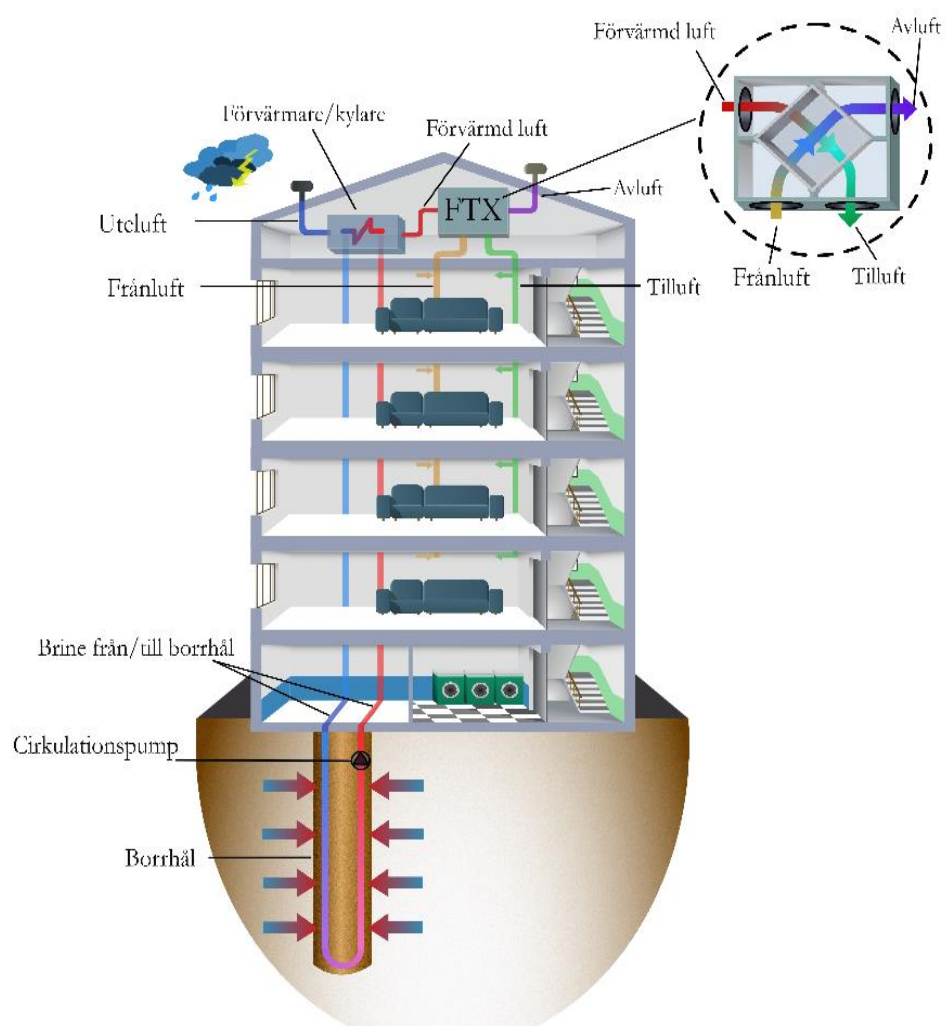


EFFEKTIVA STYRSTRATEGIER FÖR ENERGI- OCH KOSTNADSEFFEKTIV GEO-FTX-SYSTEM



Adnan Ploskić

2022-12-30

FÖRORD

Projektet är en del av den gemensamma satsningen mellan Bravida Sverige AB, SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) och Kungliga Tekniska högskolan (KTH) vars huvudsyfte är att underlätta överföringen av forsknings- och utvecklingsresultat från akademien till branschen. Projektet är sista etappen av doktorandprojektet som har pågått mellan 2020-02-01 och 2022-06-30 och som har finansierats av SBUF och Energimyndigheten genom deras forskningsprogram E2B2.

Arbetet i projektet har genomförts i nära samarbete med projektets referensgrupp bestående av installationsföretaget Bravida Sverige AB, systemleverantör Uponor, ventilationsföretaget Swegon, installationskonsulten Incoord, byggföretaget Skanska, fastighetsägarna AB Stockholmshem, Riksbyggen, Örebrostäder och SKB Stockholms Kooperativa Bostadsförening och Energiverket. Forskningsarbetet i båda etapperna har i huvudsak utförts av doktoranden Behrouz Nourozi som genom detta projekt avlade sin licentiatexamen under 2019 respektive doktorsexamen under 2022 på KTH/Byggetenskap. Professor emeritus Sture Holmberg har varit huvudhandledare fram till licentiatexamen och doktorerna Adnan Ploskić och Qian Wang har varit biträdande handledarna. Adnan Ploskić var ledare för projektet och har också bidragit genom eget forskningsarbete samt skrivit slutrapporterna.

Den huvudsakliga rapporteringsformen av resultaten var papper i internationella tidskrifter och tekniska artiklar i branschpressen i båda etapperna. Högscoleingenjören Filip Johansson och civilingenjörerna John Alexandersson och Emin Osmic har gett värdefulla bidrag till denna projektetapp genom sina examensarbeten. Nedan följer listan med publicerade artiklar och övriga bidrag i denna etapp.

