningen, 349 W. Emissiviteten på den simulerade radiatoren är satt till 0,9.

Modelleringen av värmeavgivningen med radiatorfläktar sker enligt två olika reglerstrategier:

- Framledningstemperaturen till radiatoren sänks samtidigt som flödet genom radiatoren bibehålls enligt original injustering.
- Framledningstemperaturen till radiatorerna bibehålls enligt ordinarie radiatorkurva och radiatorflödet genom radiatorerna sänks.

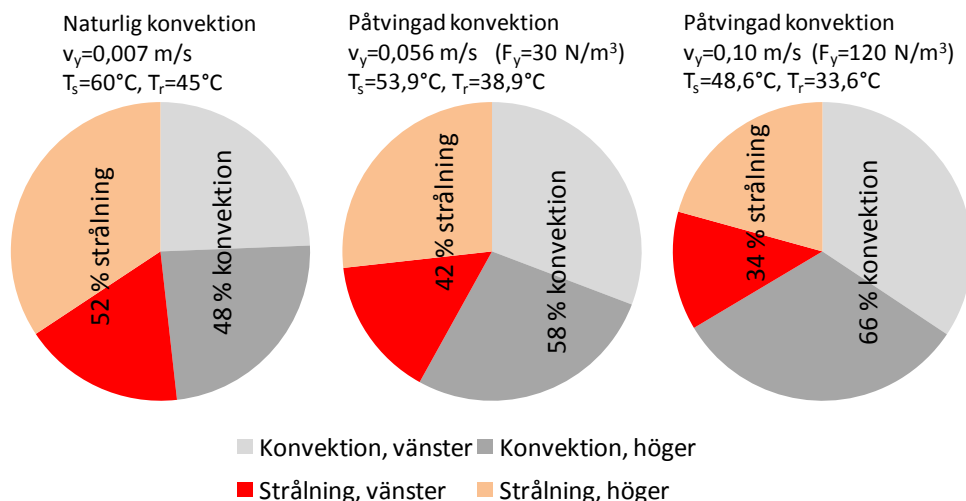
Simuleringarna utgår från en radiator med ordinarie temperaturprogram injusterat till 60/45°C. Vid fläktdrift ökar värmeavgivningen och radiatortemperaturen kan sänkas. Figur 11 visar temperaturprofilen för värmeavgivningen vid DUT för en radiator med endast naturlig konvektion och för två olika fläkthastigheter. Som synes i figuren kan radiatortemperaturen sänkas vid fläktdrift utan att värmeavgivningen minskas. I exemplet i Figur 11 är flödet genom radiatoren oförändrat.

²⁵ Lenhovda radiatorfabrik: http://www.lenhovdaradiatorfabrik.se/display_sub.asp?apid=20, 2010-04-16, Nerladdat Excel ark för beräkning av värmeavgivning



Figur 11: Simulerad temperaturprofil på radiatortytan vid naturlig och påtvungad konvektion. Värmeavgivningen är 349 W för samtliga fall. Simulerat radiatorflöde är 0,0056 l/s, vilket ger en avkylning på 15°C för radiatorvattnet. V_y avser luftflödet i y-riktning som passerar genom fläkten. Vita pilar i figuren visar riktning för luftflödet.

Då temperaturen på radiatorytan sänks förändras även förhållandet mellan avgiven värme från strålning och konvektion. Från att vid naturlig konvektion vara ungefär lika stor värmeavgivning från konvektion och strålning minskar andelen värmeavgivning från strålning då fläktarna är i drift, se Figur 12. I figuren är värmeavgivningen och flödet genom radiatortytan den samma för alla tre fallen.



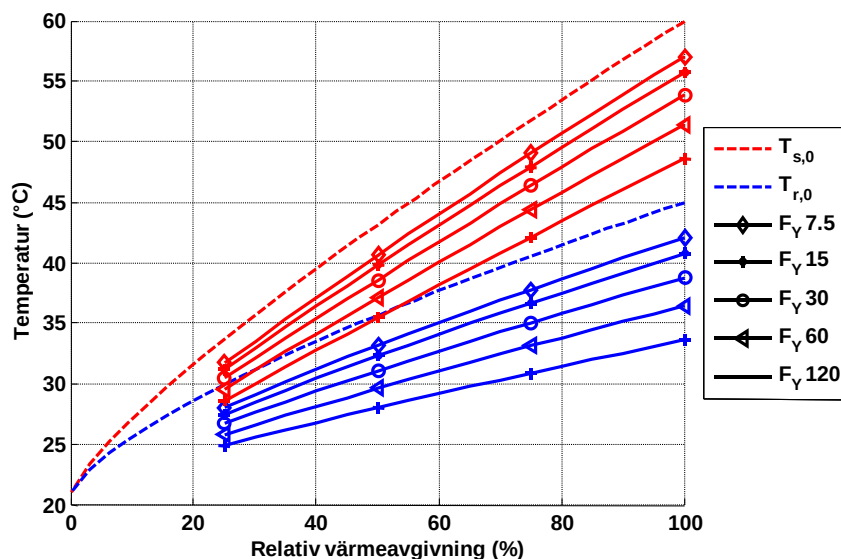
Figur 12: Simulerad värmeavgivning från strålning och konvektion med och utan radiatorfläkt. Värmeavgivningen är 349 W för amtliga fall. Simulerat radiatorflöde är 0,0056 l/s, vilket ger en avkylning på 15°C för radiatorvattnet. I figuren avser vänster radiatorytan mot väggen och höger mot rummet.

Genom simuleringar har nya radiatorkurvor beräknats, se Figur 13 och Figur 14. För varje reglerstrategi är fem olika fläkthastigheter simulerade. Temperaturprogrammen för respektive fläkthastighet är beräknad så att samma värmeavgivning erhålls som vid naturlig konvektion.

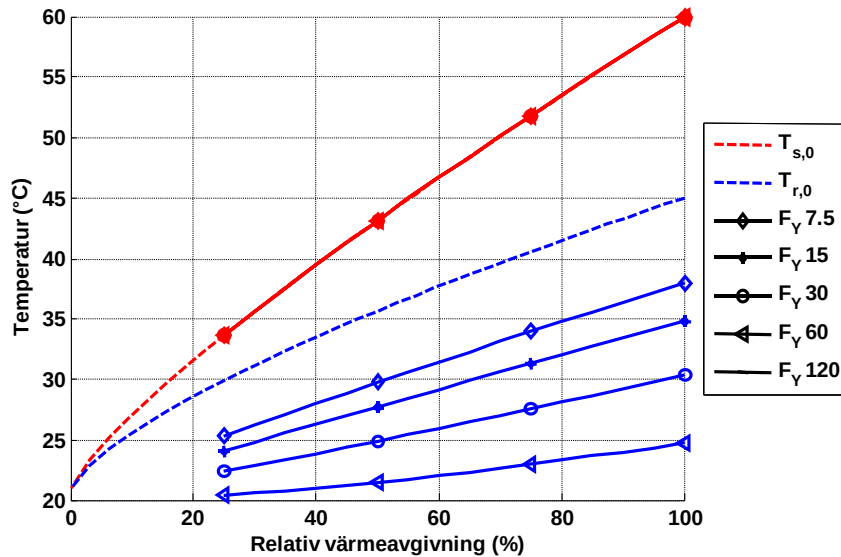
Med en antagen verkningsgrad på 10% för fläkten utgör elbehovet för fläktdrift mellan 0,01 och 1% av avgiven värme vid DUT, se Tabell 1.

Tabell 1: Simulerat arbete och elanvändning för fläktarna .

Vertikal fläktkraft	Luft, volymflöde	Differenstryck Δp	$P_{\text{fläkt}}, \eta=0,1$	$P_{\text{fläkt}}, \eta=0,1$
$F_y \text{ (N/m}^3\text{)}$	$V_{\text{luft}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$\text{(N/m}^2\text{)}$	(W)	(% av DUT)
7,5	0,025	0,11	0,03	0,01
15	0,036	0,26	0,09	0,03
30	0,051	0,55	0,28	0,1
60	0,073	1,12	0,81	0,25
120	0,104	2,23	2,31	1



Figur 13: Simuleringsresultat, sänkt temperaturprogram för panelradiator med radiatorfläkt. Radiator flöde enligt 60/45°C injustering.



Figur 14: Simuleringsresultat, sänkt radiator returtemperatur för panelradiator med radiatorfläkt. Radiator framledningstemperatur enligt 60/45°C injustering.

Då det gäller resultaten presenterade i Figur 14 har antagandet om linjär temperaturprofil över radiatoren en större inverkan på resultat. Detta gäller framförallt vid höga fläkthastigheter då temperaturfallet över radiatoren är stort. Därför skall de beräknade returtemperaturerna med sänkta radiatorflöden beaktas med viss försiktighet.

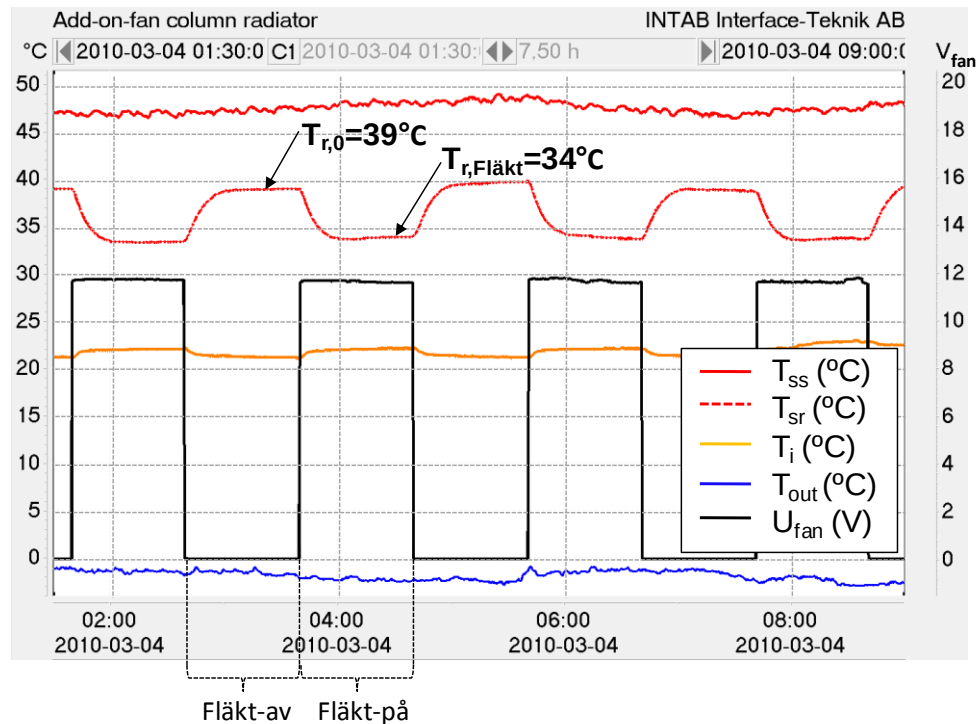
7 FÄLTFÖRSÖK- VÄRMEAVGIVNING MED RADIATORFLÄKT

För att undersöka den ökade värmeavgivningen från radiatorer med radiatorfläkt har en panelradiator och en sektionsradiator utrustats med radiatorfläktar från A-energi AB (elementfläkten). Se Figur 15.



