

ENERGISNÅLA RADIATORSYSTEM FÖR EFFEKTIV LÅGTEMPERATURUPPVÄRMNING OCH GOTT INOMHUSKLIMAT I SMÅHUS

ADNAN PLOSKIC

2019-03-31

FÖRORD

Projektet ”Energisnåla radiatorsystem för effektiv lågtemperaturuppvärmning och gott inomhusklimat i byggnader” har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och pågått från november 2015 till mars 2019. Projektet är en del av den gemensamma satsningen mellan Bravida Sverige AB, SBUF och Kungliga Tekniska högskolan KTH för att underlätta överföringen av forsknings- och utvecklingsresultat från akademien till branschen.

Forskningsarbetet i projektet har i huvudsak utförts och letts av Adnan Ploskić som till vardags arbetar som verksamhetsutvecklare på Bravida Sverige AB och forskare på KTH/Bygghälsan. Arbetet i projektet är en fortsättning av forskningsarbetet som tidigare gjorts i hans doktorsavhandling ”Technical solutions for low-temperature heat emission in buildings” mellan 2008 och 2013 och som i huvudsak har finansierats av SBUF och Energimyndigheten.

I detta projekt har även forskarna Qian Wang (Uponor AB), Sasan Sadrizadeh och Sture Holmberg bidragit med sina synpunkter och sitt arbete. Samtliga tre forskare är verksamma på KTH/Bygghälsan. Den huvudsakliga rapporteringsformen av resultaten var rapporter i internationella tidskrifter och tekniska artiklar i branschpressen. Civilingenjörstudenten Oskar Scheibe och högskoleingenjörstudenterna Filip Boåsen och Stiven Khaled har gett värdefulla bidrag till projektet genom sina examensarbeten. Nedan följer listan med publicerade och inskickade artiklar och övriga bidrag.

Vetenskaplig artikel. Wang Q, Ploskić A, Holmberg S. Low-temperature heating in existing Swedish multifamily houses – An assessment of the significance of radiator design and geometry. Science and Technology for the Built Environment (Taylor & Francis), (2017), 23, 500–511.

Vetenskaplig artikel. Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. Mapping relevant parameters for efficient operation of low-temperature heating systems in Nordic single-family dwellings. Applied Sciences (Switzerland), Vol. 8, No. 10, 2018.

Vetenskaplig artikel. Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment using numerical simulations according to EN 442-2. Submitted to Journal of Building Engineering. November 2018.

Teknisk artikel. Ploskić A. Framledningstemperaturen bestäms av värmebehovet. Energi & Miljö (2016), 50, NR 9 september 2016.

Examensarbete (30 hp, 20 veckor). Scheibe O. Modelling of Heat Transfer for Convection-Boosted Flat Vertical Radiator Surfaces. ABE/KTH. TRITA-STKL; 2017:02. 2017.

Examensarbete (15 hp, 10 veckor). Boåsen F och Khaled S. Termisk komfort med golvvärme eller luftvärme. ABE/KTH. TRITA-ABE-MBT ; 1847. 2018.

SAMMANFATTNING

Det övergripande syftet med projektet var att kartlägga fördelar och begränsningar av befintliga lågtemperaturuppvärmningsmetoder som i dagsläget används i värmepumpsuppvärmda småhus. Syftet var även att ge riktlinjer och dimensioneringskriterier för mer effektivare drift av värmesystem och ett bättre utnyttjande av lågvärdig energi från uthålliga energikällor. Målet var att utforska i vilken grad värmeöverförandeytor, värmeöverföring på luftsidan och vattenflödet igenom rumsvärmare inverkar på dess värmeavgivning och hur allt detta påverkar CO₂ utsläpp från ett typiskt småhus. Målsättningen med detta var att tydliggöra detta komplexa samspel för att underlätta för branschens olika aktörer att få en djupare inblick i hur olika delsystem i en byggnad påverkar och är påverkade av varandra. Förhoppningen är att detta kommer att underlätta och påskynda implementeringen av energieffektiva lösningar i svenska småhus.

Studien var uppdelad i två delar. Huvudsyftet med den första delen av studien var att kartlägga parametrar som styr värmeavgivningen från fyra rumsvärmare som i dagsläget används i småhus. I den andra delen utvärderades potentialen av att använda ett högre vattenflöde i de undersökta värmesystemen. Vidare utvärderades även effekten av luftforceringen och förändringen av konvektionsplåtens design på värmeavgivningen från olika radiator typer. Studien avslutades med en utvärdering av värmespridningen i rummet uppvärmd med en konventionell och nyutvecklad tillufts radiator i denna studie. Baserat på resultaten, följande steg bör göras för att till fullo utnyttja fördelen av lågtemperatursystem i värmepumpsuppvärmda småhus.

- 1) Husets värmeförlust bör minimeras och hållas låg under uppvärmningssäsongen.
- 2) Energi- och effektbehovet för tappvarmvattenberedning och strömningsmaskiner i värmesystemet bör minimeras.
- 3) Värmeavgivningen från rumsvärmare bör maximeras och hållas hög under uppvärmningssäsongen.
- 4) Temperaturfallet mellan framvatten och returvatten i värmesystemet bör inte överstiga 5 °C.
- 5) Förhållandet mellan eleffektbehovet för cirkulationspumpar och systemets värmeavgivning bör hållas omkring 0.2 till 0.6 %.
- 6) Flytande kondensering bör användas i värmepumpen och den bör drivas med dynamisk värmekurva.

Detaljerade förklaringar och förslag hur man kan gå till väga för att åstadkomma de ovannämnda stegen finns i rapporten.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND	5
1.1 HÖGTEMPERATUR OCH LÅGTEMPERATUR UPPVÄRMNINGSSYSTEM.....	5
1.1.1 Lågflödesystem	6
1.1.2 Högflödesystem.....	6
1.2 SYFTE OCH MÅL	7
2. METOD	7
3. RESULTAT OCH DISKUSSION	8
3.1 VATTENFLÖDETS INVERKAN PÅ VÄRMEAVGIVNINGEN FRÅN VÄRMESYSTEM.....	10
3.2 BETYDELSEN AV KONVEKTIONSPLÅTAR FÖR VÄRMEAVGIVNINGEN FRÅN PLÅTRADIATORER	11
3.3 NYTTAN AV FORCERAD KONVEKTION FÖR LÅGTEMPERATURRADIATORER.....	12
3.4 VÄRMEDISTRIBUTION I RUM MED LÅGTEMPERATUR-TILLUFTSRADIATORER	14
4. SLUTSATSER.....	17
REFERENSER	19
BILAGOR	19

1. BAKGRUND

Bebyggelsen i Sverige i dagsläget står för ungefär en tredjedel av landets totala energianvändning (Svensk Ventilation 2009). Mer än två tredjedelar av denna energianvändning går åt till uppvärmning och varmvattenberedning [1, 2]. Direktverkande och vattenburen elvärme är fortfarande det mest förekommande uppvärmningssättet i svenska småhus. Omkring 30 % av landets småhus, cirka 600 000 stycken, värmdes med enbart el under år 2016 och nära hälften var utrustade med någon typ av värmepump vid denna tidpunkt (Energimyndigheten 2015). Vattenburen värme tillsammans med olika typer av värmepumpar användes i cirka en halv miljon småhus vid denna tid.