- **Doktorsavhandling.** Behrouz Nourozi. *Advances in Ventilation Heat Recovery - An assessment of peak load shaving using renewables*. KTH Royal Institute of Technology. ISBN 978-91-8040-199-9. 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1652112/FULLTEXT01.pdf>
- **Vetenskaplig artikel.** Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. *Maximizing thermal performance of building ventilation using geothermal and wastewater heat*. *Resources, Conservation and Recycling*. 143 (2019) 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.025>
- **Vetenskaplig artikel.** Cong Wang, Qian Wang, Behrouz Nourozi, Henrikki Pieskä, Adnan Ploskić. *Evaluating the cooling potential of a geothermal-assisted ventilation system for multi-family dwellings in the Scandinavian climate*. *Building and Environment*. Volume 204. 108114. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108114>
- **Konferensartikel.** Behrouz Nourozi, Sasan Sadrizadeh, Adnan Ploskić. *Critical values for condensation and frost onset in air recuperators – A detailed heat transfer evaluation*. Department of Civil & Architectural Engineering, School of Architecture and the Built Environment, KTH Royal Institute of Technology. 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4080991>
- **Konferensartikel.** Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. *Identifying frost threshold in a balanced mechanical ventilation system by inlet and exhaust air temperature control*. The 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC2019). Harbin, China. 2019. DOI: 10.6084/m9.figshare.9209846.v1

- **Examensarbete.** Filip Johansson. *Investeringsanalys av ett GeoFTX-system under vinterdriften.* Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Byggt teknik och Design. TRITA-ABE-MBT; 22521. Stockholm, 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1682570/FULLTEXT01.pdf>
- **Examensarbete.** Emin Osmic. *Frost prediction in heat exchangers: The influence of relative humidity and outdoor temperature on frost formation in plate heat exchangers.* Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Hållbara Byggnader. TRITA-ABE-MBT; 22640. Stockholm, 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1694867/FULLTEXT01.pdf>
- **Examensarbete.** John Alexandersson. *Life Cycle Cost Analysis of two high temperature cooling systems supplied by geothermal energy.* Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Hållbara Byggnader. TRITA-ABE-MBT; 22639. Stockholm, 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1694857/FULLTEXT01.pdf>
- **Teknikartikel.** Adnan Ploskić, Louise Rosén. Komplex ventilationssystem ska få bättre styrning. Svensk Byggtjänst. Byggt koll. 19-avgusti-2020.

SAMMANFATTNING

Projektet syftade till att utveckla styrstrategier för att effektivisera driften hos GEO-FTX system under vinter- och sommarmånaderna. I detta system utnyttjas lokal geotermisk energi för att förvärma och kyla uteluften innan den tillförs fläktstyrd till- och frånluftsventilation med värmeåtervinningen (FTX-ventilation). På så sätt minskas systemets effektbehov för luftbehandling under dessa månader. Simuleringsprogram Trnsys, IDA ICE, Matlab och MS Excel har använts för att utvärdera systemets prestanda. Mätdata från en fastighetsägare med installerat GEO-FTX system har använts för att validera simuleringsresultat. En god överrensstämmelse mellan simuleringsresultat och mätningar har erhållits.

Projektets huvudmål var att ta fram styrstrategier för GEO-FTX-system för att minska värmeeffektbehov för luftbehandling under köldtoppar och byggnadens rumstemperatur under varma somrardagar. Tyngdpunkten i projektet lades på analysen av samdriften mellan borrhålslager, uteluftsförvärmare/kylare och FTX-systemet.

Resultat har visat att påfrysning i plattvärmeväxlaren i GEO-FTX-systemet kunde under vissa förutsättningar elimineras i Stockholms klimat. Detta minskade systemets momentana värmeeffektbehov för avfrostning och eftervärmning av tilluften. Undersökningen har visat att uteluft bör värmas till minus 2 grader Celsius innan den tillförs en plattvärmeväxlare med temperaturverkningsgrad mellan 83 och 86%, men inte högre. Denna temperaturhöjning ger en bra termisk balans mellan förvärmningen av inkommande uteluften, temperaturverkningsgraden hos plattvärmeväxlaren och tilluftstemperaturen till lägenheterna. Vi har presenterat en ekvation (ekvation 1 i denna rapport) som kan användas för att uppnå denna balans och frostfri drift genom att reglera brineflöde från borrhålet till uteluftsvärmare i GEO-FTX-systemet.

Tryckförlusten i kollektorslagen bör begränsas till 250 pascal per meter för att minimera eleffektbehovet hos brinepumpen. Det innebär att genomströmningshastigheten i kollektorslangen med innerdiameter på 26–35 millimeter bör begränsas till 0,5–0,6 meter per sekund. Detta gäller både vinter- och somrardrift. Utvärderingen har visat att GEO-FTX-systemet kan minska operativ temperatur med 3 till 4 grader i ett genomsnittligt flerbostadshus under en värmebölja i Stockholmsregionen. Kylningskapaciteten hos systemet ökar med ökat tilluftsflödet. Ökningen av tilluftsflödet från 0,35 till 0,7 l/s/m² golvyta minskade operativ temperatur med 2,0–2,5 grader under värmeböljan. Denna dubblering av luftflödet kräver en ökning av diametern hos ventilationskanalerna med 50% för att inte öka elanvändningen hos fläktarna.

Det är viktigt att fastighetsägare uppdaterar sitt avtal med energileverantören efter att de har installerat ett GEO-FTX-system. Minskat värmeeffektbehov tillsammans med korrekt vald prismodell för värmeeffektavgift och rätt inställt tilluftstemperatur kan ge betydelsefulla kostnadsbesparingar. Dessutom kommer denna minskning att även minska ansträngningen hos fjärrvärmenätet under köldknäpparna.