Figur 15: Radiatorfläkt monterad på sektionsradiator (till vänster) och panelradiator (till höger).

Försöken är utförda i två olika kontorsutrymmen på LTH. Elektriciteten till fläktarna är på- och avslagen automatiskt enligt ett fast schema. Fram och returtemperaturen för radiatorerna är uppmätta och loggade. Flödet genom radiatorn är under försöken oförändrat då termostatventilerna på radiatorerna är demonterade. Se Figur 16 för mätresultat från fältförsök med sektionsradiatorn.



Figur 16: Mätdata från fältförsök med panelradiator. Där T_{ss} är framledningstemperatur och T_{sr} är returtemperatur från radiatorerna.

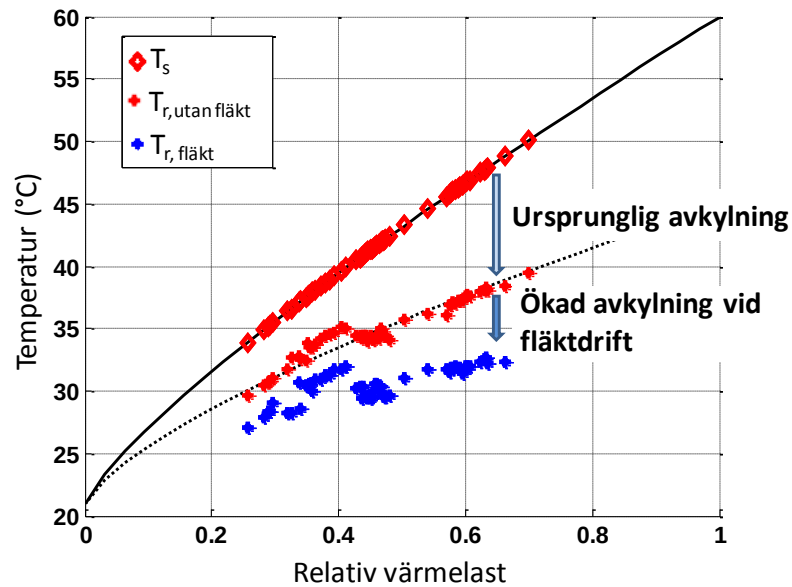
Som syns i figuren sjunker returtemperaturen från radiatorn markant då fläkten är i drift. Detta innebär att värmeavgivningen från radiatorn har ökat. I mätexemplet ovan ökar värmeavgivningen från radiatorn med över 60% då radiatorfläkten är i drift. I fältförsöken är fläktarna testade för två olika spänningar, se Tabell 2 för fläktarnas elbehov under fältförsöket.

Tabell 2: Fläktarnas elanvändning i fältförsöket.

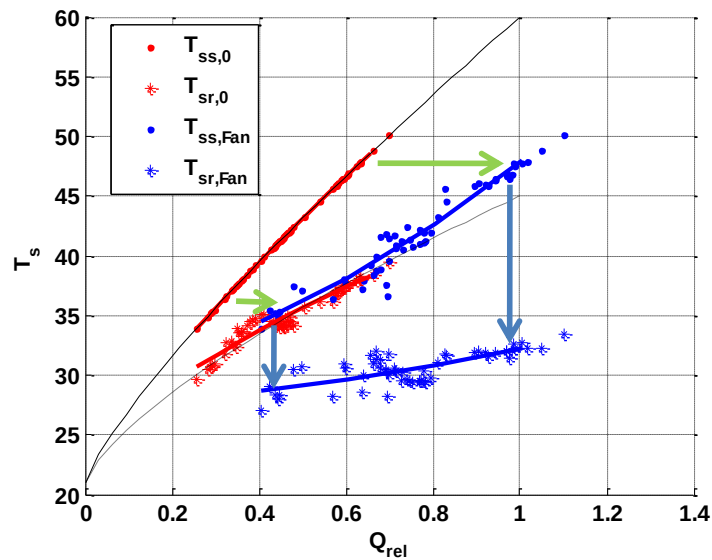
	P_{fan}	$Q_{DOT, 60/45^{\circ}C}$	% el av DOT
	(W)	(W)	
sektionsradiator	3	430	0,7%
	2,2		0,5%
Panelradiator	2,7	360	0,8%
	1,9		0,5%

Den ökade värmeavgivningen från radiatorerna innebär att radiatorn med fläktarna i drift fungerar som en överdimensionerad radiator, se Figur 17. Detta innebär att värmeavgivningen från radiatorerna måste minskas för att undvika övervärmning av rummet. Detta kan ske enligt två strategier, eller av en kombination av dessa; 1) Sänkning av framledningstemperatur med bibehållet flöde. 2) Sänkning av radiatorflödet med bibehållen framledningstemperatur. I detta avsnitt beräknas de nya

radiatorkurvorna som radiatorfläkten möjliggör enligt strategi 1. Se Figur 18 för illustration av beräkningsgången för de nya radiatorkurvorna.

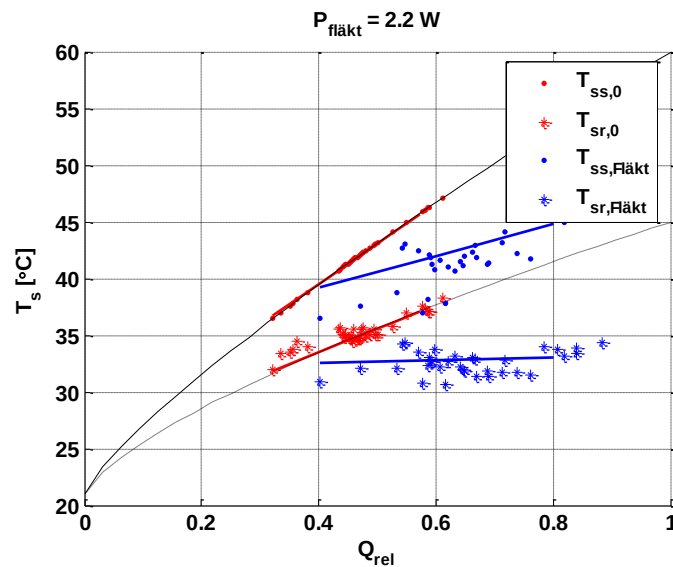


Figur 17: Ökad värmeavgivning från en radiator vid fläktdrift.

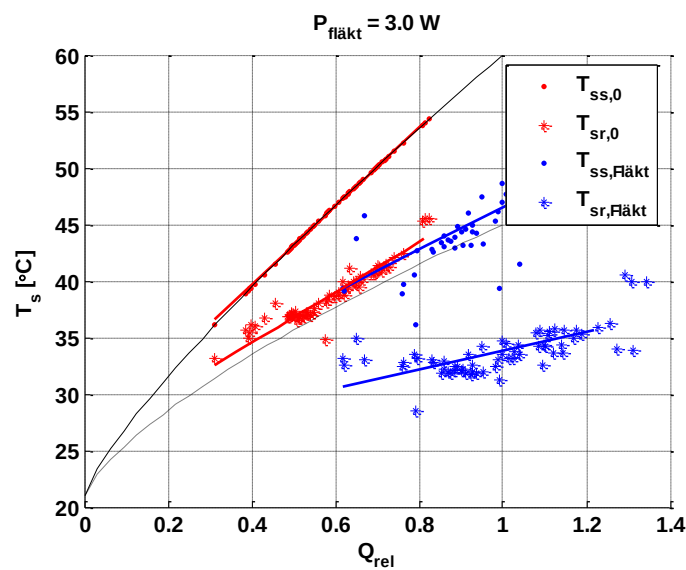


Figur 18: Beräkningsgång för nya radiatorkurvor med radiatorfläkt.

En sammanställning av resultatet för möjliga systemtemperaturkurvor för de olika radiatorerna med radiatorfläkt finns presenterade i Figur 19 till Figur 22.

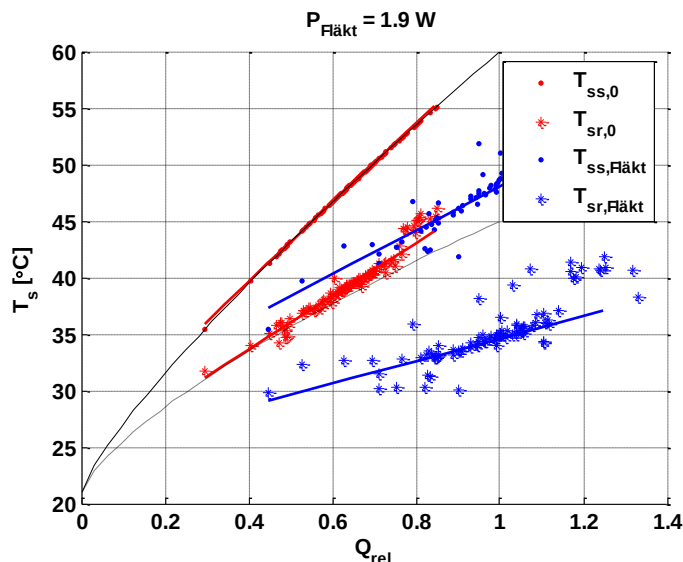


Figur 19: Nya radiatorkurvor för sektionsradiatorn vid den lägre testade fläkthastigheten ($P_{\text{fläkt}}=2,2$ W).