Trots att antalet installerade värmepumpar i svenska småhus har ökat nästan oavbrutet sedan 1980-talet och att värmepumparna i dagsläget står för över 30 % av energianvändningen i svensk bebyggelsen [1], har relativt lite forskning ägnats åt att utveckla tekniker för att öka värmeavgivningen från rumsvärmare i värmepumpsbetjänta hus. Det är allmänt känt att värmepumpens värmefaktor (effektivitet) ökar med minskad framledningstemperatur i värmesystemet. Värmefaktorn är ett mått på hur mycket värme värmepumpen ger i förhållande till elanvändningen. Ju högre värmefaktor desto högre effektivitet desto lägre elanvändning. Erfarenhet har visat att värmefaktorn ökar med 1-2 % per grad minskad framledningstemperatur. För att en rumsvärmare skall kunna avge samma eller högre värmeeffekt vid en lägre framledningstemperatur måste dess värmeavgivningsförmåga ökas. Värmeavgivningen kan ökas på fyra sätt.

- 1) Genom ökning av rumsvärmarens värmeöverförande yta (ytvärmesystem).
- 2) Genom ökning av antalet rumsvärmare per värmekrets (radiatorsystem).
- 3) Genom ökning av konvektiv värmeöverföring på luftsidan i rumsvärmare (fläktkonvektorer, tilluftsradiorer).
- 4) Genom ökning och/eller pulsering av vattenflödet igenom rumsvärmare (radiatorer, konvektorer, golvvärmslingor, etc.)

1.1 Högtemperatur och lågtemperatur uppvärmningssystem

Värmedistributionssystem kan grovt indelas i fyra underkategorier: lågtemperatursystem, högtemperatursystem, lågflödesystem och högflödesystem. Tabell 1 visar hur samma värmeeffekt kan fås från en vattenradiator med de fyra systemen. Högflödesystem är den vanligaste injusteringsmetod för radiatorsystem i småhus med värmepump. Det dimensionerande temperaturfallet i dessa system brukar normalt begränsas till 10-15 °C i dagsläget. Detta oftast möjliggör användning av en låg framledningstemperatur vilket är gynnsamt för värmepumpen.

Lågflödesystem används vanligtvis i flerbostadshus och är en injusteringsmetod som har tagits fram för att effektivisera värmeanvändningen i större fjärrvärmebetjänta hus. Temperaturfallet i dessa system brukar normalt sättas till 40-50 °C vid dimensionerande utetemperatur vilket resulterar i ett lågt vattenflöde i värmekretsarna. Detta leder till att tryckförlusterna i dessa system kan i princip försummas [3].

Tabell 1. Värmeavgivning från en plåtradiator av typ 22 (1.2 m x 0.6 m) med olika temperatur-och flödesystem.

Värmedistributionssystem	Rumsyta m ²	Fram °C	Retur °C	Temperaturfall °C	Vattenflöde kg/h	Värmeavgivning W	W/m ²
Högtemperatur/lågflöde	20	65	26.0	39.0	12.9	580	29
Medeltemperatur/lågflöde	20	55	29.3	25.7	19.6	580	29
Lågtemperatur/högflöde	20	45	34.6	10.4	48.6	580	29
Lågtemperatur/högflöde	20	41	37.8	3.20	158	580	29

Det bör noteras att klassificeringen i tabell 1 är tämligen grov. I moderna lågenergihus kan både en låg framledningstemperatur och ett lågt vattenflöde erhållas samtidigt. I lågenergihus betjänta av det så kallat lågtemperaturfjärrvärmesystem är dimensionerande framledningstemperatur omkring 50-55 °C och temperaturfallet är cirka 30-25 °C. Detta resulterar i ett vattenflöde på ungefär 12-13 kg/h per radiator vid ett värmebehov på cirka 20 W/m² uppvärmd golvyta. Enligt tabell 1 är detta ett lågflödesystem. Detta visar att ett högt vattenflöde inte är ett måste i ett låg(medel)temperatursystem.

I dagsläget råder det ingen fullständig enighet i branschen vilket flödessystem skall användas i radiatorsystemen. Lågflödessystem, som nämndes ovan, användas vanligen i fjärrvärmebetjänta flerbostadshus och högflödesystem i värmepumpsbetjänta småhus. Nedan ges en kort sammanfattning över för- och nackdelarna med båda systemen.

1.1.1 Lågflödesystem

Ett lågflödesystem förknippas normalt med hög framledningstemperatur i värmekretsarna. Problem med oljud i reglerventilerna är ytterst sällsynta i detta system. Systemet normalt ger en jämnare rumstemperatur i lägenheterna och stort temperaturfall i systemet lämnar möjligheten för eventuella efterjusteringar. Stamregleringsventiler behövs i princip inte vilket minskar investeringskostnad. Tryckförlusterna i detta system är låga vilket gör att även eleffektbehovet för cirkulationspumparna är också lågt. Lågflödesystemet är dock ofta inte lämpat för värmepumpsbetjänta system på grund av dess höga framledningstemperatur. Vidare kan de låga vattenhastigheter (≈ 10 till 45 mm/s) i termostatventilerna ge upphov till igensättning.

1.1.2 Högflödesystem

Ett högflödesystem förknippas normalt med lägre framledningstemperaturer. Höga vattenflöden i detta system kan ge upphov till oljud i ventiler om dessa är felinställda. Om distributionsnätet är för klen dimensionerat kan detta orsaka stora tryckförluster i systemet vilket i sin tur leder till ett ökat eleffektbehov för cirkulationspumpar. Systemet är oftast inte lämpat för stora värmeuppvärmningssystem, såsom flerbostadshus, då det kan skapa en ojämn värmefördelning i värmekretsarna. Höga vattenhastigheter i termostatventilerna (≈ 70 -175 mm/s) minskar risken för igensättningar. Högt vattenflöde möjliggör minskning av framledningstemperaturen i systemet vilket gynnar värmepumparna. Högflödesystem är därför oftast mer lämpligt för användning i ett småhus med värmepumpen.

1.2 Syfte och mål

Det övergripande syftet med projektet var att kartlägga fördelar och begränsningar av befintliga lågtemperaturuppvärmningsmetoder som i dagsläget används i värmepumpsuppvärmda småhus. Syftet var även att ge riktlinjer och dimensioneringskriterier för mer effektivare drift av värmesystem och ett bättre utnyttjande av lågvärdig energi från uthålliga energikällor. Målet var att utforska i vilken grad värmeöverförande ytor, värmeöverföring på luftsidan och vattenflödet igenom rumsvärmare inverkar på dess värmeavgivning. Hypotesen var att värmeavgivningen från rumsvärmare kan ökas med omkring 25 % genom en effektiv integrering med tillförd ventilationsluften (tilluftsradiatorer) och en ökning av dess värmeöverförande ytor och vattenflödet igenom dem.

2. METOD

Projektet inleddes med insamling och granskning av relevant litteratur. Data och information från vetenskapliga artiklar och tekniska rapporter har främst använts. Värmeavgivningen från undersökta radiator typer erhöles med hjälp av radiator tillverkarens värmeeffektsimulator. Värmeeffekter i simulatören framtoqs enligt den rådande Europeiska Normen EN 442-2 från år 1997 av en oberoende laboratorium. Högsta tillåtna mätosnoggrannhet enligt denna metod är $\pm 2 \%$ [4]. Simulatören var skapad i kalkylprogrammet Microsoft Excel och kunde simulera värmeeffekten (värmeavgivningen) för varje enskild radiator typ beroende på dess dimensioner, framlednings-, retur och rumstemperatur.