Nyckelord: *Energieffektivisering, ventilation, FTX, GEO-FTX, avfrostning, värmeeffektbehov, flerbostadshus*

INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	5
2	SYFTE OCH MÅL	7
3	GENOMFÖRANDE	8
4	RESULTAT	9
	3.1 VINTERDRIFT.....	9
	3.2 SOMMARDRIFT	11
4	DISKUSSION	14
	4.1 RIKTLINJER FÖR STYRNING OCH DIMENSIONERING AV GEO-FTX SYSTEM	14
	4.2 REKOMMENDATIONER OCH BESPARINGSMÖJLIGHETER FÖR FASTIGHETSÄGARE	15
5	SLUTSATSER	17
6	PUBLIKATIONSLISTA	19
7	REFERENSER	20

1 INLEDNING OCH BAKGRUND

I Sverige i dagsläget finns det ungefär 4,5 miljoner bostäder varav 2,5 miljoner är flerbostadshus. Värmeanvändningen för uppvärmning och varmvatten i dessa hus ökade från 26,2 TWh 2020 till 28,7 TWh 2021. Ökningen berodde främst på att 2020 var ett betydligt varmare år än 2021, vilket gjorde att energianvändningen för uppvärmning blev högre [1]. Majoriteten av de befintliga flerbostadshusen är byggda mellan 1940 och 1975 och behöver renoveras. Uppskattningsvis tre av fyra av dessa bostäder behöver genomgå omfattande energirenoveringar fram till 2050 för att vi ska uppnå de uppsatta energi- och klimatmålen. Det är värt att notera att bland de energideklarerade flerbostadshusen uppnådde endast 5 procent nuvarande krav för nära-nollenergibyggnader år [2]. Därför är effektiv värmeåtervinning från samtliga utgående värmeflöden från byggnaderna mer eller mindre ett måste för att vi ska lyckas uppnå de uppsatta nationella energi- och klimatmålen [3].

Boarean per person varierar kraftigt mellan olika typer av hushåll och kommuner i Sverige. I storstadsområden bor en stor andel av hushållen i flerbostadshus och i dessa är boarean per person betydligt mindre än i småhus. Enligt Statistiska centralbyrån (SCB) var den genomsnittliga boarean i bostads- och hyresrätter 39 respektive 34 kvadratmeter per person år 2019 [4]. Det betyder att minimikrav för ventilationsflödet i dessa bostäder uppgick till 12 respektive 13,6 liter per sekund och person enligt Boverkets nuvarande rekommendation ($= 0,35 \text{ l/s/m}^2$ golvyta). Det i sin tur innebär att varje individ i dessa bostäder behövde 1240 respektive 1410 kilo tempererad luft dagligen för en hälsosam inomhusvistelse. Ventilationsflödet är i snitt 20 grader varm när den lämnar byggnaden om det inte finns någon frånluftsvärmeåtervinning. Om denna temperatur skulle sänkas till 5 grader genom värmeåtervinning skulle det medföra en återföring av värmeeffekten till byggnaden motsvarande 220 till 250 watt per person. För ett hushåll med fyra personer skulle det alltså innebära en möjlig minskning av värmeeffektbehovet med upp till en kilowatt. Denna effekt motsvarar behovet för värmning av ventilationsflödet från minus 10 grader till rumstemperatur för en lägenhet på 95 kvadratmeter. Trots det faktum var endast var sjätte svenskt flerbostadshus utrustat med någon form av frånluftsvärmeåtervinning år 2009 [5].

På senare tid har det dock blivit standard att installera frånluftvärmepump eller mekanisk från- och tilluftssystem med värmeväxlare (FTX-system) i nya och renoverade flerbostadshus. Det har lett till att effektbehovet för uppvärmning av ventilationsluften har minskat med 70–90 procent i dessa byggnader. Plattvärmeväxlare och roterande värmeväxlare är de två vanligaste luft/luftvärmeväxlare som används i FTX-system för att överföra värmen från den varma och fuktiga frånluften till den kalla och torra tilluften (uteluften). Vid hög fukthalt i frånluften och låg tilluftstemperatur sker kondensation på frånluftsidan och det bildas överskottsvatten på värmeväxlarens varma sida. Om värmeväxlarens yttemperatur samtidigt är lägre än fryspunkten (noll grader) övergår det kondenserade vattnet på varma sidan till frost och is och värmeväxlaren behöver avfrostas. Avfrostning är en effektkrävande process som orsakar momentana effektoppar. Tidigare studier har visat att det krävs en värmeeffekt på cirka 6,2 watt per kvadratmeter uppvärmd golvyta för att avfrostas en plattvärmeväxlare [6–10]. Dessa kortvariga effektoppar inträffar som mest under årets kallaste dagar när fjärrvärme- och elnätet är dessutom som mest ansträngt. Ett högt värmeeffektbehov (kW) förhöjer dessutom den fasta värmekostnaden för fastighetsägare. Högst sannolikt lär denna kostnad öka i framtiden i takt med att värmeenergibehovet (kWh) minskar stadigt i svenska byggnader. Det finns därmed ett incitament för både fastighetsägare och fjärrvärmeleverantörer att kraftigt minska effektoppar under årets kallaste perioder.

På relativt kort tid har komfortkyla blivit en standard på svenska kontor. Fastighetsbranschen är dock betydligt mer avvaktande att installera detta system i lägenheter. Traditionsmässigt används inte komfortkyla i svenska bostäder och de är inte heller dimensionerade för detta. Den generella trenden

visar dock att behovet av närproducerad och energieffektiv kyla kommer att öka, även i Sverige. Värmeböljan som inträffade under sommaren 2018 visade detta tydligt. Sommaren 2018 drabbades Sverige av en långvarig värmebölja med rekordhöga temperaturer över hela landet. Extremhettan varade i 25 dygn och orsakade 635 fler dödsfall under veckorna 27–31 jämfört med samma period 2017 [11]. Även om denna värmebölja var ovanlig lång och intensiv bör det noteras att de tio varmaste åren i Europa har inträffat sedan 2000 och att de varmaste somrarna sedan år 1500 har inträffat under de två senaste decennier: 2018, 2010, 2003, 2016, 2002 [12]. Därför är ett rimligt att anta att denna trend kommer att fortsätta i framtiden. Ett exempel på negativa effekter av höga utomhustemperaturer visades tydligt under augusti 2019 när en skola i Lund tvingades ställa in undervisningen då det var 30 grader varmt i klassrummen [13]. Skolan, såsom de flesta befintliga svenska skolor, förskolor och äldreboenden sakande luftkonditionering eller komfortkyla.