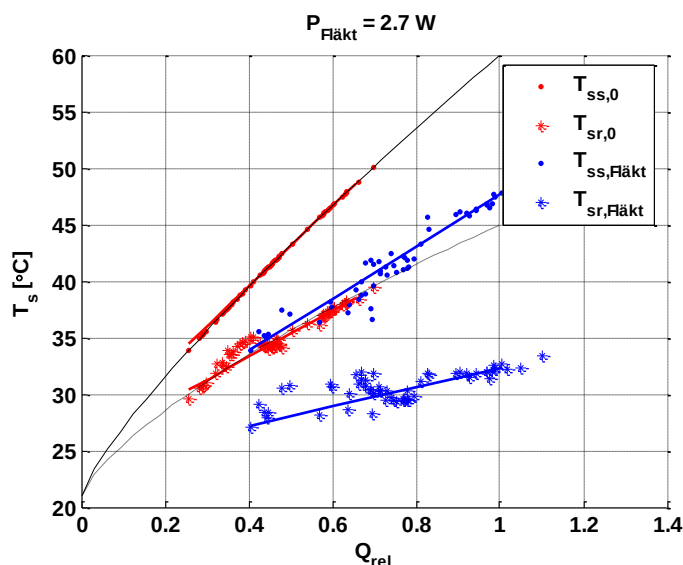


Figur 20: Nya radiatorkurvor för sektionsradiatorn vid den högre testade fläkthastigheten ($P_{\text{fläkt}}=3,0$ W).

Som synes i figurerna för nya systemtemperaturer kan radiatorfläkten möjliggöra betydligt lägre temperaturnivåer i radiatorsystemet. Mätdata från fältförsöken som Figur 19 till Figur 22 bygger på täcker inte hela uppvärmningssäsongen. Vidare vore fler mätpunkter önskvärt, vilket är speciellt tydligt för sektionsradiatorn med den lägre fläkthastigheten.



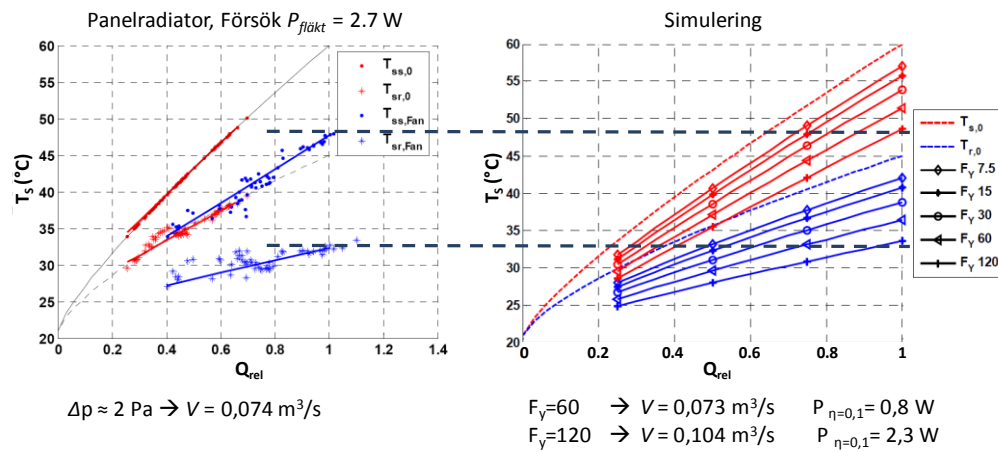
Figur 21: Nya radiatorkurvor för panelradiatorn vid den lägre testade fläkthastigheten ($P_{fläkt}=1,9$ W).



Figur 22: Nya radiatorkurvor för panelradiatorn vid den högre testade fläkthastigheten ($P_{fläkt}=2,7$ W).

De lägre radiatortemperaturerna påverkar avkylningen av primärvattnet i fjärrvärmecentralen. Det sänkta temperaturbehovet som fläkt radiatorerna bidrar till för uppvärmningsändamål möjliggör även en sänkning av den primära framledningstemperaturen utan att primärflödet genom fjärrvärmecentralen ökar. Beräknad sänkning av årlig flödesviktad primär returtemperatur uppgår till mellan 0,8 och 5,7°C där det högre värdet är för sektionsradiatorn med den högre fläkthastigheten. Möjligheten att sänka den primära framledningstemperaturen utan att öka flödet i fjärrvärmenätet är av samma storleksordning.

Vid en jämförelse av temperaturprogram för en panelradiator från fältförsök och de simulerade resultaten fås en god samstämmighet. Figur 23 visar en sådan jämförelse. De uppmätta nya radiatorkurvorna är mycket lika de simulerade med fläktdriften $F_y=120$. Även fläkteffekten stämmer väl överens i det fallet med en antagen verkningsgrad på 10% för fläkten.



Figur 23: Jämförelse mellan temperaturprogram från fältförsök och simuleringsresultat.

8 PRIMÄRTEMPERATUR- PÅVERKAN VID VÄRMEDRIFT

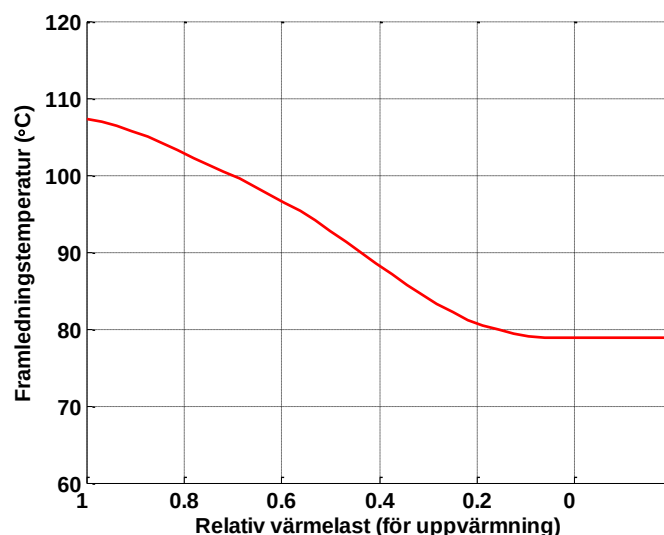
Då temperaturerna sänks i det sekundära systemet påverkas även fjärrvärmesystemet. Om den primära framledningstemperaturen är oförändrad kommer den primära returtemperaturen och primärflödet att sjunka. Vidare kan en sänkning av temperaturbehovet för uppvärmning möjliggöra en sänkning av fjärrvärmens primära framledningstemperatur. Detta kan då ske utan att flödet genom fjärrvärmecentralen påverkas.

I detta avsnitt har beräkningar av primärtemperaturpåverkan utförts.

Beräkningarna utgår från:

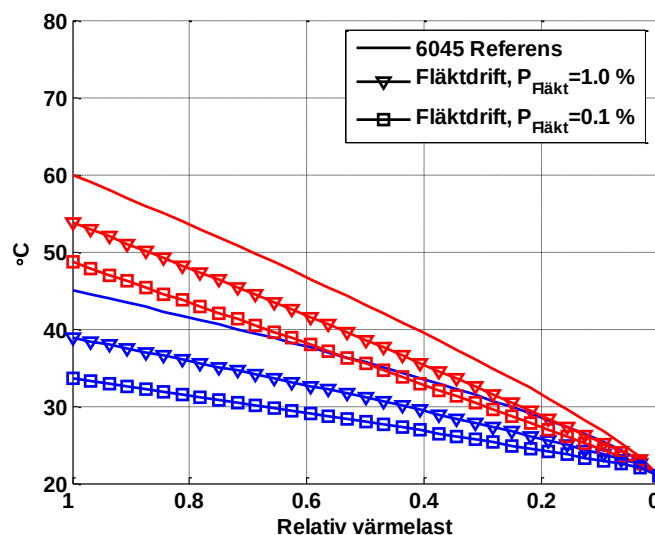
- Fjärrvärmeansluten byggnad med 20 bostadslägenheter.
- Tappvarmvattenanvändningen är uppskattad till .
- Tappvarmvattentemperatur 55°C
- Parallellkopplad fjärrvärmecentral
- Värmesystemet antas vara dimensionerat till 60/45°C vid DUT
- Primär temperaturbesparing baseras på simuleringar av radiatorfläkten

Den primära framledningstemperaturen som beräkningarna grundar sig på är presenterad i Figur 24.



Figur 24: Primärframledningstemperaturer i fjärrvärmenätet ($T_{ps,0}$).

Beräkningarna är utförda för två olika fall av fläktdrift, det vill säga med två olika fläkthastigheter. Den högre hastigheten motsvarar en elanvändning på 1% av värmeavgivningen vid DUT medans den lägre fläkthastigheten motsvarar en elanvändning på 0,1%.



Figur 25: Sekundära temperaturer med och utan fläkt drift.

Påverkan på primär fjärrvärmemetemperatur har beräknats med två olika ansatser:

1) Primär framledningstemperatur bibehålls vilket innebär att fjärrvärmens returtemperatur och flöde sänks. 2) Primärflödet genom fjärrvärmecentralen bibehålls vilket medför att primär fram- och returtemperatur sänks.

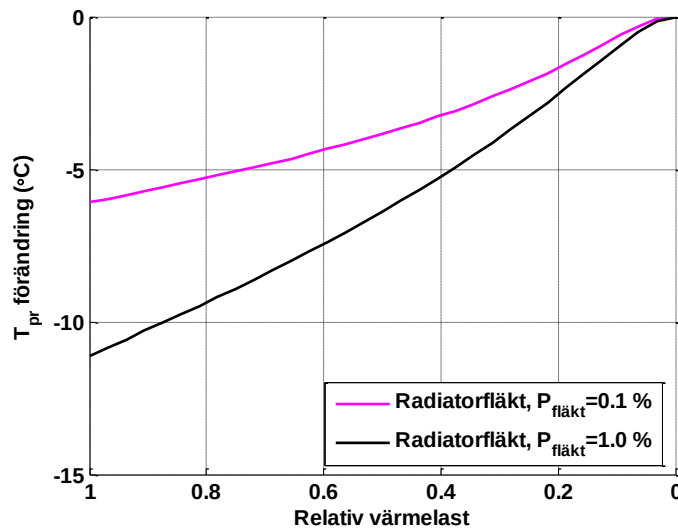
I år Figur 26 visas beräknad primär returtemperatursänkning för fallet med bibehållen primär framledningstemperatur (fall 1) och i Figur 27 visas den möjliga primär fram och returtemperatursänkningen utan att flödet genom fjärrvärmecentralen förändras (fall 2).