Vidare användes analytiska och numeriska (eng. Computational Fluid Dynamics, CFD, beräkningsströmningsdynamik) simuleringar för att beräkna värmeöverföringsgraden inuti de undersökta radiator typerna och för att simulera värmedistribution inuti ett rum. Kommersiella CFD-programvaror ICEM och FLUENT har använts i simuleringsarbetet.

I varje delmoment (artikel) i projektet en ansenlig del av tiden har ägnats åt valideringsarbetet. God överrensstämmelse mellan tidigare mätningar och utförda numeriska och analytiska beräkningar har uppnåtts i varje delmoment. Avvikelsen mellan dessa tre metoder var mindre än 5 %.

En stor del av tiden i projektet ägnades också åt att i detalj kartlägga samspelet mellan husets värmebehov, värmesystemets drifttemperaturer och driftflöden, resursbehovet för värmeproducerande enheter och resulterande CO₂-emissioner från huset. Målsättningen var att tydliggöra det komplexa samspelet för att underlätta för branschens olika aktörer att få en djupare inblick i hur olika delsystem i en byggnad påverkar och är påverkade av varandra.

3. RESULTAT OCH DISKUSSION

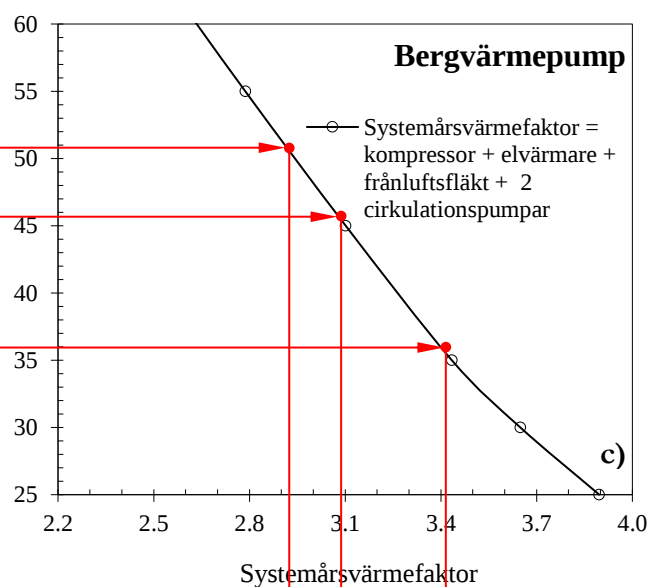
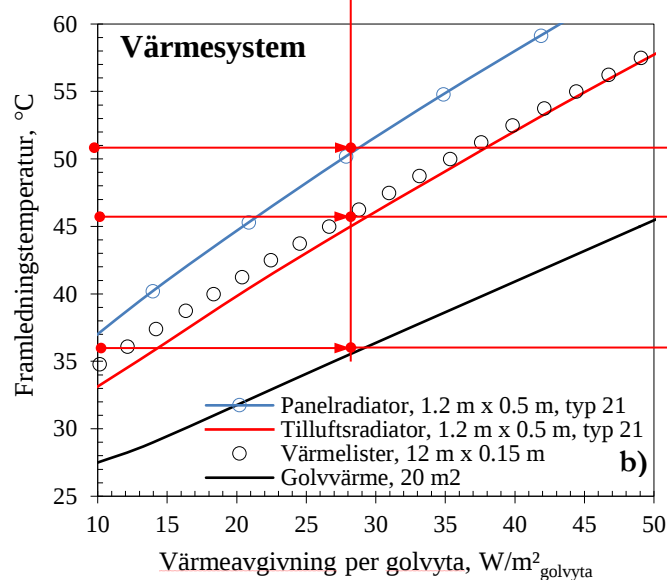
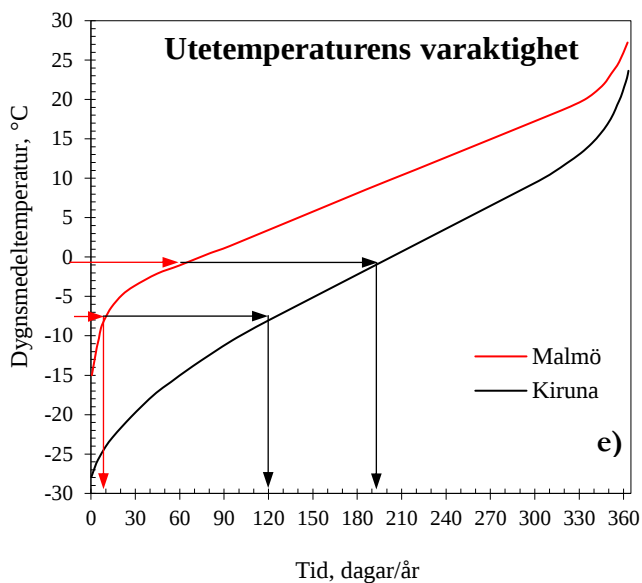
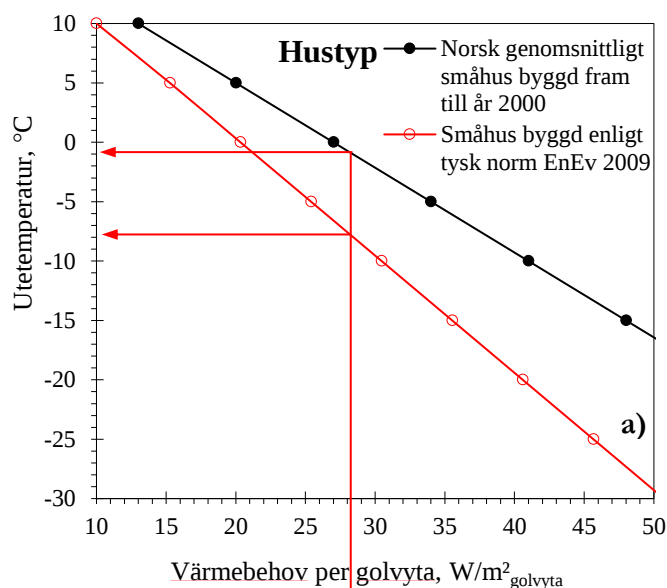
Figurerna 1a till 1e visar hur olika parametrar påverkar byggnadens CO₂-utsläpp. Figur 1a visar hur värmebehovet ökar med fallande utetemperatur för två småhus med olika värmeisoleringsgrad. Enligt figuren är värmebehovet för ett småhus byggt enligt den tyska normen EnEv från 2009 (lågenergihus) i genomsnitt 34 % lägre än värmebehovet för ett ”genomsnittligt” småhus byggt fram till år 2000 i Norge. I figuren under, figur 1b, visas hur värmeavgivningen från tre radiatorsystem och ett golvvärmesystem varierar med framledningstemperaturen. Enligt figuren avger den valda tilluftsradiatorn och värmelister ungefär 28 W/m² golvyta värme vid en framledningstemperatur av 45 °C. Enligt figur 1a motsvarar detta värmebehovet för det valda lågenergismåhuset vid en utetemperatur av -8 °C. För det ”genomsnittliga” småhuset inträffar samma värmeförlust vid en utetemperatur på ungefär -1 °C.