Äldre och barn är särskilt känsliga för långvariga övertemperaturer inomhus. Folkhälsomyndigheten rekommenderar att operativ temperatur (\approx bostadstemperaturen) inte är högre än 26 grader under en längre period under sommarmånaderna. Vid värmeböljor tillåts temperaturen att gå upp ytterligare två grader, det vill säga till 28 grader. Vad exakt menas med ”en längre period” finns inte nedskrivet, men Hyresgästföreningens tolkning är att det handlar om åtminstone ett par veckor. Hyresgästerna har rätt till viss ekonomisk kompensation genom nedsatt hyra om lägenheten inte kunnat nyttjas till fullo på grund av, till exempel, en hög bostadstemperatur [14]. Det är fastighetsägarens ansvar att säkerställa att bostadstemperaturen uppfyller Folkhälsomyndighetens riktlinjer och därmed finns det även här ett incitament för både fastighetsägare och hyresgäster att skapa en behaglig bostadstemperatur även under sommarmånaderna.

2 SYFTE OCH MÅL

Det övergripande syftet med detta arbete är att hjälpa byggbranschen och samhället att uppnå uppsatta energi- och miljömål. Det primära syftet med projektet var att utveckla en teknik för att minska värme- och kyleffektbehovet för luftbehandlingen i flerbostadshus under värme- och köldtoppar. Målet med projektet var att ta fram styrstrategier för att effektivisera samdrift mellan byggnadens ventilationssystem och ett närliggande borrhålslager. Systemet som har undersökts kallas för GEO-FTX. I detta system förvärms eller kylas inkommande uteluften med hjälp av geotermisk energi från ett borrhålslager och luftutbytet sker med hjälp av fläktstyrt till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX-system). Fördelen med detta system över ett konventionellt FTX-system är att avfrostnings- och eftervärmningsbehovet kan i många fall elimineras i mellersta och södra Sverige och att det även kan ge en behaglig svalka för de boende under sommarmånaderna.

Kortfattat kan projektets delmål sammanfattas enligt följande:

- Att få djupare förståelse av GEO-FTX:s funktion och samspelet mellan borrhålslager, kyl/värmebatteriet och FTX-systemet.
- Att ta fram styrintervaller för luft- och vätskeflöden för att effektivisera driften av systemet.
- Att utvärdera systemets potential under sommar- och vinterdriften.
- Att undersöka systemets ekonomiska lönsamhet.

Projektet har pågått mellan 2020-02-01 och 2022-06-30 och är slutetappen av ett doktorandprojekt. Projektet har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Energimyndigheten inom forskningsprogrammet E2B2).

3 GENOMFÖRANDE

Dynamiska simuleringar med hjälp av simuleringsprogram Trnsys, IDA ICE, Matlab och MS-Excel har använts för att utvärdera potentialen av ett GEO-FTX system. Mätdata från en byggnad utrustad med GEO-FTX system har använts för att validera simuleringsresultaten. God överensstämmelse mellan simuleringsresultat och mätdata har uppnåtts i samtliga fallstudier [15–16].

Forskningsarbetet utfördes i huvudsak av doktoranden Behrouz Nourozi som 2019 tog sin licentiatexamen på Bygghälsa på Kungliga Tekniska Högskolan genom projektets första etapp [17]. Arbetet i denna projektetapp låg till grund för hans doktorsexamen som han tog år 2022. Doktorerna Adnan Ploskić och Qian Wang bistod främst genom handledarinsatser och i viss mån med egen forskning. Adnan Ploskić var projektledare för det aktuella projektet.

Projektet genomfördes i samarbete med projektets referensgrupp: installationsföretaget Bravida Sverige AB, systemleverantör Uponor, ventilationsföretaget Swegon, installationskonsulten Incoord, byggföretaget Skanska, fastighetsägarna AB Stockholmshem, Riksbyggen, Örebrobostäder och SKB Stockholms Kooperativa Bostadsförening och Energiverket.

Förutom vetenskapliga artiklar och konferensbidrag har även följande examensarbeten genomförts i anslutning till projektet:

- i) Examensarbetet ”*Investeringsanalys av ett GeoFTX-system under vinterdriften*” genomfördes av högskoleingenjören Filip Johansson på KTH/Bygghälsa. Examensarbetet gjordes under 2022 och handledes av Adnan Ploskić.
- ii) Civilingenjören John Alexandersson genomförde sitt examensarbete ”*Life Cycle Cost Analysis of two high temperature cooling systems supplied by geothermal energy*” på KTH/Bygghälsa inom ramen för projektet. I examensarbetet genomfördes livscykelkostnadsanalys av GEO-FTX systemet för sommar drift. Arbetet genomfördes huvudsakligen under 2022 och handledes av Adnan Ploskić och Qian Wang.
- iii) Examensarbetet ”*Frost prediction in heat exchangers: The influence of relative humidity and outdoor temperature on frost formation in plate heat exchangers*” genomfördes av civilingenjören Emin Osmic. Arbetet fokuserade i huvudsak på beräkningen av starttemperaturen för påfrysningen i plattvärmeväxlare under vinter drift. Arbetet handledes huvudsakligen av Adnan Ploskić och Qian Wang och delvis av Behrouz Nourozi.

4 RESULTAT

GEO-FTX:s främsta potential ligger i dess förmåga att minska värme- och kyleffektbehovet för luftbehandlingen i byggnaderna. Vi vill återigen påpeka att komfortkyla traditionsmässigt inte används i svenska bostäder, men att bedömningen är att detta behov kommer att öka i framtiden. Prestandan hos GEO-FTX-system har utvärderats i ett antal projekt mellan 2015 och 2020 [6, 8–9, 18].Utförda fältmätningar och datorsimuleringar i dessa studier har gett varierande resultat då den valda utetemperaturen som startade förvärmningen av den inkommande uteluften varierade mellan -2 och 5 grader och det nominella brineflödet i kollektorslangen varierade mellan 0,3 och 1,6 kilo i sekunden. Detta har resulterat i inkonsekventa slutsatser om systemets prestanda. Målet med detta projekt var därför att utvärdera systemets prestanda under sommar- och vintermånaderna för att ge konkreta riktlinjer hur systemet bör dimensioneras och köras för att uppnå en effektsnål drift utan att göra avkall på den upplevda termiska komforten.