Beräkningarna visar på en betydande sänkning av fjärrvärmens returtemperatur, men även på en stor potential att även sänka fjärrvärmens framledningstemperatur.

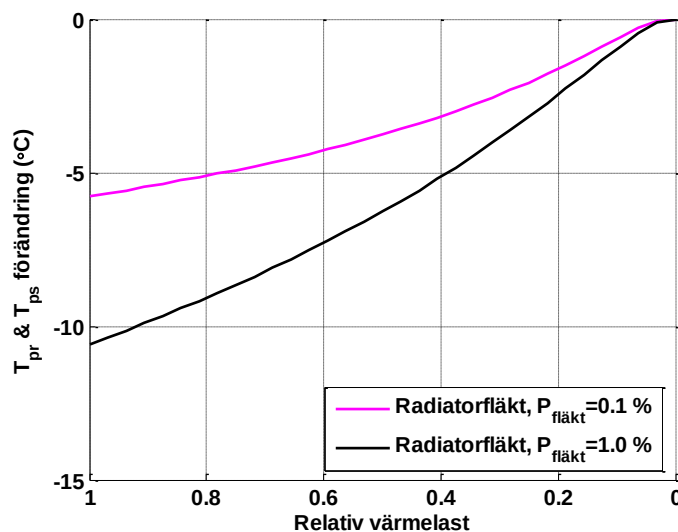
Skillnaden mellan sänkningen av den primära returtemperaturen i Figur 26 och Figur 27 kan till synes vara liten, men för fallet i Figur 26 är både den primära returtemperaturen och primärflödet sänkt. För fallet i Figur 27 är primärtemperaturerna parallellförflyttade, den primära framledningstemperaturen sänks lika mycket som den primära returtemperaturen.

En nackdel med radiatorfläktarna är att de har en elförbrukning. Det finns alternativa metoder att driva fläktarna. Tänkbara uppslag är genom solceller eller med termisk genererad elektricitet. Det finns idag minst en fläktkonvektor på marknaden med termoelektrisk fläkt drift²⁶; möjligen kan denna teknik även tillämpas på fläktradiatorer.

²⁶ Minib s.r.o., MINIB 2009/2010, Product catalogue, downloaded from http://www.minib.com/download_language/file/57/minib-en-2010.pdf, 2011-03-17



Figur 26: Förändring av primär returtemperatur, bibehållen primär framledningstemperatur.



Figur 27: Möjlig förändring av primär fram- och returtemperatur med bibehållet primärflöde.

8.1 Konsekvenser för kraftvärmeproduktion

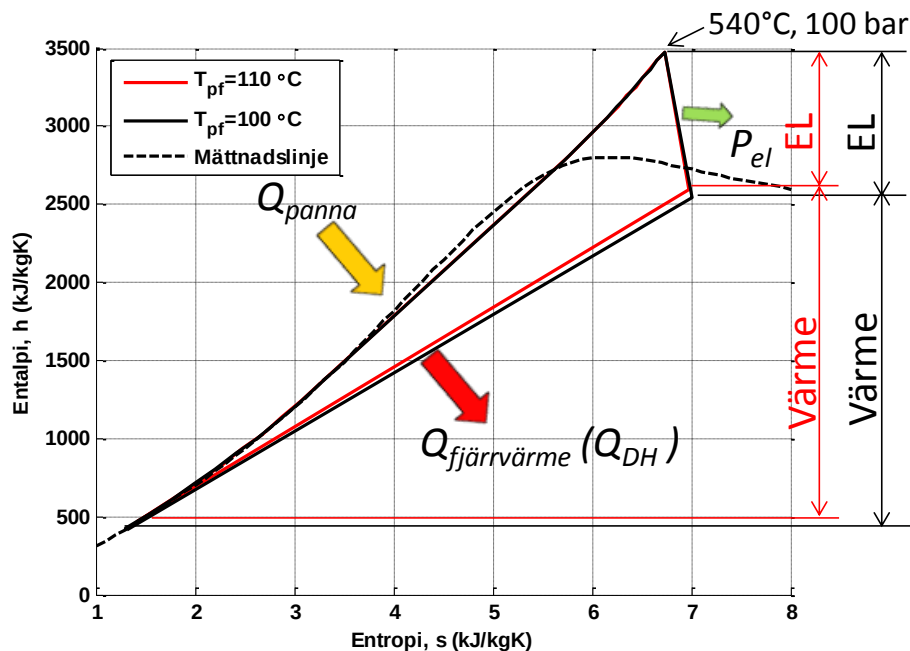
Det är välkänt att effektiviteten i olika typer av fjärrvärmeproduktion kan förbättras med sänkta framlednings- och returtemperaturer. T.ex. kan verkningsgraden för en panna utrustad med rökgaskondensering ökas med sänkt returtemperatur.

I det här arbetet har vi valt att kvantifiera fördelen med att utrusta radiatorer med radiatorfläktar för förbättrad värmeavgivning genom att beräkna inverkan på ett ångbaserat kraftvärmeverk. Fördelen med detta val är att det ger en möjlighet att på ett relativt enkelt sätt kvantifiera en systemteknisk netto-förbättring, då storleken på

eleffekt för att driva en radiatorfläkt kan dras från uppnådd ökning i elproduktionen från kraftvärmeverket.

För ett fjärrvärmesystem med kraftvärmeproduktion kan radiatorfläktarnas elanvändning understiga den ökade elproduktionen som kan erhållas då fjärrvärmens framledningstemperatur sänks. Detta gäller speciellt för höga värmelaster då den möjliga sänkningen av primärframledningstemperatur är stor.

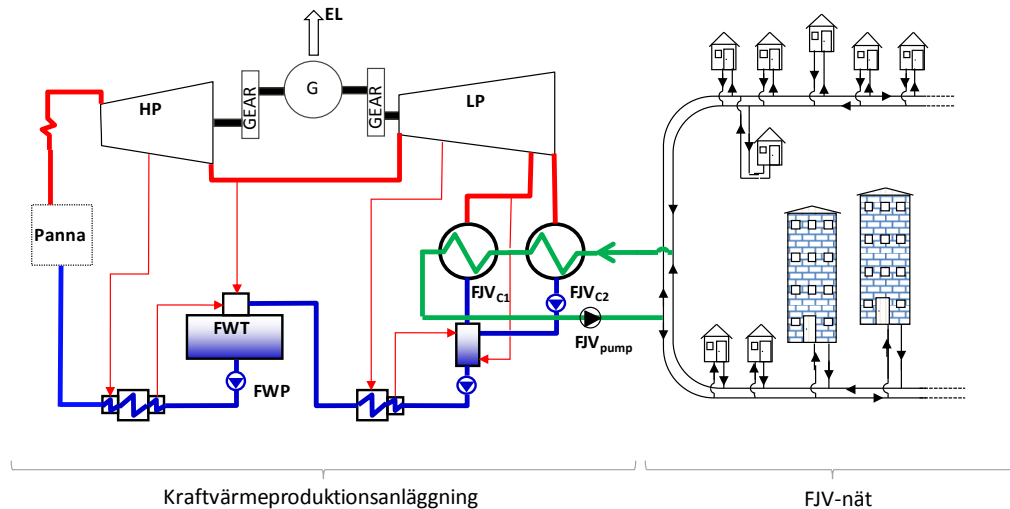
Figur 28 visar principen för ett enkelt kraftvärmeverk. För en mera detaljerad beräkning om nyttan av sänkta primärtemperaturer måste hänsyn tas till den specifika anläggningen.



Figur 28: h-s diagram för ett enkelt kraftvärmeverk med en kondensor (uppvärmning av FJV sker i ett steg). I diagrammet visas ändringen i elproduktion då framledningstemperaturen sänks 10°C.

För studien har en validerad modell av ett kraftvärmeverk i Enköping använts. Kraftvärmeverket i Enköping är av mottryckstyp med två kondensationstryck, se Figur 29. Detta medför att även den primära returtemperaturen har viss påverkan på elutbytet. Valideringen är utförd av Genrup²⁷. Kraftvärmeverket producerar vid fullast 50 MW värme och 20 MW el. De ordinarie primärtemperaturer är de som tidigare presenterats i Figur 24 och de sänkta primärtemperaturerna är de samma som presenterades i Figur 26 och Figur 27.

²⁷ Genrup, M.: "On degradation and monitoring tools for gas and steam turbines" Doktorsavhandling, Lund universitet, 2005



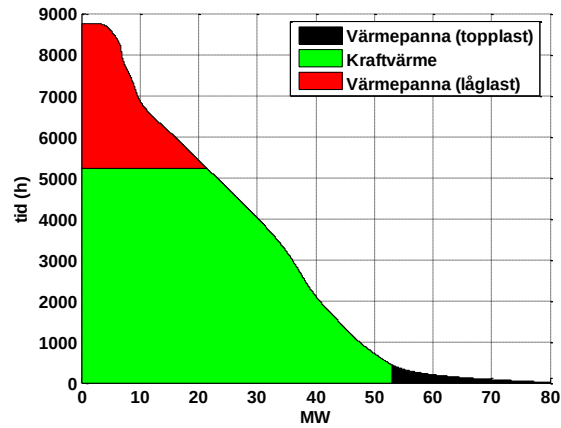
Figur 29: Förenklat kopplingsschema av en kraftvärmeproduktionsanläggning ansluten till ett FJV-nät.

De ordinarie primärtemperaturer är de som tidigare presenterats i Figur 24 och de sänkta primärtemperaturerna är de samma som presenterades i Figur 26 och Figur 27.