Figur 1c visar hur systemårsvärmefaktorn ändras med framledningstemperaturen för ett värmesystem i ett småhus med bergvärmepump. Det kan konstateras att användning av tilluftsradiorer eller värmelister i stället för konventionella panelradiorer skulle öka systemets värmefaktor med ungefär 6 %. Med golvvärmesystem skulle ökningen varit omkring 17 %. Figuren visar att systemårsvärmefaktorn ökar med cirka 1.1 % per grad minskad framledningstemperatur i intervallet 50 °C till 35 °C. Ökningen hade varit ungefär den dubbla vid en halvering av energibehovet för tappvarmvatten och driftelen för cirkulationspumpar och frånluftsfläkt. I det fallet hade ökningen av systemets värmefaktor varit cirka 12 %.

Figur 1d att husets CO₂-utsläpp skulle vara ungefär 6.5 procent lägre vid användningen av tilluftsradiorer eller värmelister i stället för konventionella panelradiorer. Det kan därmed konstateras att det råder en nära koppling mellan husets energianvändning och dess CO₂-utsläpp. Ju bättre huset är isolerat desto lägre värmebehov desto energisnålare värme- och ventilationssystemen och desto lägre CO₂-utsläpp.

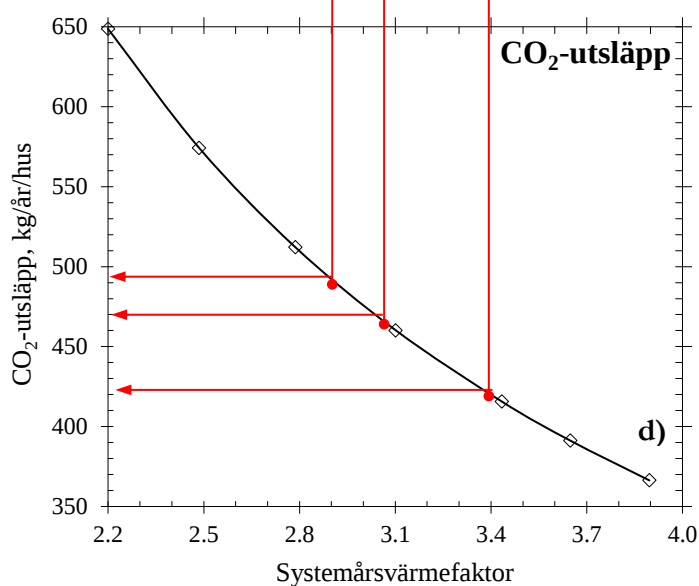
Figur 1e visar utetemperaturens varaktighet under ett normalt år i Malmö och Kiruna. Diagrammet visar att dygnsmedeltemperaturer lägre än -8 °C varar under cirka 120 dygn i Kiruna. Motsvarande varaktighet är omkring 9 dygn för Malmö. Det betyder att en framledningstemperatur högre än 45 °C behövs endast under köldtoppar i lågenergismåhus uppvärmda med tilluftsradiorer eller värmelister i Malmöregion. Vidare visar figurer 1b, 1a och 1e att en framledningstemperatur högre än 45 °C krävs endast vid dimensionerande värmeeffektbehovet i lågenergismåhus med golvvärmesystem i Kiruna. Det kan således konstateras att husets värmeisoleringsgrad är avgörande för framledningstemperaturen i ett värmesystem. Ju bättre värmeisoleringsgrad desto lägre framledningstemperatur kan användas liksom lägre elbehov för värmepumpen.

Figurerna 1a till 1d och tillhörande förklaringar är tagna från vår artikel ”*Framledningstemperaturen bestäms av värmebehovet*” som publicerades i tidskriften Energi & Miljö i september 2016 [5]. Alla detaljer och indata som användes till att skapa figurerna kan hittas i denna artikel.



Figur 1a-1d. a) Värmebehov per tempererad golvyta. Golvyta = 20 m². b) Värmeavgivning per tempererad golvyta. c) Förändring av systemårsvärmefaktor med framledningstemperatur. Tappvarmvatten (3 MWh/år), cirkulationspumpar: brinekretsen (288 kWh/år), värmekretsen (317 kWh/år), frånluftsfläkt (158 kWh/år). d) Småhusets CO₂-utsläpp som funktion av systemårsvärmefaktor. Indata till figurerna finns i [5].

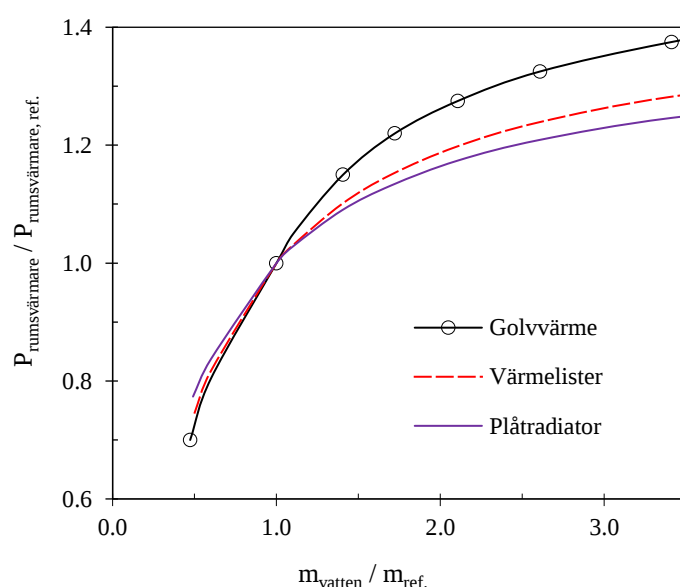
Figur 1 e. Utetemperaturens varaktighet (dygnsmedeltemperatur) under ett normalt år för Malmö och Kiruna.



3.1 Vattenflödets inverkan på värmeavgivningen från värmesystem

Prestandan av radiator- och golvvärmesystemet i figur 1b utvärderades vid ett standard temperaturfall på 10 °C respektive 5 °C. Dessa temperaturfall är vanliga i värmepumpsuppvärmda småhus. Figur 2 visar effekten av ökat vattenflöde från 36 kg/h till 126 kg/h (med 3.5 gånger) igenom de tre undersökta rumsvärmarna. Figuren visar att golvvärme har den största och plåtradiatorn (panelradiatorn) den minsta fördelen av ökat vattenflöde. Ökningen av vattenflödet från 36 kg/h till 126 kg/h ökade värmeavgivningen från golvvärme med omkring 38 %. Motsvarande ökning var 28 % för värmelister och 25 % för radiatorn. Det kan därmed konstateras att en ansevärd ökning av värmeavgivningen kan åstadkommas genom ökningen av vattenflödet igenom en rumsvärmare. Det bör dock påpekas att effekten av vattenflödesökning är mer verkningsfull för värmesystem med högre värmeavgivningseffektivitet (t.ex. golvvärme). Detta visas tydligt i figur 2.

Mer detaljer om vattenflödets inverkan på värmeavgivningen från de analyserade rumsvärmarna finns i vår artikel ”Mapping Relevant Parameters for Efficient Operation of Low-Temperature Heating Systems in Nordic Single-Family Dwellings” som publicerades 2018 i vetenskapliga tidskriften Applied Sciences [6]. Där visade vi bland annat att inre diameter av distributionsrören i ett golvvärmesystem bör vara omkring 13 mm för att ökningen av vattenflödet från 36 kg/h till 126 kg/h inte skall medföra en oacceptabel ökning av eleffektbehovet för cirkulationspumpen.



Figur 2. Relativ förändring av värmeavgivningen som funktion av relativ förändring av vattenflödet igenom rumsvärmaren. $m_{\text{ref.}} = 0.01 \text{ kg/s}$. $P_{\text{rumsvärmare, ref.}}$ = värmeavgivning vid $m_{\text{ref.}}$.