3.1 Vinterdrift

Eftersom ett GEO-FTX system har två luftvärmare, en uteluftsförvärmare innan FTX-aggregatet och en luft/luftvärmväxlare inuti aggregatet, är det viktigt att dessa samkörs på ett fördelaktigt sätt. Konkret innebär det att välja ”korrekt” utetemperatur när förvärmaren skall startas. Om starttemperaturen sätts för lågt kan tilluftstemperaturen till lägenheterna bli låg och då krävs eftervärmning för att säkerställa en god termisk komfort. Detta kräver ett effekttillskott från nätet vilket ökar värmekostnaden för fastighetsägaren och anstränger nätet. Om starttemperaturen sätts för högt minskar temperaturverkningsgraden hos värmväxlaren inuti FTX-aggregatet. Detta gör att temperaturen på luften som lämnar byggnaden (avluften) blir onödig hög när det är kallt ute. En annan konsekvens av detta är att borrhålet kyls onödigt mycket vilket i sin tur kan försämra systemets termiska potential under vissa förutsättningar. Därför är valet av starttemperaturen för förvärmaren en viktig parameter för vinterdriften för ett GEO-FTX system.

Termiska längden (eng. Number of Transfer Units, NTU) hos plattvärmväxlare som används i FTX-system har kontinuerligt ökat sedan 1960-talet och ligger i dagsläget mellan 5 och 5,5 [19]. Det innebär att temperaturverkningsgraden (värmeöverföringseffektivitet) hos dagens plattvärmväxlare ligger mellan 83 och 85% vid balanserad ventilation. Detta är fördelaktigt för tilluftstemperaturen då den blir hög även vid låga utetemperaturer men inte för avluftstemperaturen då den blir låg vid låga utetemperaturer, vilket kan leda till påfrysningen i värmväxlaren. Om detta sker måste värmväxlaren avfrostas vilket kräver effekttillskott. I ett GEO-FTX system kan detta förhindras genom att förvärma tilluftsflödet med hjälp av värme från ett närliggande borrhålslager. I tabell 1 nedan anges påfrysnings- och tilluftstemperaturer för olika NTU och ϵ värden för en motströmsvärmväxlare vid lika stort till- och frånluftsflöde (balanserad ventilation).

Tabell 1. Beräknade påfrysings- och tilluftstemperaturer och eftervärmningsbehovet för en motströmsvärmväxlare vid olika NTU och ϵ värden och lika stort till- och frånluftsflöde vid frostgränsen ($T_{v vx, kall} \approx 0^\circ\text{C}$). NTU (eng. Number of Transfer Units) = termisk längd, ϵ = temperaturverkningsgrad (värmeöverföringseffektivitet), T_{ute} = uteluftstemperatur, T_{av} = avluftstemperatur, $T_{v vx, kall}$ = värmväxlarens yttemperatur i kallaste delen, $T_{från}$ = frånluftstemperatur, T_{till} = tilluftstemperatur, Q = värmeenergi, V = tilluftsflöde, [$\text{kJ}/\text{m}^3 = \text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$]

NTU	ϵ	T_{ute}	T_{av}	$T_{v vx, kall}$	$T_{från}$	T_{till}	$18^\circ\text{C} - T_{till}$	Q/V
[-]	%	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kJ/m^3
3,5	78	-4,6	4,7	0,1	21	15,4	2,6	3,14
4,0	80	-3,8	3,8	0,0	21	16,0	2,0	2,41
4,5	82	-3,2	3,3	0,1	21	16,6	1,4	1,69
5,0	83	-2,8	2,8	0,0	21	17,0	1,0	1,21
5,5	85	-2,6	2,6	0,0	21	17,5	0,5	0,60
6,0	86	-2,3	2,3	0,0	21	17,7	0,3	0,36

Data i tabellen visar att en hög temperaturverkningsgrad (ϵ) hos värmväxlaren ger en hög tilluftstemperatur (T_{till}) till lägenheterna. Detta kräver en högre förvärmningstemperatur (T_{ute}) för att förhindra påfrysningen i värmväxlaren ($T_{v vx, kall}$). En tilluftstemperatur mellan 18 och 20 grader upplevs normalt som behaglig. Kolumnen längst till höger i tabellen visar eftervärmningsbehovet (Q/V) för att uppnå en tilluftstemperatur på 18 grader. Enligt tabellen krävs en temperaturverkningsgrad på minst 86% för att uppnå en tilluftstemperatur på ungefär 18 grader ($T_{till} = 17,7$ grader) för att eliminera behovet av eftervärmning. Det bör dock noteras att skillnaden i tilluftstemperaturen är under en grad för temperaturverkningsgrader mellan 83% och 86%. Tabellen visar att uteluften vid dessa temperaturverkningsgrader behöver värmas till ungefär -2 grader för att undvika påfrysningen i motströms plattvärmväxlaren. Detta värde överensstämmer väl med värdet (-2,2 grader) från vår tidigare studie där vi använde dynamiska energisimuleringar för att fastställa starttemperaturen för förvärmning av uteluften i ett FTX-system med förvärmningsbatteriet [20] och med tidigare fältstudier [7, 18].