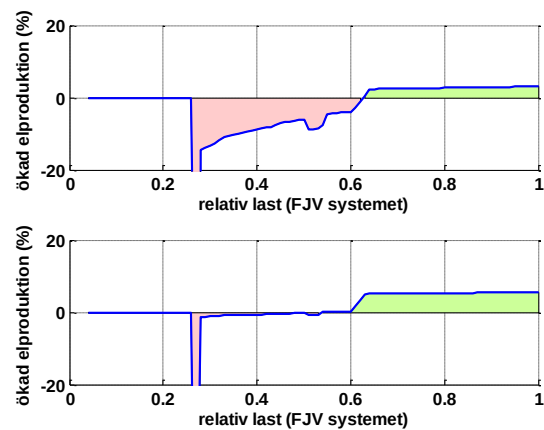
I Figur 31 och Figur 32 är den ökade nettoelproduktionen beräknad, det vill säga den extra elproduktion som de lägre fjärrvärmemetemperaturerna medför, minus den el som fläktarna förbrukar för sin drift. I Figur 31 är fjärrvärmens framlednings-temperatur den samma som för referensfallet vilket innebär att den primära returtemperaturen samt primärflödet har sänkts (fall 1). I Figur 32 visas den ökning av elproduktionen som möjliggörs av att både den primära fram- och returlednings-temperaturen sänks med ett bibehållet flöde genom fjärrvärmecentralen (fall 2). Resultatet av den årliga ökningen av elproduktionen har beräknats och sammanställts i Tabell 3. Som jämförelse finns även ett fall då fläkten styrs så att den endast är i drift då elproduktionen minus fläktarnas elanvändning är större än för referensfallet. Det vill säga att fläktarna endast är i drift då fälten i Figur 31 och Figur 32 är gröna.

Tabell 3: Ökad nettoelproduktion med radiatorfläktar. Ordinarie årlig elproduktion: 79500 MWh. Med "Alltid" menas att fläktarna är i drift hela uppvärmningssäsongen, med "Nyttig" menas att fläktarna endast är igång endast då nettoelproduktion ökar.

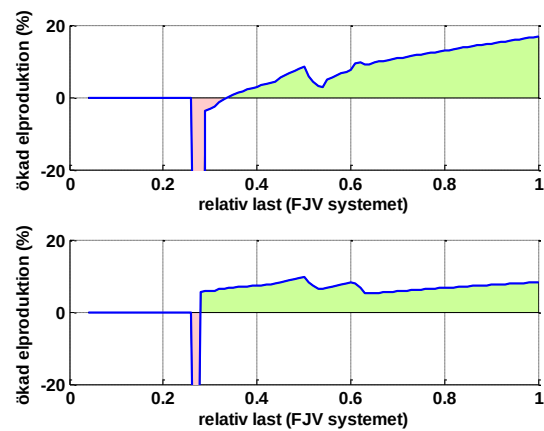
Elanvändning	m_p oförändrad		T_{ps} oförändrad	
% av DUT	Alltid	Nyttig	Alltid	Nyttig
1%	1,7%	5,9%	-8,3%	0,4%
0,10%	6,0%	7,2%	-0,5%	1,1%



Figur 30: Varaktighetsdiagram för analyserat fjärrvärmesystem.



Figur 31: Ökad nettoelproduktion med bibehållet primär framledningstemperatur. Primär returtemperatur sänkt enligt Figur 26. Övre diagrammet med 1% elanvändning till fläktdrift av värmelasten vid DUT. Undre diagrammet med 0,1%.



Figur 32: Ökad nettoelproduktion med bibehållet primärflöde genom fjärrvärmecentralen. Primär fram och returtemperatur sänkt enligt Figur 27. Övre diagrammet med 1% elanvändning till fläktdrift av värmelasten vid DUT. Undre diagrammet med 0,1%.

Ur tabellen syns att den årliga elproduktionen kan ökas med över 5% då den primära framledningstemperaturen sänks, trots fläktarnas elförbrukning. Detta kan uppnås med fläktarna igång under hela uppvärmningssäsongen om den lägre fläkthastigheten väljs. Vid högre fläkthastighet, och följaktligen högre elanvändning, är styrningen av fläktarna viktig. Det samma gäller för att fläktarna skall bidra till någon ökad elproduktion då endast den primära returtemperaturen sänks.

För FJV-system med kraftvärmeproduktion är det inte enbart elutbytet som påverkas av primärtemperatursänkningar. Även fjärrvärmens s.k. primärenergifaktor kan komma att minska avsevärt ²⁸.

²⁸ Johansson, P.-O.: "Buildings and district heating - contributions to development and assessments of efficient technology" Doktorsavhandling, Lunds universitet, 2011

9 KOMBINERAD VÄRME OCH KYLA

Behovet av komfortkyla har under en lång period växt och det är troligt att denna växt kommer att fortsätta. Parallellt med detta ökar även fjärrkylan i Sverige. Denna ökning sker framförallt i fastigheter med ett luftburet värmesystem. I byggnader där det enbart finns ett vattenburet system är det svårare att introducera komfortkyla, särskilt om man vill undvika fula apparater som syns utifrån.

I syfte att bereda en grund för en ännu kraftigare expansion av fjärrkylan har vi undersökt några möjligheter att komma runt detta hinder.

9.1 Komfortkyla med radiatorsystem utan påtvingad konvektion

I befintliga värmesystem med radiatorer är i många fall möjligheten till att installera komfortkyla liten, främst av kostnadsskäl. Om det är möjligt att utnyttja det befintliga radiatorsystemet för komfortkyla kan kostnaden för installation av komfortkyla hållas betydligt lägre.

Genom att istället för att cirkulera varmt vatten i radiatorsystemet cirkulera kallt vatten kan man kyla byggnaden. Då ett radiatorsystem vanligtvis är dimensionerat för värmeavgivning kommer dess kylförmåga att vara begränsad, tillvägagångssättet har dock använts redan i Systembolagets huvudkontor i Stockholm, där man har testat att kyla kontorsutrymmen med befintliga radiatorer under en övergångsperiod, samt tillämpas sedan flera år tillbaka i Stenungsund (Akzo Nobels nybyggda huvudkontor).

I de kommande avsnitten ges exempel på hur kyla från radiatorer används/har använts för dessa två konkreta byggnader.

9.1.1 Systembolagets huvudkontor

Detta stycke är baserat på personlig kommunikation med Lars Löfstedt²⁹.

I samband med ett ökad intern värmegenerering (främst från elektrisk kontorsutrustning) på tidigt 1990-tal uppstod behov av kyla i byggnaden. Då den är K-märkt innebär detta svårigheter för omfattande förändringar i byggnaden och dess tekniska system. Man började då koppla om radiatorerna sommartid för att avge kyla istället för värme. Inga andra förändringar utfördes i det tekniska systemet förutom att termostatventilerna hölls i öppet läge. Viss injustering var nödvändig vid övergång från värme till kyl drift. Framtemperaturen till radiatorerna vid kyl drift styrdes genom daggpunktsmätning på inkommande friskluft. Flödesriktningen vändes inte vid kyl drift, det vill säga att kylflödet leddes in i toppen av radiatorerna.

Framledningstemperaturen till radiatorerna vid kyl drift varierade mellan 10-15°C beroende på väderlek och luftfuktighet. I augusti var framledningstemperaturen generellt högre än för resten av kyla säsongen. Temperaturdifferensen mellan fram- och

²⁹ Löfstedt L., före detta teknisk chef för Systembolaget AB, personlig kommunikation, telefonsamtal 2011-04-08

returledningstemperatur vid kyl drift var ca 4-5°C. Kylförmågan uppskattades till 100-150 W per radiator.

En nackdel med att använda radiatorerna för kylning var en ökad upplevelse av kallt golvdrag då den kalla luften sjunker ner från radiatorerna.

Kyla från radiatorer utnyttjades ett år, sedan byttes samtliga radiatorer ut mot fläktkonvektorer (fan-coils) med rumsstyrning för bättre kontroll av inomhusmiljön.

9.1.2 Akzo Nobel, Stenungsund

Då vi funderade på möjligheten att använda husets befintliga radiatorer till kyla vid projektets uppstart kände vi inte till att det i Sverige faktiskt fanns i drift en installation med kylradiatorer som var projekterad som sådan. Vid inledande rundringning till radiatortillverkare fick vi veta att företaget Rettig Sweden AB har levererat radiatorer till en sådan installation som finns på Akzo Nobel AB's kontor i Stenungsund sedan 2005³⁰. Nedan följer en kortfattad beskrivning av installationen.

Radiatorerna dimensionerades för maximalt kyleffektbehov 300 W per rum vilket gav väl tilltagna radiatorytor vid uppvärmningsdrift. Termostatventiler till radiatorerna levererades av MMA AB och själva projektet genomfördes av Wikström VVS-Kontroll AB i Göteborg. Information nedan baseras främst på personlig kommunikation med Charlotta Berggren³¹.

Det finns ett generellt problem med att använda en modern radiatorkrets för kyla, nämligen att termostatventiler kommer att stänga sommartid och stoppa cirkulationen. Problemet löstes genom att man tog fram ett speciellt radiatorkoppel med en backventil installerad parallellt med termostatventilen, se figur 31. Kopplet tillverkades av Metallprodukter AB i Markaryd och det fungerar så att backventilen är stängd vid värmedrift medan den öppnar vid kyl drift tack vare att man då byter riktning på cirkulationsflödet. Den omvända cirkulationsriktningen har även den fördelen att man får motströmsvärmväxling mot rumsluften eftersom den sjunker ner vid kylning istället för att vandra uppåt som vid uppvärmning. En annan fördel är att backventilen kan dimensioneras/ställas in för ett annat k_{vs} -värde än termostatventilen.

Installationen fungerade som förväntat under några år tills det dök upp problem med kondensutfällning under en extra fuktig sommar 2008, trots att man övervakade den inkommande luftens daggpunkt. Systemet kompletterades då med fuktgivare på framledning i respektive distributionsstam. En fördel med denna lösning är att man kan minska marginalen mellan kylvattnets framledningstemperatur och inomhusluftens daggpunkt jämfört med marginal som baseras på inkommande luftens daggpunkt. Idag kan framledningstemperaturen vara så låg som 10°C och höjs till 13°C om fuktproblemen är på väg att uppstå.

³⁰ Jörgen Persson, Rettig Sweden AB, personlig kommunikation, telefonsamtal 2010-10-08

³¹ Charlotta Berggren, Wikström VVS Kontroll AB / DeltaT AB, mail samt telefonsamtal 2010-10-13



Figur 33: Radiatorkoppel för värme- eller kyl drift av radiatorer på Akzo Nobels kontor i Stenugnsund.

Kylradiatorer är här inte avsedda för att klara hela kyllasten sommartid utan kopplas in när det är som varmest. Upp till c:a 25°C ute används enbart frikyla genom naturlig ventilation tack vare ett automatiserat vädringssystem med vädringsluckor som styrs av inomhustemperatur och syrehalt i varje rum. Styrsystemet känner även av utetemperaturen, vindriktning och styrka samt solinstrålning. Dessutom kan systemet detektera om det regnar och stänger luckorna då för att inte släppa in fukt. På vintern görs korta vädringar då och då. En inneklimatenkät gav vid handen att det var betydligt färre missnöjda än vid traditionella system totalt sett, mycket tack vare naturliga ventilationens kapacitet. Några få klagade dock på drag.