3.2 Betydelsen av konvektionsplåtar för värmeavgivningen från plåtradiatorer

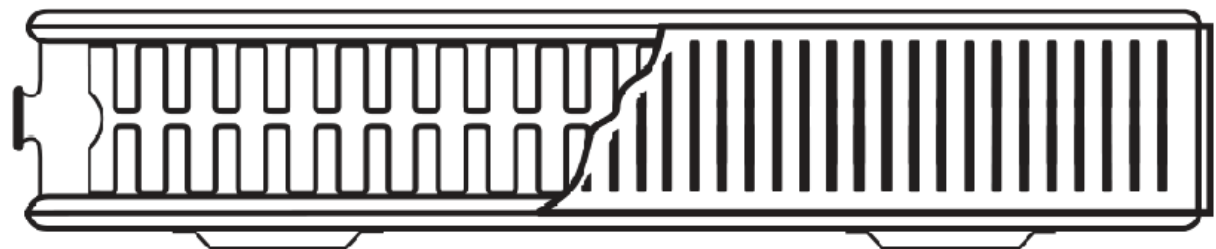
I artikeln ”*Low-temperature heating in existing Swedish multi-family houses - An assessment of the significance of radiator design and geometry*” som publicerades 2017 i den vetenskapliga tidskriften Science and Technology for the Built Environment [7], undersökte vi hur utformningen av plåtradiatorernas geometri och deras sekundära ytor (konvektionsplåtar) inverkar på deras värmeavgivning. Tre designtyper undersöktes. Figuren 3 visar de tre undersökta radiator typer.



Radiator typ 11



Radiator typ 21



Radiator typ 22

Figur 3. De tre undersökta radiator typerna. Översta figuren visar radiator typ 11 (en vattenpanel + en konvektionsplåt), mittersta typ 21 (två vattenpaneler + en konvektionsplåt) och nedersta visar typ 22 (två vattenpaneler + två konvektionsplåtar).

De viktigaste resultaten från artikeln är sammanfattade i tabell 2. Av tabellen framgår att vattenpanelerna står för den största andelen av värmeavgivningen hos plåtradiatorerna. I genomsnitt avger vattenpanelerna omkring fem gånger mer värme än de intilliggande konvektionsplåtarna. Vidare visar tabellen att värmeavgivningseffektivitet är högre hos radiatorer med lägre höjd. Genom att minska radiatorhöjden från 0.45 m till 0.3 m kan framledningstemperaturen minskas med cirka 4 °C utan att värmeavgivningen reduceras. Förutsättningen för detta är att radiatorns totala värmeöverföringsyta hålls oförändrad. Praktiskt innebär detta att radiatorer av samma värmeöverförande yta med lägre höjd kan arbeta med lägre

värmekurva utan att ge avkall på värmeavgivningen. Detta är gynnsamt för både värmepumpar och fjärrvärmesystem.

Tabell 2 visar att värmeavgivningen från radiatortyp 21 (1.2 m x 0.4 m) och typ 22 (1.2 m x 0.3 m) är i princip den samma. Vidare är exergianvändningen av typ 22 (0.7 m x 0.45 m) cirka 8 % högre jämfört med typ 21 (1.2 m x 0.4 m) trots att bådass kompakthet (V/A förhållandet) är nästan den samma. Det finns därmed inget termodynamiskt belägg att föredra det mer kompakta alternativet (typ 22 över typ 21) om den totala värmeöverföringsytan hos radiator typerna är snarlik. Detta faktum bör särskild beaktas vid byggnadsrenoveringar som omfattar utbytet av befintliga radiatorer.

Tabell 2. Termisk prestanda av plåtradiator typer 11, 21 och 22. Alla tre typer hade samma värmeöverföringsyta $3.7 \text{ m}^2 \pm 4 \%$. A = värmeöverförande yta. V = radiatorns omslutande volym. Ex = exergi.

	L_{radiator}	H_{radiator}	θ_{fram}	θ_{retur}	P_{radiator}	Φ_{paneler}	$\Phi_{\text{konv.plåt}}$	$\frac{\Phi_{\text{paneler}}}{\Phi_{\text{konv.plåt}}}$	$(A/V)_{\text{radiator}}$	$(Ex/P)_{\text{radiator}}$
Radiator	m	m	°C	°C	W	W/m ²	W/m ²	[-]	m ² /m ³	[-]
Typ 11	1.2	0.45	54.7	44.7	447	266	57.8	4.60	-	0.158
Typ 21	1.2	0.40	50.5	40.5	447	196	31.4	6.25	111	0.147
Typ 21	1.0	0.45	52.3	52.3	447	210	32.5	6.45	112	0.152
Typ 22	1.2	0.30	50.7	40.7	447	211	54.8	3.85	105	0.147
Typ 22	0.7	0.45	55.0	45.0	447	237	57.8	4.10	114	0.159

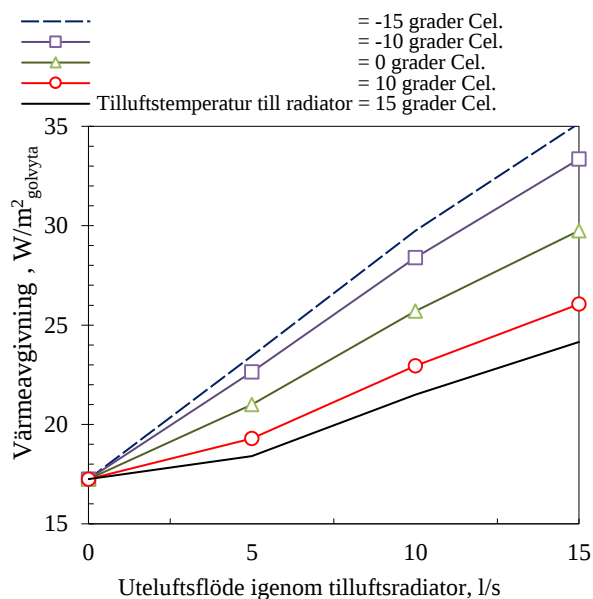
3.3 Nyttan av forcerad konvektion för lågtemperaturreadiatorer

I artikeln *Low-temperature heating in existing Swedish multi-family houses - An assessment of the significance of radiator design and geometry* [7] visade vi också att värmeöverföringen mellan radiatorpanelerna minskar kraftigt med minskad framledningstemperatur. Låg framledningstemperatur ($< 45^\circ\text{C}$) gör att temperaturgradienten mellan radiatorpanelerna och mellanliggande luftspalten minskar avsevärt. Detta resulterar i att luften mellan radiatorpanelerna får en låg vertikal hastighet och börjar i princip fungera som en värmeisolator vid låga framledningstemperaturer. Detta sker främst när panelernas yttemperatur börjar närma sig luftens temperatur mellan panelerna. Ett sätt att lösa denna begränsning är att forcera luften som finns ”infångad” mellan panelerna.