Det är viktigt att komma ihåg att påfrysningsförloppet i en plattvärmväxlare påverkas inte enbart av ute- och avluftstemperaturen utan även av fukthalten i frånluften. Daggpunktstemperaturen för frånluftsflödet av 21 grader och relativ fuktighet på 30% är 2,8 grader. Avluftstemperaturen bör följaktligen hållas över 2,8 grader för att undvika kondensationsbildning i frånluftskanalerna för att minska risken för frostbildning på värmeöverförande ytor. Detta kan uppnås genom att förvärma uteluften till -2 grader innan den sugas in i FTX-aggregatet. Genom att hålla avluftstemperaturen över frånluftens daggpunktstemperatur kommer värmväxlaren att arbeta i torr drift. Detta är praktiskt fördelaktigt då nuvarande styrsystem i dagens FTX-system inte kan skilja mellan kondens- och frostbildning i frånluftskanalerna. Fördelen med kondensbildningen i kanalerna är att den ökar värmeöverföringen från frånluften till värmeöverförande ytor. Nackdelen är att detta samtidigt också ökar tryckförlusten (strömningsmotståndet) över värmväxlaren som kan starta en onödig avfrostningsprocess trots att ingen frostbildning har skett. Därför är torr drift under vintermånaderna mer fördelaktigt av praktiska skäl. Det är dock viktigt att förvärmningen av uteluften inte blir avsevärt högre än -2 grader Celsius i plattvärmväxlaren med temperaturverkningsgrad mellan 83 och 86%. En för hög uteluftsförvärmning skulle resultera i att värmen som tas ur borrhålet endast ”passerar” genom FTX-systemet och bara förhöjer avluftstemperaturen när det är som kallast. Detta bör undvikas i möjligast mån.

Påfrysningens hastighet och förlopp är mycket beroende av frånluftens fuktinnehåll. Då den relativa fuktigheten i frånluften är ofta lägre än 30% i svenska bostäder under vintermånaderna [18, 21], är det fördelaktigt att starttemperaturen för förvärmning av uteluften i FTX-systemet sätts till -2 grader enligt ovanstående resonemang. En högre fukthalt i frånluften kräver naturligtvis en högre starttemperatur. Starttemperaturen för uteluftsförvärmning kan approximeras med formell 1, vilket vi gjorde och utvärderade i det här projektet [20, 22]. Ekvationen ger ett pålitligt närmevärde för starttemperaturen då relativa fuktigheten i frånluften är lika med eller lägre än 30%. Man kan tro att ekvationen inte tar hänsyn till fukthalten i frånluften och att den således kan enbart tillämpas vid torr drift, men så är inte fallet. Ekvation 1 är en funktion av avluftstemperaturen och värdet av denna temperatur påverkas av aggregationstillståndet i frånluftskanalerna.

$$T_{\text{vvx, kall}} \approx \frac{T_{\text{ute}} \dot{m}_{\text{ute}} + T_{\text{av}} \dot{m}_{\text{av}}}{\dot{m}_{\text{ute}} + \dot{m}_{\text{av}}} \quad (1)$$

Ekvation 1 returnerar genomsnittlig yttemperatur i värmeväxlarens kallaste del och är ett massviktat aritmetiskt medelvärde som tar hänsyn till rådande luftflödesbalansen i ett FTX-system. \dot{m}_{ute} står för massflödet (kg/s) av inkommande uteluft, \dot{m}_{av} står för massflödet (kg/s) av utgående avluft, T_{ute} står för lufttemperatur efter förvärmningen vid inloppet till plattvärmeväxlaren och T_{av} står för temperatur på avluftsflödet som lämnar plattvärmeväxlaren. Fördelen med ekvationen är att den relativt enkelt kan användas i praktiken för att styra brineflöde mellan borrhålet och uteluftsförvärmaren. Genom en kontinuerlig mätning av utelufts- och avluftstemperaturer (T_{ute} respektive T_{av}) och ute- och avluftsmassflöden (\dot{m}_{ute} respektive \dot{m}_{av}) kan ett approximativt närmevärde för värmeväxlarens kallaste del ($T_{\text{vvx, kall}}$) erhållas i varje tidssteg. Om beräknat värde är lägre än noll grader ($T_{\text{vvx, kall}} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$), höjs T_{ute} (förvärmningstemperatur) genom att öka brineflödet från borrhålet till uteluftsförvärmaren tills värmeväxlarens yttemperatur ($T_{\text{vvx, kall}}$) är över noll grader ($T_{\text{vvx, kall}} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$). När detta uppfylls sänks varvtalet hos brinepumpen till normalt driftläge. Vi har utvärderat denna styrstrategi genom bland annat dynamiska simuleringar i programvaran TRYSYS och erhållit gott resultat [20, 22]. Ekvationens pålitlighet behöver verifieras ytterligare genom fältmätningar i verkliga GEO-FTX system.

3.2 Sommarkrift

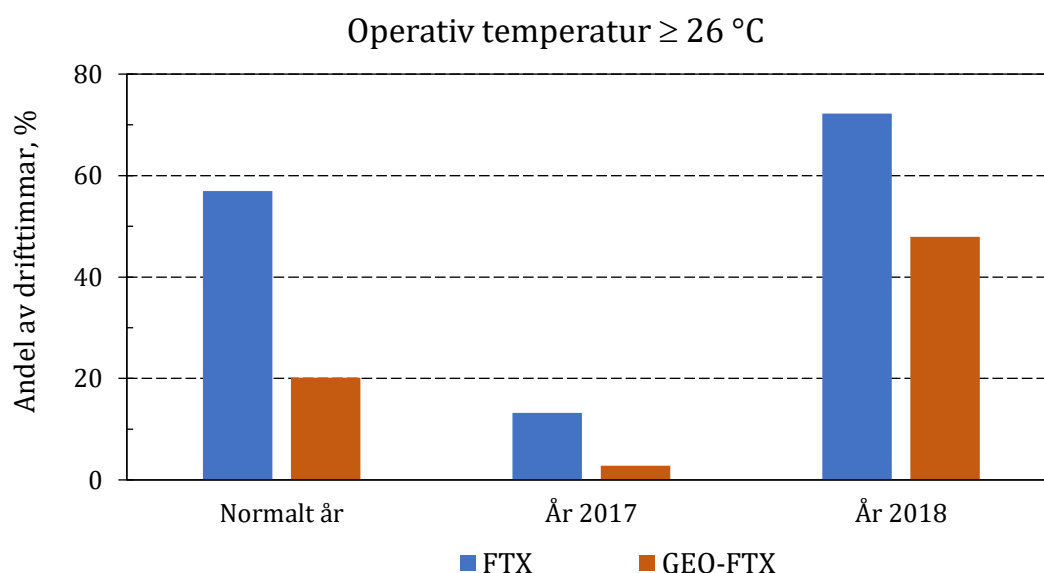
En ytterligare fördel med GEO-FTX-systemet är att det även kan användas under varma sommarmånaderna för att hålla rumstemperaturen i lägenheterna på en behaglig nivå. I detta projekt har vi testat systemets kylningspotential i Stockholms klimat under en normal sommar och värmeböljan som inträffade mellan andra juli och femte augusti år 2018. En typisk tvåvånings flerbostadshus från 1960–1970 talet har använts i simuleringar för att utvärdera systemets potential. Inneklimatet har analyserats i två zoner/rum i en lägenhet på 60 respektive 75 kvadratmeter. Zon A var på andra våningen vänd i söderläge och zon B var på första våningen vänd mot norr. Mer detaljer om det använda huset och närliggande borrhålet finns i vår artikel [15].