Komfortkyla baserad på radiatorer borde kunna användas som komplement i byggnader där det befintliga ventilationssystemet inte är dimensionerat för att transportera bort värmelast.

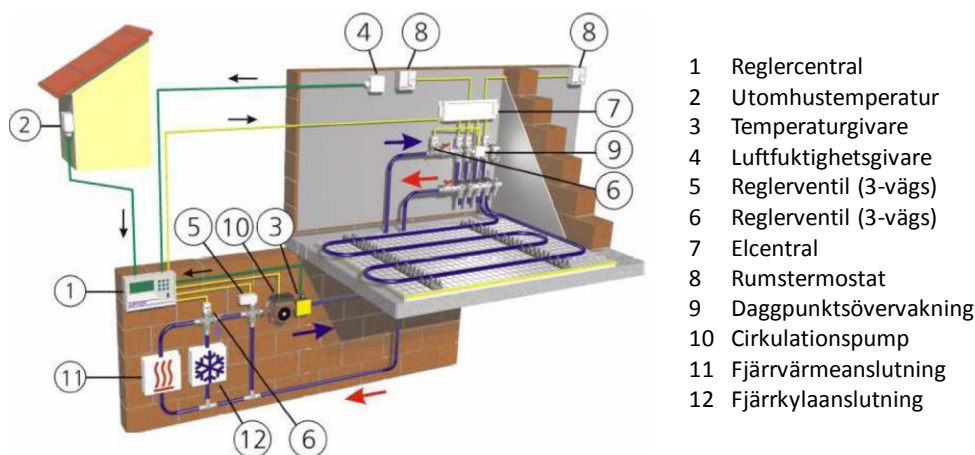
9.2 Byggnadsintegrerade system för värme och kyla

Vid nybyggnation av framförallt småhus har byggnadsintegrerade värmesystem (främst golvvärme) blivit allt vanligare. Oftast består dessa av plaströr som gjuts in i grunden och i betongbjälklag. Systemen kan även placeras i vägg eller tak. I detta avsnitt beskrivs två byggnadsintegrerade system som kan utnyttjas för både uppvärmning och kyla.

9.2.1 Golvkyla

Att utnyttja golvvärmesystem även för komfortkyla är en teknik som använts ett tiotal år på olika håll i världen, även om tekniken fortfarande är ovanlig i Sverige. Det finns

system i bl.a. Thailand och Storbritannien där golvkyla utnyttjas³². På flygplatsen i Bangkok, med en golvyta på 500 000 m² finns golvkyla installerad på en yta av 200 000m². Anläggningen är dimensionerad för att kunna kyla 70-80 W/m²³². Golvkyla kan med fördel användas i byggnader med mycket fönster och där solinstrålningen är hög eftersom förmågan att kyla då ökar. För installationsexempel för kombinerad golvvärme och golvkyla se Figur 34.



Figur 34: Installationsexempel av kombinerad golvvärme och golvkyla³³.

För ett normalt golvkylasystem uppgår kylförmågan till ca 50 W/m² (vid en golvtemperatur på 19°C och en rumstemperatur på 26°C), men för byggnader med mycket solinstrålning kan förmågan att kyla öka till ca 100 W/m²³⁴. Det är temperaturen på golvets yta som avgör vilken värmeavgivning/kylförmåga som ett golvvärme/kylasystem har. Golvets värmemotstånd påverkar vilka temperaturer i golvvärme/kylasystemet som behövs för att erhålla önskad ytemperatur på golvet. Ett golv med högre värmemotstånd kräver högre vattentemperaturer för att avge samma mängd värme än vattentemperaturerna för ett golv med lågt värmemotstånd³⁴. Temperaturerna för golvkyla påverkas på samma sätt; högt värmemotstånd kräver lägre temperaturer.

I Sverige har golvkyla utnyttjats i viss utsträckning. Hansson uppger att det har projekterats system för golvkyla för både villor (JM – ”Smart Living”, Värmdö) och varuhus (Spiralen, Norrköping)³⁵. Man har även projekterat system med golvkyla i f.d. Jugoslavien. Utnyttjande av golvkyla uppges fungera bra och det finns inte några tekniska hinder för att utnyttja ett golvvärmesystem för kyla, förutsatt att framledningstemperaturen till kylslingorna är under dagdpunktstemperaturen³⁵, något som

³² Simmonds, P., mfl.: ”Comfort conditioning for large spaces” CIBSE conference, Dublin, 2000

³³ Jupiter: ”Control Heating and Cooling”

³⁴ Olesen, B.: ”Radiant floor heating in theory and practice” ASHRAE Journal, July 2002

³⁵ Hansson, L., Siemens AB, Personlig kommunikation, 2011-05-11

även poängteras av Simmonds³² och Olesen³⁶. Eftersom vattentemperaturen är betydligt lägre än ytemperaturen på golven kommer kondensation främst att ske på fördelningscentraler till golvvärmeslingan. Persson bedömer golvkyla som ett kostnadseffektivt alternativ till kyla av byggnader med begränsat kylbehov³⁷. Han tillägger även att golvkyla är särskilt behagligt för golv som utsätts för mycket solinstrålning; samtidigt varnar han för att golv med kyla kan upplevas som kalla i utrymmen där man går barfota.

9.2.2 Tak- och väggkyla

Det vanliga sättet att etablera takkyla är konvektorer med eller utan fläkt. Det finns dock andra tekniker. Företaget Beka Heiz- und Kühlmatten GmbH marknadsför kylmattor som består av stora mängder tunna, parallellkopplade kapillärrör (plastslangar) som ansluts till ett vattenburet kylsystem med vattentryck under drift upp till 0.4 MPa. ”Mattan” kan fästas vid tak eller vägg, se figur X, och absorberar värme till hälften konvektivt och till hälften genom strålning.

Tryckfallet i slangarna som är tillverkade av polypropylen och har mått 3.35 x 0.5 mm, är litet tack vare att den sammanlagda kanaltvärnsnittsarean är stor, vilket ger låga strömningshastigheter, 0.1-0.2 m/s, och laminär strömning. Skulle läckage uppstå så kan den defekta slangen enkelt ”pluggas igen”. Mattans kapacitet är 64 W/m² kyla vid temperaturdifferens 10°C (gäller komplett kassettmodul B.GK12³⁸). En 4-5 m² stor matta räcker således för att transportera bort effekt motsvarande intern värmeutveckling (c:a 300W). Vid uppvärmning är kapaciteten 130 W/m² värme vid temperaturdifferens 20°C. För fritt upphängda mattor ökar kapaciteten med 10-15%.

Produkten finns i olika varianter och lämpar sig även för användning i golv, i eller ovanpå väggar och för att kyla/värma betongstomme mm.

³⁶ Olesen, B.: ”Radiant floor cooling systems” ASHRAE Journal, September 2008

³⁷ Persson, T.: ”LÅGTEMPERATURVÄRMESYSTEM -En kunskapsöversikt” Centrum för solenergiforskning, EKOS, Högskolan Dalarna, 2000

³⁸ Beka, Produktblad, nedladdat från: http://www.beka-klima.de/fileadmin/BeKa/pdf/englisch/TI_K04_BGK_Decke.pdf, 2011-05-20



Figur 35: Kapillärörsmatta av polypropylen för vattenburen kyla/värme i taket³⁹.

Motsvarande produkt finns i rostfrittutförande hos företaget Zehnder Rittling⁴⁰ (USA). Den lämpar sig dock framförallt i större lokaler.

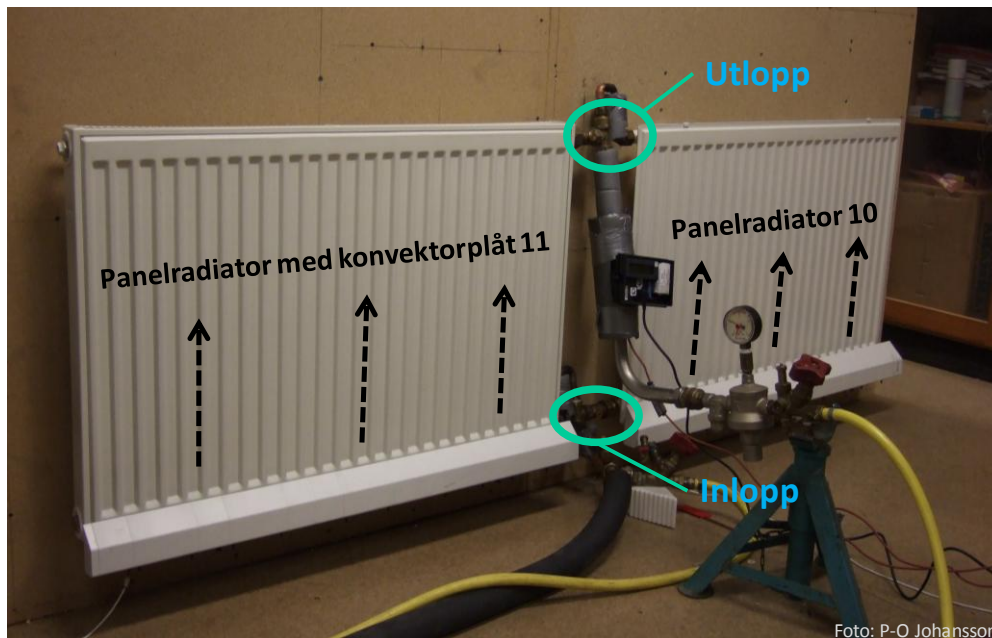
9.3 Undersökning av kyla från radiatorer med radiatorfläkt

De lyckade försöken med att öka värmeavgivningen från radiatorer ledde till frågan om man även skulle kunna öka värmeupptagningen i radiatorer som körs kallt. Detta är särskilt intressant för befintliga värmesystem där radiatorerna är dimensionerade för uppvärmning, vilket innebär att de har en låg kyleffekt.