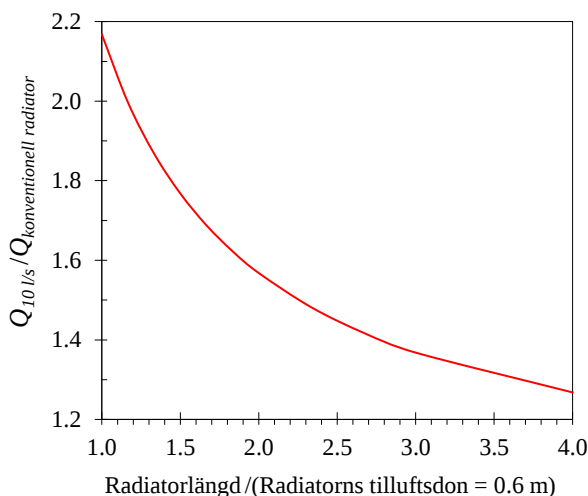
Det finns olika tekniska lösningar för att skapa denna nödvändiga forcering. En av dessa är att använda så kallade tilluftsradiorer. Arbetsprincipen för dessa radiatorer är tämligen enkel. Undertrycket i frånluftsventilerade hus gör att kall utomhusluft kan sugas in genom en kanal i ytterväggen och tvingas att strömma mellan radiatorpanelerna. Inkommande luften stiger då mellan varma paneler, värms upp och kommer in i rummet. Fördelen med denna lösning är tvåfaldig. Dels att luftforceringen mellan radiatorpaneler skapas vilket medför att konvektionen ökar och dels att temperaturskillnaden mellan den inkommande kalla luften och varma paneler hålls stor. Detta ökar avsevärt värmeöverföringsförmåga hos tilluftsradiorer vilket resulterar i en större värmeavgivning.

Figur 4a visar hur värmeavgivningen från en 1.2 m bredd och 0.4 m hög tillufts radiator av typ 21 med framlednings- och returtemperatur 45°C/35°C varierar med förändring av tilluftstemperaturen och luftflödet igenom den. Ju högre luftflöde igenom den och ju kallare tilluftstemperaturen (d.v.s. utelufts temperaturen) är desto högre blir värmeavgivning från radiatoren. Figuren visar att värmeavgivningen vid en utetemperatur av -15 °C och luftflödet av 15 l/s är cirka två gånger högre än vid luftflödet av 0 l/s. Praktiskt innebär detta att värmeavgivningen från en tillufts radiator, under de angivna förhållandena, är två gånger högre än från en motsvarande konventionell radiator. Den totala värmeavgivningen från den valda tillufts radiatorn, under de ovan angivna förhållanden, är drygt 700 W. Om vi antar att radiatoren skall värma ett rum på 20 m² blir den specifika värmeavgivningen 35 W/m² golvyta, vilket också visas i figur 4a. Enligt figur 1a motsvarar detta värmeförlusten från det valda lågenergismåhuset vid en utetemperatur på cirka minus 15 °C. Rätt dimensionerade tillufts radiatorer kan således täcka både transmissions- och ventilationsvärmeförluster av ett lågenergismåhus vid nästan dimensionerade utetemperatur i Stockholmsregionen med en framledningstemperatur på cirka 45 °C. Vidare bör noteras att det valda ventilationsflödet (uteluftsflödet) på 15 l/s är drygt två enheter högre än vad som i nuläget rekommenderas av rådande Boverkets byggregler (0.35 l/s per m² golvyta). Detta visar att lågtemperatur-tillufts radiatorer kan både täcka värmeförluster och möjliggöra användningen av ett högt ventilationsflöde i lågenergismåhus i centrala Sverige även vid köldtoppar.

Figur 4b åskådliggör en annan viktig parameter hos tillufts radiatorer som är viktigt för dess värmeavgivning och som måste beaktas vid dimensioneringen. Figuren visar hur värmeavgivning från tillufts radiatorn använd i figur 4a ändras med dess längd. När tillufts radiatorns längd är lika med längden av tillufts donet under den ($\text{Radiatorlängd} / (\text{Radiators tillufts don} = 0.6 \text{ m})$) blir dess värmeavgivning omkring 2.2 gånger (= 320 %) högre än från en motsvarande konventionell radiator. När radiatorlängden är 4 gånger längre (=2.4 m) än tillufts donens längd (=0.6 m) minskar skillnaden i värmeavgivningen mellan radiator typerna till 27 %. Man kan således konstatera att ju längre en tillufts radiator är och ju varmare och lägre utelufts flödet forceras igenom den desto mer minskar dess värmeavgivning och desto mer närmar den sig avgivningen hos en motsvarande konventionell radiator. Detta faktum är viktigt att beakta för att inte överskatta tillufts radiatorernas potential i dimensioneringsskedet.



Figur 4a. Värmeavgivningen från tilluftsradior vid olika tilluftstemperaturer och uteluftsflöden igenom den. Lägsta tilluftstemperaturen till rummet var 13 °C vid uteluftsflödet av -15 °C och 15 l/s. Rumsyta = 20 m². Radiator: längd/höjd/typ = 1.2 m/0.4 m/21. Framledningstemperatur/returtemperatur 45°C/35°C.



Figur 4b. Förändring av relativ värmeavgivning med radiatorlängd för tilluftsradior från figur 3a. $Q_{10 \text{ l/s}}$ = värmeeffekt från tilluftsradior vid uteluftsflöde av -5 °C och 10 l/s igenom radiatorn. $Q_{\text{konventionell radiator}}$ = värmeeffekt från motsvarande konventionell radiator. Framledningstemperatur/returtemperatur 45°C/35°C.

3.4 Värmedistribution i rum med lågtemperatur-tilluftsradiorer

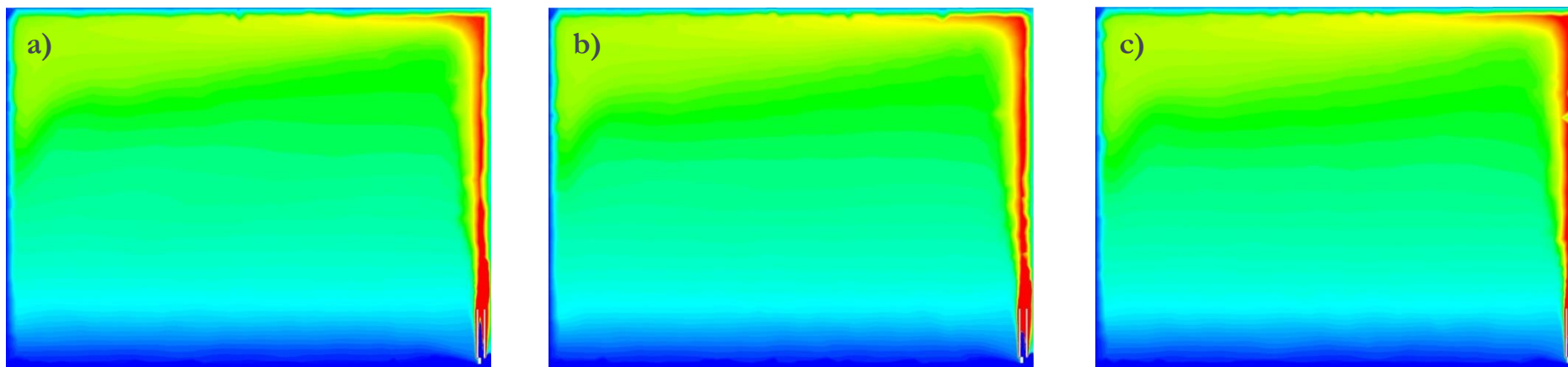
Resultat i detta projekt har visat att byggnadens totala värmeeffektbehov är den avgörande parametern för att ett lågtemperaturssystem skall kunna användas för uppvärmning i ett småhus. En annan lika viktig parameter för att temperaturen på framledningsvattnet skall kunna hållas låg är den upplevda termiska komforten i de uppvärmda rummen. Detta gäller särskilt rummen som värms med tilluftsradiorer då den kalla inkommande uteluften både tillförs och värms lokalt i radiatorerna.