I artikeln användes dynamiska energisimuleringar med hjälp av IDA ICE för att utvärdera systemets kylningspotential. Huvudmålet med studien var att utvärdera GEO-FTX:s kylningskapacitet och dess förmåga att minska rumstemperaturen under årets varmaste dagar. Sammanlagt testades tolv fall, fyra tilluftstemperaturer (20°C, 18°C, 16°C och 14°C) tillsammans med tre tilluftflöden (0,35, 0,5 and 0,7 l/s/m² golvyta). Det bör noteras att de angivna börvärden på tilluftstemperaturen inte alltid kunde

upprätthållas under vissa perioder med höga utetemperaturer ($>28^{\circ}\text{C}$) på grund av begränsad kyleffekt i borrhålet.

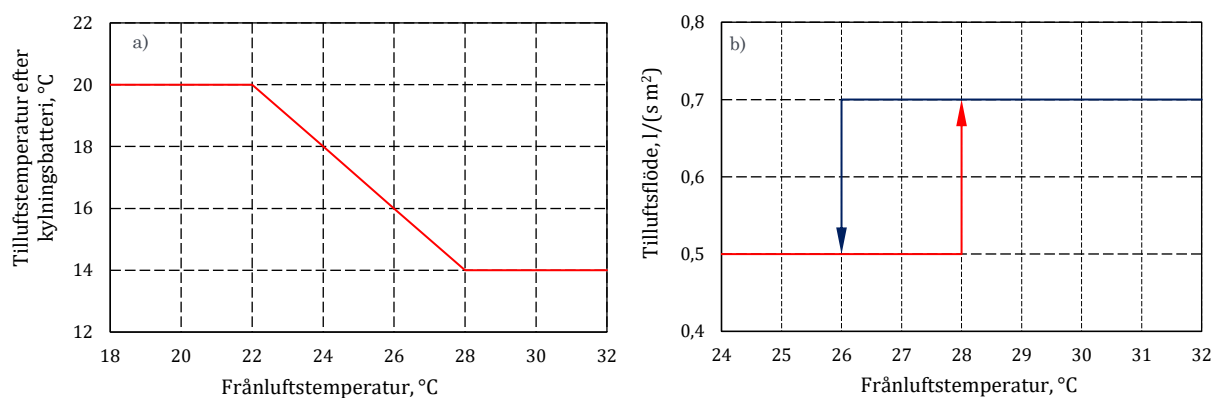
En låg framledningstemperatur från borrhålet och ett högt tilluftsflöde till lägenheterna är viktiga parametrar för att minska rumstemperaturen under varma dagar. GEO-FTX system med tilluftsflödet på $0,7\text{ l/s/m}^2$ kunde i genomsnitt minska operativ temperatur med tre till fyra grader jämfört med ett motsvarande FTX-system med tilluftsflödet på $0,35\text{ l/s/m}^2$ under värmeböljan. Den högsta operativa temperaturen i Zon A med GEO-FTX system och tilluftsflödet på $0,7\text{ l/s/m}^2$ var strax under 30 grader medan högsta temperaturen med FTX-system med tilluftsflödet på $0,35\text{ l/s/m}^2$ var 34 grader under de varmaste dagarna. Motsvarande temperaturer i Zon B var 27,6 grader med GEO-FTX och drygt 31 grader med FTX-system.

Figur 1 visar en sammanfattning av resultat som publicerades i vår artikel [15]. Det är tydligt att GEO-FTX system kan ge en behagligare inneklimate jämfört med ett renodlat FTX-system under varma dagar. Operativ temperatur i huset med GEO-FTX system var lika med eller över 26 grader under cirka 20% av drifttimmarna och strax under 60% med ett motsvarande FTX-system under en normal sommar i Stockholm. Det betyder att ett GEO-FTX system kunde hålla operativ temperatur lika med eller under 26 grader under 80% av drifttimmarna under en normal sommar i detta klimat. Under extrem värmeböljan år 2018 var skillnaden inte lika tydlig då huset värmdes upp ovanligt mycket jämfört med ett normalt år. Men även i detta fall kunde man se en tydlig fördel av att använda ett GEO-FTX system. I huset med detta system var operativ temperatur över 26 grader under cirka 50% av drifttimmarna. Med konventionellt FTX-system skedde detta under 70% av drifttiden.



Figur 1. Andel drifttimmar då operativ temperatur är lika med eller över 26 grader under en normalt sommar (år), kall sommar (år 2017) och värmeböljan (år 2018) i det undersökta flerbostadshuset med FTX och GEO-FTX system i Stockholm.