För att öka möjligheten att använda radiatorer för komfortkyla kan de, precis som vid värmedrift utrustas med fläktar för ökad värmeövergång (förmåga att kyla rummet). I detta arbete har två typer av radiatorer, en panelradiator och en panelradiator med konvektionsplåt har undersökts med avseende på möjlighet att avge kyla, både med och utan fläktar. Inloppet av kylflöde sker på radiatorns undersida, och utloppet på radiatorns översida. Detta är samma flödesriktning som används i Stenungsund. För att även undersöka ökad kylavgivning med radiatorfläktar har dessa monterats under radiatorn, se Figur 21. Försöken är utförda i fjärrvärmelaboratoriet vid Lunds Tekniska Högskola.

³⁹ Beka, hemsida: <http://www.beka-klima.de/en/cooling-ceiling.html>, besökt 2011-05-20

⁴⁰ Zehnder Rittling, Produktkatalog nedladdad från:
<http://www.rittling.com/assets/PDF/Catalogs/ZRZIPCatJan2011web.pdf>, 2011-05-20



Figur 36: Kapillärrörsmatta Radiatorer i LTH:s fjärrvärmelaboratorium för undersökning av möjlighet att avge kyla.

Riktningen på fläktarna är den samma som används för att öka värmeavgivningen, det vill säga uppåt. Detta innebär att fläktarna nu arbetar mot den naturliga konvektionen, som vid kyl drift riktar luften neråt.

Vid undersökning av förmågan att kyla testades en radiator i taget. Varje radiator testades med två flödes hastigheter samt utan och med fläkt drift. Först undersöktes radiatorernas kylförmåga utan radiatorfläktar, sedan med fläktarna i drift. Fläktarna testas med två olika spänningsnivåer, 5 och 10 V. Då radiatorns kylförmåga undersöktes utan fläkt drift verifierades att det är möjligt att beräkna kylförmågan med samma ekvation som radiatorernas värmeavgivning beräknas med, se ekvation (17). Detta innebär att kylförmågan för andra kylflöden och temperaturförhållanden kan beräknas.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_r) = U \cdot A \cdot \Delta\theta^n \quad (17)$$

där $U \cdot A$ och n är konstanter för en given radiator, $\Delta\theta$ är den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan radiatorytan och omgivningen. Värden för $U \cdot A$ och n beräknas från datablad från radiator tillverkaren. Resultat från denna beräkning finns i Tabell 4 för panelradiatorn och i Tabell 5 för panelradiatorerna med respektive utan konvektorplåt. Som framgår av tabellen är avvikelserna mellan den uppmätta kylförmågan och den beräknade kylförmågan i samtliga fall mindre än 15%, vilket innebär att ekvation (17) ger en god uppskattning av en radiators förmåga att inte enbart avge värme, utan även för dess kylförmåga.

Tabell 4: K10 - kylförsök.

	$Q_{Försök}$	T_s	T_r	T_i	v	$\Delta\theta$	UA	n	Q_{calc}	skillnad
	W	°C	°C	°C	l/s	°C	W/°C ⁿ	-	W	%
Datablad	559	75	65	20	0,013	49,83	3,04	1,334	559	0%
	707	90	70	20	0,008	59,44	3,04	1,334	707	0%
Värme försök	273	52,3	45,6	21,4	0,010	27,37	3,04	1,334	252	-8%
	270	52,0	45,8	21,3	0,010	27,50	3,04	1,334	253	-6%
	249	52,6	42,5	21,6	0,006	25,61	3,04	1,334	230	-8%
	260	52,7	42,9	20,9	0,006	26,56	3,04	1,334	241	-7%
Kyla försök	-96	6,6	8,4	20,2	0,013	12,67	3,04	1,334	-90	-6%
	-85	6,1	8,2	19,5	0,010	12,33	3,04	1,334	-87	2%
	-84	6,1	9,7	20,4	0,006	12,39	3,04	1,334	-87	4%

För panelradiatorn (K10) gjordes försök i laboratoriet även för värmeavgivningen för att verifiera de beräknade värdena för $U \cdot A$ och n samt för att verifiera att tillräcklig noggrannhet kunde uppnås med den använda flödesmätaren. Beräkna värmeavgivning skilde sig mindre än 10% från den uppmätta, vilket är ett gott resultat. Att avvikelser blir något högre vid försök för kyl drift kan förklaras med betydligt lägre temperaturdifferens mellan sekundär framledning och returledning

Tabell 5: K11 - kylförsök.

	$Q_{Försök}$	T_s	T_r	T_i	v	$\Delta\theta$	UA	n	Q_{calc}	skillnad
	W	°C	°C	°C	l/s	°C	W/°C ⁿ	-	W	%
Datablad	864	75	65	20	0,021	49,83	4,43	1,349	864	0%
	1096	90	70	20	0,013	59,44	4,43	1,349	1096	0%
Kylförmåga - försök	-152	5,2	8,9	22,2	0,010	15,09	4,43	1,349	-172	13%
	-131	6,0	12,5	22,3	0,005	12,81	4,43	1,349	-138	6%

Vid fläktdrift ökar radiatorernas förmåga att avge kyla. I fjärrvärme laboratoriet har panelradiatorn och panelradiatorn med konvektorplåt även undersökts med fläktdrift. De använda fläktarna är av samma typ som användes i fältförsöket med extra värmeavgivning från radiatorer med radiatorfläkt. Fläktarna är riktade så att de blåser uppåt, det vill säga att luftriktningen motverkar den naturliga konvektionen. I Tabell 6 och Tabell 7 är kylförmågan angiven med fläktdrift. Även den procentuella ökningen av kylförmågan är presenterad för det fall då radiatorn hade varit i drift med samma kylflöde och samma framledningstemperatur. Returtemperaturen för kyl drift utan fläkt är beräknad enligt ekvation (17) för att för gälla samma temperatur och flödesförhållanden som för försöket med fläktdrift.

Tabell 6: Kylförsök med fläktdrift, radiator K10. Grått fält motsvarar beräknad kylförmåga utan fläktdrift.

$U_{\text{Fläkt}}$	T_s	$T_r, \text{fläkt}$	$\Delta T_{\text{fläkt}}$	v	$Q_{\text{fläkt}}$	$T_r, U=0V$	$\Delta T_{U=0V}$	$Q_{U=0V}$	Skillnad	
V	°C	°C	°C	l/s	W	°C	°C	W	%	%Medel
5	6,11	9,01	2,90	0,00964	116,7	8,36	2,25	90,8	29	
	6,16	11,30	5,14	0,00494	106,2	10,28	4,12	85,0	25	24
	5,30	8,85	3,55	0,00874	129,7	8,32	3,02	110,5	17	
10	6,01	10,01	4,00	0,00502	147,8	10,13	4,12	86,4	71	
	6,20	10,01	3,81	0,00925	163,2	8,53	2,33	90,1	81	75
	5,30	10,77	5,48	0,00805	184,5	8,48	3,18	107,1	72	

För panelradiatorn ger fläktdrift en avsevärd ökning av förmågan att avge kyla. För den lägre fläkthastigheten ökar avgivningen med nästan 25% och för den högre fläkthastigheten ökar kylförmågan med 75%

Tabell 7: Kylförsök med fläktdrift, radiator K11. Grått fält motsvarar beräknad kylförmåga utan fläktdrift.

$U_{\text{Fläkt}}$	T_s	$T_r, \text{fläkt}$	$\Delta T_{\text{fläkt}}$	v	$Q_{\text{fläkt}}$	$T_r, U=0V$	$\Delta T_{U=0V}$	$Q_{U=0V}$	Skillnad	
V	°C	°C	°C	l/s	W	°C	°C	W	%	%Medel
5	6,02	12,11	6,08	0,00477	121,4	12,83	6,81	135,9	-11	
5	5,59	9,00	3,41	0,00983	140,1	9,56	3,97	163,0	-14	-12
5	5,27	9,16	3,90	0,00858	139,7	9,67	4,41	157,9	-12	
10	6,16	15,00	8,84	0,00465	172,0	12,96	6,80	132,3	30	
10	5,67	10,98	5,31	0,00941	208,6	9,72	4,05	159,2	31	34
10	5,32	11,13	5,81	0,00896	217,5	9,48	4,16	155,7	40	

För panelradiatorn med konvektionsplåt ökar inte förmågan att avge kyla till rummet då fläkten körs med den lägre spänningen. Detta kan förklaras med att konvektionsplåten ger en tydligare riktning på den naturliga konvektionen som vid fläktdrift måste övervinnas. Idén med konvektionsplåt är just att öka den naturliga konvektionen. Vid den högre fläkthastigheten övervinns den naturliga konvektionen och förmågan att avge kyla ökar med 34%.

Då fläktens flödesriktning motverkar den naturliga konvektionen gjordes även försök där fläktarnas riktning vändes. Se Tabell 8.

Tabell 8: Kylförsök med fläktdrift, fläktriktning nedåt. Grått fält motsvarar beräknad kylförmåga utan fläktdrift.

	$U_{\text{Fläkt}}$	T_s	$T_r, \text{fläkt}$	$\Delta T_{\text{fläkt}}$	v	$Q_{\text{fläkt}}$	$T_r, U=0V$	$\Delta T_{U=0V}$	$Q_{U=0V}$	Skillnad
	V	°C	°C	°C	l/s	W	°C	°C	W	%
K10	5	5,3	8,3	3,0	0,0084	105,1	8,42	3,09	108,9	-3%
	10	5,3	8,9	3,5	0,0082	121,0	8,50	3,18	109,1	11%
K11	5	5,3	9,6	4,3	0,0084	149,9	9,82	4,51	157,4	-5%
	10	6,3	10,5	4,2	0,0094	164,7	9,89	3,59	141,1	17%

Då fläktens flödesriktning ändras, så att den suger luften från radiatorn och blåser ner den mot golvet ger inte fläktarna lika stor ökning av förmågan att avge kyla. Detta kan till stor del förklaras med flödesbilden som bildas på fläktens sug sida inte är lika riktningsstyrd som utblåsningen på fläktens trycksida. Även ökad kortslutning av luftens flöde är att misstänka.

Då det gäller förändringar mindre än 10% kan inte anses som säkerställda, då beräkning av avgiven kyla enligt ekvation (17) ger fel i denna storleksordning (se Tabell 4 och Tabell 5).

10 SLUTSATSER

Det har sedan länge varit ett prioriterat forskningsområde att sänka temperaturnivåer i värmesystem för byggnader. Vid nybyggnation har man ett stort urval av möjliga uppvärmningssystem som är anpassade för lågtemperatursystem. Exempel på sådana system är golvvärme, traditionella fläktkonvektorer och radiatorer anpassade för lågtemperatursystem. Då det gäller den befintliga bebyggelsen är valmöjligheterna för att sänka systemtemperaturerna betydligt färre. I denna studie har fokus varit på att öka den konvektiva värmeövergången från befintliga radiatorer genom påblåsning från fläktar monterade på radiatorn, radiatorfläktar.