Figurer 5 och 6 visar hur ett inkommande uteluftsflöde av -5 °C och av 5 l/s respektive 10 l/s värms i en 1.2 m bredd och 0.4 m hög tilluftsradior av typ 21 med framlednings- och returtemperatur 45°C/35°C. Figurer visar också hur uppvärmningen av inkommande uteluften påverkas av designen hos konvektionsplåten. Tre plåtkonstruktioner har utvärderats: a) konventionell plåtdesign med kontinuerliga vertikala konvektionskanaler, b) vertikala konvektionskanaler förskjutna en gång i mitten (eng. staggered (offset) convection channels), c) vertikala konvektionskanaler förskjutna två gånger.

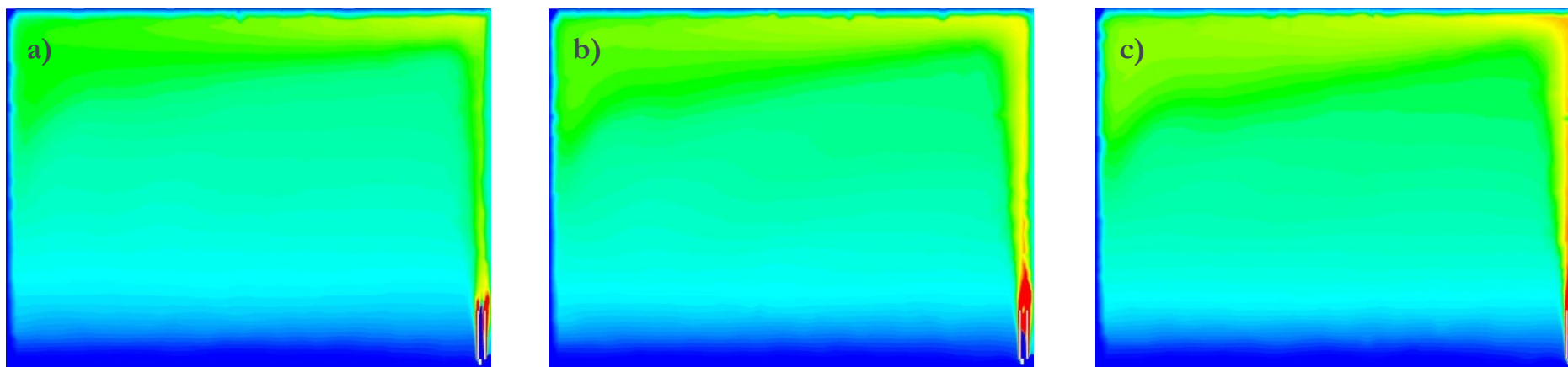
Det är tydligt att konvektionsströmmar ovanför radiatorn i fallet med uteluftsflödet av 5 l/s igenom radiatorn (figur 5) är avsevärt varmare än i fallet med luftflödet av 10 l/s (figur 6) igenom den. Detta är rimligt då båda luftflöden värms med samma framlednings- och returvatten (45°C/35°C). Tilluftstemperaturen till rummet i fallet med 10 l/s igenom radiatorn och med konventionella konvektionskanaler är omkring 20 °C (figur 6 a). Denna temperatur är ungefär 10 °C högre för luftflödet av 5 l/s för samma plåtdesign.

Figurerna visar också att nyttan av förskjutna kanaler är mera effektiv vid ett högre luftflöde genom radiatorn. Tilluftstemperaturen till rummet i fallet med radiatorn med två gånger förskjutna konvektionskanaler var cirka 26 °C (figur 6 c) för luftflödet av 10 l/s, vilket är 6 °C högre än i fallet med konventionella kanaler (figur 6 a). Motsvarande temperaturskillnad är omkring 3 °C för luftflödet av 5 l/s genom radiatorn. Vidare visar figurerna att värmedistributionen i rummet är mycket jämn. Medelluftstemperatur är runt 20 °C i vistelsezonen och både den vertikala och horisontella temperaturvariationen i rummet är inom 2 °C. Det kan därmed konstateras att en låg framledningstemperatur kan användas vid låga utetemperaturer utan att göra avkall på den termiska komforten.

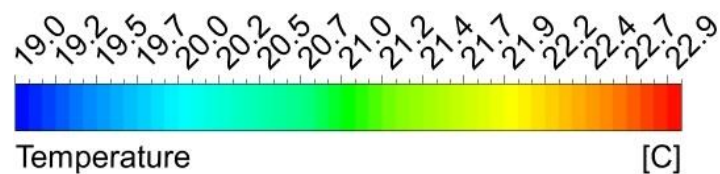
Mer detaljer om konvektionsplåtens och uteluftsflödets inverkan på värmeavgivningen från tilluftsradiatorn och deras gemensamma inverkan på den upplevda termiska komforten finns i vår artikel "*A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment using numerical simulations according to EN 442-2*" som skickades till den vetenskapliga tidskriften Journal of Building Engineering i november 2018 [8].



Figur. 5. Utluftsfövärmning och värmedistribution i ett 4 m x 4 m x 3 m rum. Utluftsfövärmning genom radiatorn -5 °C och 5 l/s.



Figur. 6. Utluftsfövärmning och värmedistribution i ett 4 m x 4 m x 3 m rum. Utluftsfövärmning genom radiatorn -5 °C och 10 l/s. a) Tilluftsradiator med konventionella konvektionskanaler, b) tilluftsradiator med förskjutna konvektionskanaler i mitten, c) tilluftsradiator med två gånger förskjutna konvektionskanaler.



SBUF stödjer
forskning & utveckling

som leder till
praktisk handling

4. SLUTSATSER

I detta projekt kartlades samspillet mellan värmebehov, värmesystemets drifttemperaturer och driftflöden, resursbehovet för värmeproducerande enheter och resulterande CO₂-emissioner från ett typiskt småhus. Målsättningen med detta var att tydliggöra detta komplexa samspel för att underlätta för branschens olika aktörer att få en djupare inblick i hur olika delsystem i en byggnad påverkar och är påverkade av varandra. Förhoppningen är att detta kommer att underlätta och påskynda implementeringen av energieffektiva lösningar i svenska småhus.

Studien var uppdelad i två delar. Huvudsyftet med den första delen av studien var att kartlägga parametrar som styr värmeavgivningen från fyra rumsvärmare som i dagsläget används i småhus. I den andra delen utvärderades potentialen av att använda ett högre vattenflöde i de undersökta värmesystemen. Vidare utvärderades även effekten av luftforceringen och förändringen av konvektionsplåtens design på värmeavgivningen från olika radiatortyper. Studien avslutades med en utvärdering av värmespridningen i rummet uppvärmd med en konventionell och nyutvecklad tillufts radiator i denna studie. Baserat på resultaten kan följande konkluderas:

- a) I dagsläget finns det inte en enhetlig konsensus om vad som kan anses vara ett uppvärmningssystem för lågtemperatur. Olika forskningsrapporter rekommenderar dock att framvatten i ett värmesystem inte bör överstiga 45 °C för det skall anses vara ett lågtemperaturssystem i dagsläget. Det finns dock ingen enighet om denna framledningstemperatur skall användas vid dimensionerande utetemperatur, medelvintertemperaturen eller, till exempel, medeldygnstemperatur under de tre kallaste månaderna.
- b) Husets totala värmebehov är avgörande för att framvatten av låg temperatur skall kunna användas i ett värmesystem. Byggnadens värmeisoleringsgrad och värmeåtervinning ur frånluften är således en förutsättning för att ett lågtemperatursystem skall kunna användas för uppvärmning.
- c) Utförda simuleringar har visat att värmeförluster mellan ungefär 20 och 28 W/m² uppvärmd golvyta bör kunna täckas med framvatten av 45 °C i radiatoruppvärmda småhus.
- d) Små temperaturdifferenser i alla led bör användas i möjligaste mån i värmepumpsuppvärmda småhus. Temperaturskillnaden mellan framvatten och returvatten bör hållas omkring 5 °C i lågtemperaturuppvärmningssystem.
- e) Effekt- och energibehovet för tappvarmvattenberedning och cirkulationspumpar måste minimeras för att till fullo utnyttja fördelen av lågtemperatursystem i värmepumpsuppvärmda småhus. Detta är av stor betydelse för hela systemets effektivitet (systemets årsvärmefaktorn).
- f) Nuvarande tumregler för dimensionering av värmesystem är inte alltid lämpliga för lågtempererade uppvärmningssystem i småhus. I väldimensionerade golvvärmesystem kan

gränsen för tryckförlust i distributionsrören ökas från nuvarande 100 Pa/m till omkring 350 Pa/m utan att eleffektbehovet för cirkulationspumpen avsevärt ökar. Lika gäller värmevattenflödet. I välbalanserade och väldimensionerade värmesystem kan värmevattenflödet ökas från cirka 0.01 kg/s till ungefär 0.035 kg/s per rumsvärmare utan att systemets elbehov ökar. Denna ökning av värmevattenflödet skulle öka värmefaktorn hos den anslutna värmepumpen med upptill 10 %.

- g) För att undvika oönskad ljudgenerering i systemet vid ökat värmevattenflöde från 0.01 kg/s till 0.035 kg/s per rumsvärmare bör termostatventilernas Kv-värdet inte vara lägre än 0.45 m³/h.
- h) Eleffektbehovet för cirkulationspumpar i lågtemperatursystem bör vara mellan 0.2 och 0.6 % av systemets totala värmeavgivning för att säkerställa en fördelaktig balans mellan elbehovet och värmeavgivningen. Minsta inre diametern hos distributionsrören i lågtempererat uppvärmningssystem bör inte vara under 10 mm.
- i) Dagens plåtradiatorer är inte byggda för drift med låga framledningstemperaturer. Ett sätt kompensera för denna begränsning är att öka luftflödet utmed vattenpanelerna. Genom forcering med kallluft (tilluftsradiator) kan värmavgivningen från en "normal" stor radiator ökas med cirka 50 % (figur 4b). Detta i sin tur skulle öka värmefaktorn hos en bergvärmepump med cirka 7 % (figur 1b).
- j) Vattenpaneler hos plåtradiatorer avger i genomsnitt cirka 5 gånger mer värme än deras intilliggande konvektionsplåtar. Vidareutveckling av vattenradiatorerna bör därför i första hand fokuseras på effektivisering av värmeöverföring från vattenpanelerna. Ett enkelt och billigt sätt att öka värmeavgivningen från konvektionsplåtar kan vara att öka deras godstjocklek.
- k) Värmespridningen i rum uppvärmda med tilluftsradiatorer är mycket jämn och temperaturvariation i rummet ligger inom 2 °C. Tilluftstemperaturen av ventilationsluften (10 l/s) till rummet kan i princip nästan alltid hållas högre än rumstemperatur även vid kall utetemperatur (-5 °C) med framvatten på 45 °C i dessa värmesystem. Man kan därmed konkludera att även termiska komforten kan säkerställas i rum uppvärmda med lågtemperatur-tilluftsradiatorer.
- l) Baserat på slutsatserna ovan bör följande steg genomföras för att till fullo utnyttja fördelen med lågtemperatursystem i värmepumpsuppvärmda småhus. 1) Husets värmeförlust bör minimeras och hållas lågt under uppvärmningssäsongen. 2) Värmeavgivningen från rumsvärmare bör maximeras och hållas hög under uppvärmningssäsongen. 3) Energi- och effektbehovet för tappvarmvattenberedning och strömningsmaskiner i värmesystemet bör minimeras. 4) Temperaturfallet mellan framvatten och returvatten i värmesystemet bör inte överstiga 5 °C. 5) Förhållandet mellan eleffektbehovet för cirkulationspumpar och systemets värmeavgivning bör hållas omkring 0.2 till 0.6 %. 6) Flytande kondensering bör användas i värmepumpen och den bör drivas med en dynamisk värmekurva.

REFERENSER

- [1] Svensk Ventilation. Energisnåla installationer. En ny möjlighet för Sverige. Formination AB. Produktion: Wallén grafiska. Maj 2011.
- [2] Energimyndigheten. Energistatistik för småhus 2016. ES 2017:03, ISSN 16547543. Arkitekt Kopia AB, Bromma. Oktober 2017.
- [3] Lindvall, N. Jämförelse mellan funktionen hos radiatorsystem injusterade efter två principer. Teknisk rapport. Chalmers Tekniska Högskola (CTH), avdelning för Termo- och fluiddynamik. Göteborg. Januari 2006.
- [4] TÜVRheinland. DIN CERTCO, Certification Scheme DIN-geprüft, Radiators and Convectors According to DIN EN 442, August 2008.
- [5] Ploskić A. Framledningstemperaturen bestäms av värmebehovet. Energi & Miljö (2016), 50, NR 9. September 2016.
- [6] Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. Mapping relevant parameters for efficient operation of low-temperature heating systems in Nordic single-family dwellings. Applied Sciences (Switzerland), Vol. 8, No. 10, 2018.
- [7] Wang Q, Ploskić A, Holmberg S. Low-temperature heating in existing Swedish multifamily houses – An assessment of the significance of radiator design and geometry. Science and Technology for the Built Environment (Taylor & Francis), (2017), 23, 500–511.
- [8] Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment using numerical simulations according to EN 442-2. Submitted to Journal of Building Engineering. November 2018.

BILAGOR

Vetenskaplig artikel. Wang Q, Ploskić A, Holmberg S. Low-temperature heating in existing Swedish multifamily houses – An assessment of the significance of radiator design and geometry. Science and Technology for the Built Environment (Taylor & Francis), (2017), 23, 500–511.

Vetenskaplig artikel. Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. Mapping relevant parameters for efficient operation of low-temperature heating systems in Nordic single-family dwellings. Applied Sciences (Switzerland), Vol. 8, No. 10, 2018.

Vetenskaplig artikel. Ploskić A, Wang Q, Sadrizadeh S. A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment using numerical simulations according to EN 442-2. Submitted to Journal of Building Engineering. November 2018.

Teknisk artikel. Ploskić A. Framledningstemperaturen bestäms av värmebehovet. Energi & Miljö (2016), 50, NR 9 september 2016.

Examensarbete (30 hp, 20 veckor). Scheibe O. Modelling of Heat Transfer for Convection-Boosted Flat Vertical Radiator Surfaces. ABE/KTH. TRITA-STKL; 2017:02. 2017.

Examensarbete (15 hp, 10 veckor). Boåsen F och Khaled S. Termisk komfort med golvvärme eller luftvärme. ABE/KTH. TRITA-ABE-MBT ; 1847. 2018.