Användande av radiatorfläktar minskar temperaturbehovet för uppvärmning av bostäder markant. Detta bidrar till sänkta fjärrvärme returtemperaturer, och möjliggör även för sänkta framledningstemperaturer i fjärrvärmenätet utan att primärflödet ökas. Om den möjliga sänkningen av primär framledningstemperatur utnyttjas i ett fjärrvärmenät med kraftvärmeproduktion överstiger den ökade elproduktionen elbehovet av radiatorfläktar för de flesta driftssituationer.

Fläkt radiatorer är en lämplig teknik för att sänka temperaturprogrammet för befintliga värmesystem då installationen inte kräver några omfattande ingrepp i byggnadens sekundära värmesystem. Radiatorer kan även med fördel placeras i värmesystem där radiatorer i vissa delar är underdimensionerade och därmed inte avger tillräckligt med värme.

Det finns anledning att tro att efterfrågan på komfortkyla kommer att fortsätta öka inom en snar framtid, möjligen inte enbart för kontorsbyggnader utan även för bostäder. Då installation av kylsystem ofta är förknippade med höga kostnader har vi inom ramen för detta arbete undersökt system för kombinerad uppvärmning och kyla. Då det befintliga bostadsbeståndet är stort jämfört med nybyggnationen har vi speciellt undersökt system för kombinerad värme och kyla för befintliga värmesystem. Vi har påträffat två exempel där radiatorsystemet även används, eller använts, för komfortkyla. Genom begränsad installationsinsats kan man på så vis även få tillgång till komfortkyla. Att utnyttja radiatorer för kyla bedöms särskilt intressant för komfortkyla i befintliga bostäder, där behovet av kyleffekt bedöms vara relativt låg.

För att öka potentialen för kyla från radiatorer kan dessa utrustas med radiatorfläktar. På samma sätt som radiatorfläktarna ökar radiatorns värmeavgivning vid värmedrift kan fläktarna även utnyttjas för att radiatorernas kyleffekt vid kyl drift. Kyleffekten kan ökas med upp mellan 34 och 75% beroende på radiortyp utan att fläktarnas hastighet upplevs som störande. Effekten av radiatorfläktar för ökad kylförmåga är störst för en panelradiator, och mindre för en radiator med konvektorplåt. Detta då radiatorer med konvektionsplåt har bättre förutsättningar för naturlig konvektion vilken, vid kyl drift, motverkas av radiatorfläkten.

En annan fördel med att använda radiatorfläktar för att öka kylförmågan från radiatorer är att luftflödet riktas uppåt, vilket motverkar kalla, dragiga golv som annars kan upplevas som komfortstörande.

Kombinerade system för golvvärme och golvkyla som ett intressant byggnadsintegrerat system är i första hand lämplig för nybyggnad eller omfattande renoveringar. Kombinationen golvvärme/kyla utnyttjas på flera håll i världen, och även i Sverige finns enstaka sådana system i drift. Om ett golvvärmesystem dimensioneras för kyla fås ett golvvärmesystem som kan arbeta med låga framledningstemperaturer för uppvärmning. System med golvkyla bedöms vara särskilt intressanta för byggnader med en mycket solinstrålning på golvet, då kylförmågan från systemet då ökar kraftigt.

Gemensamt för samtliga system för att kyla en byggnad är att temperaturerna som används i kylsystemet inte kan vara för låga. Detta för att undvika problem med kondens på rörledningar, kopplingar och de värmeupptagande ytorna.

11 REFERENSER

- Berggren, Ch., Wikström VVS-Kontroll AB / DeltaT AB i Göteborg: Personlig kommunikation, mail samt telefonsamtal 2010-10-13
- Brumm, W.: *"Fragen der Temperaturspreizung"* Fernwärme International, 6. Jahrgang, Heft 3, p. 129-133, 1977
- Churchill, S. W.: *"Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate"* Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, p. 1323-1329, 1975
- Energimyndigheten: *"Energiläget 2010"* Eskilstuna, Sweden, 2010
- Genrup, M.: *"On degradation and monitoring tools for gas and steam turbines"* Doctoral thesis, Lund Institute of Technology, Lund University, 2005
- Hansson, L., Siemens AB, Personlig kommunikation, 2011-05-11
- Holman, J. P.: *"Heat transfer"*, Mcgraw-Hill, 9th edition, 2002
- HVAC Systems and Equipment: *"ASHRAE Handbook 2008"*
- Johansson, P.-O., Wollerstrand, J.: *"Heat Output from Space Heating Radiator with Add-on-fan Blowers"* Conference proceeding from COMSOL – conference, Paris, France, 2010
- Johansson, P.-O.: *"Buildings and district heating - contributions to development and assessments of efficient technology"* Doctoral thesis, Lund Institute of Technology, Lund University, 2011
- Löfstedt L., före detta teknisk chef för Systembolaget AB, personlig kommunikation, telefonsamtal 2011-04-08
- Myhren, J., A., Holmberg, S.: *"Design consideration with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators"* Energy and Buildings 41, p. 92-100, 2009
- Olesen, B.: *"Radiant floor heating in theory and practice"* ASHRAE Journal, July 2002
- Olesen, B.: *"Radiant floor cooling systems"* ASHRAE Journal, September 2008
- Persson, J., Rettig Sweden AB, Personlig kommunikation, telefonsamtal 2010-10-08
- Persson, T.: *"LÅGTEMPERATURVÄRMESYSTEM -En kunskapsöversikt, Centrum för solenergiforskning"* EKOS, Högskolan Dalarna, 2000
- Simmonds, P., Reuss, S., Holst, S., Gaw, W.: *"Comfort conditioning for large spaces"* CIBSE conference, Dublin, 2000
- Svensk fjärrvärme: *"Fjärrvärmetidningen, Tema: Framtidens fjärrvärme"* nummer 2 2011, s. 28-29, 2011

- Trüschell, A.: "Värmesystem med luftvärmare och radiatorer, En analys av funktion och prestanda" Licentiatavhandling, Chalmers, Göteborg, 1999
- Sundén, B., Diskussion med professor B. Sundén, Inst. för energivetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, April 2010
- van der Wijst, R.P.M.M: "Improved performance of hydronic heating systems connected to district heating" Rapport, Inst. för energivetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2011

11.1 Internetreferenser

- A-Energi AB, hemsida: <http://elementflakten.jetshop.se/> , besökt 2010-12-16
- Beka, Produktblad, nedladdat från http://www.beka-klima.de/fileadmin/BeKa/pdf/englisch/TI_K04_BGK_Decke.pdf, besökt 2011-05-20
- Beka, hemsida: <http://www.beka-klima.de/en/cooling-ceiling.html> , besökt 2011-05-20
- Carrier, Produktblad, nedladdat från: <http://www.carrierab.se/produktblad/Carrier-fancoils.pdf> , besökt 2011-05-12
- Clima canal, Produktkatalog, nedladdat från: http://www.bicau.ro/data/MasterLink/h35/f3438/clima_canal.pdf , besökt 2011-05-12
- Epecon, Clima Canal, Produktblad, http://www.epecon.se/flash/pdf/proj/Micro%20Canal%20-%20Technical_handbook%20Engelska%202011-04.pdf , besökt 2011-05-12
- Eveco "Fläktkonvektorer för värme och eller kyla" produktblad nedladdat från: <http://www.eveco.se/Universale.html> , 2011-05-12
- Jupiter: "Control Heating and Cooling" nedladdat från: <http://www.jupiterunderfloorheating.com/uploads/knowledgeBase/Heating&Cooling.PDF> , besökt 2011-05-19
- Lenhovda radiatorfabrik: Nerladdat Excel ark för beräkning av värmeavgivning http://www.lenhovdaradiatorfabrik.se/display_sub.asp?apid=20 , besökt 2010-04-16
- Minib s.r.o.: "MINIB 2009/2010 Product catalogue" nedladdat från: http://www.minib.com/download_language/file/57/minib-en-2010.pdf , besökt 2011-03-17
- Radiator Booster: <http://www.radiatorbooster.com> , besökt 2011-03-16
- Pyrox, FLK: "Produktkatalog" nedladdat från <http://www.pyrox.se/pdf/FLK.pdf> , besökt 2010-12-16

- Socialstyrelsens allmänna råd om temperatur inomhus, SOSFS 2005:15, nedladdad från <http://www.socialstyrelsen.se/sosfs/2005-15>, besökt 2011-12-16
- Statistiska centralbyrån: *"Nybyggnad av lägenheter i flerbostadshus resp. småhus"* hemsida: http://www.scb.se/Pages/TableAndChart_19985.aspx , besökt 2011-01-21
- Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP: "Fönster, Fukt & Innemiljö; Kyla och drag" nedladdad från http://www-v2.sp.se/energy/ffi/kyla_drag.asp, besökt 2011-12-16
- Värmepumpsforum: <http://www.varmepumpsforum.com/vpforum/index.php?topic=20594.0> , besökt 2011-03-15
- Zehnder Rittling, produktkatalog, nedladdad från: <http://www.rittling.com/assets/PDF/Catalogs/ZRZIPCatJan2011web.pdf> , besökt 2011-05-20

KOMBINERAD FJÄRRVÄRME OCH FJÄRRKYLA

Framtida fjärrvärmesystem kommer troligen att ha lägre systemtemperaturer än dagens system. Det kräver att temperaturerna i byggnadernas värmesystem sänks, och för att klara det är så kallade radiatorfläktar ett alternativ.

Genom att ha en fläkt som blåser på radiatorn ökar den konvektiva värmeövergången med upp till 60 procent, visar den här rapporten. Radiatorfläktar kan dessutom användas som komplement för att öka uppvärmningen i rum där den vanliga radiatorn inte räcker till.

En möjlighet att möta efterfrågan på komfortkyla utan att göra stora ombyggnader kan vara att använda det befintliga radiatorsystemet för kombinerad värme och kyla. Fältförsök och simuleringar visar att kyl-effekten från en radiator med radiatorfläkt kan ökas med mellan 34 och 75 procent beroende på radiatortyp, utan att fläktarna är störande.