Figur 2a visar styrstrategi som användes i vår studie [15] och figur 2b visar en möjlig styrstrategi för tilluftsflödet under en varm dag. Det är viktigt att notera att det inte är säkert att tilluftstemperaturen alltid kan följa kurvan som anges i figur 2a. Om en värmebölja varar under flera dagar eller veckor och kylningskapaciteten av borrhålet är begränsad kommer temperaturen i borrhålet att stiga och då kan tilluftstemperaturen bli högre än maxtemperaturen (=20 grader) som anges i figur 2a. I detta fall kommer även frånlufts och operativ temperatur i lägenheterna att öka. Detta kan i viss mån dämpas med ökat tilluftsflöde som föreslås i figur 2b. Om uppmätt frånluftstemperatur blir lika med eller högre än 28 grader ökas tilluftsflödet från 0,5 till 0,7 l/s per kvadratmeter golvyta. När sedan frånluftstemperaturen faller till 26 grader återgår tilluftsflödet till 0,5 l/s/m². Här vill vi återigen påminna att det inte är säkert att styrstrategierna presenterade i figurerna 2a och 2b alltid kan upprättas under en långvarig och intensiv värmebölja, men att de ändå kan användas för att mildra de negativa effekterna som detta tillstånd kan orsaka för de boende. I vår studie varierade brinetemperaturen från borrhålet mellan 8 och 18 grader under 80% av drifttiden mellan den 21:e juni och 20:e augusti år 2018. Under resten av drifttiden växlade temperaturen mellan 18 och 22 grader [15]. Det är viktigt att komma ihåg att utetemperaturerna under denna period var de högsta sedan mätningarna inleddes i Stockholm 1756 och skall därför betraktas som ytterst extrema. Betydelsen av byggnadens värmetröghet bör heller in föringas i sammanhanget då innetemperaturen kan vara högre än utetemperatur under värmeböljan. Därför kan det vara klokt att starta GEO-FTX systemet innan utetemperaturerna blir allt för höga. På så sätt kommer ”kylan” att ackumuleras i förväg i byggnaden vilket i sin tur kommer att jämnat ut temperatursvängningarna i lägenheterna.



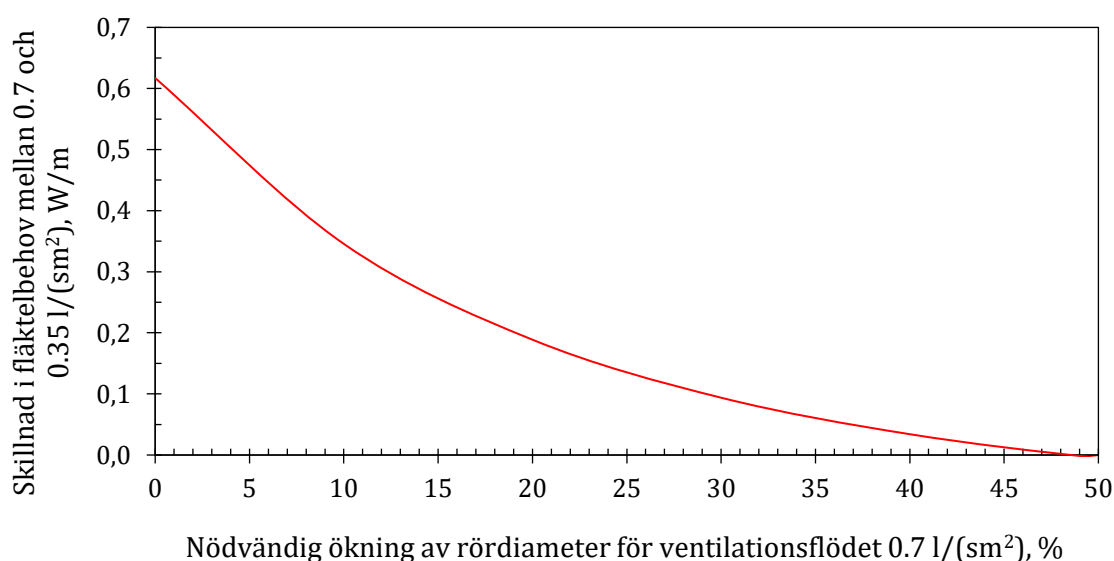
Figur 2 a och b. Styrstrategier för tilluftstemperatur och tilluftsflöde för somrardrift för GEO-FTX system.

4 DISKUSSION

Målet med detta projekt var att ta fram styrstrategier och dimensioneringskriterier för att effektivisera drift hos GEO-FTX system under vinter- och sommarmånaderna. Projektet har bidragit till djupare insikt om vikten av korrekt styrning av systemet och dess termiska potential under dessa perioder. Korrekt inställning av styrtemperaturer och styrning av vätskeflöden är av stor betydelse för att maximera systemets utnyttjningsgrad.

4.1 Riktlinjer för styrning och dimensionering av GEO-FTX system

Konkreta förslag hur tilluftstemperaturen respektive tilluftsflödet kan styras med hjälp av frånluftstemperaturen har angetts i figurerna 2a och 2b. Resultat har visat att det krävdes en dubblering av tilluftsflödet, från 0,35 till 0,7 l/s/m² golvyta, för att minska operativ temperatur med 2,0 till 2,5 grader i det undersökta flerbostadshuset med GEO-FTX-system under en värmebölja i Stockholm. Enligt affinitetslagarna kommer detta att kräva åtta gånger högre eleffektbehovet hos fläktarna. För att undvika detta krävs en noggrann dimensionering av ventilationskanaler och en bra planering i tidigt skede. Figur 3 visar hur många procent rördiametern hos ventilationskanaler måste ökas för att dubbleringen av flödet inte ska öka eleffektbehovet. När rördiamantern förblir oförändrad, det vill säga när värdet på abskissa i figur 3 är lika med noll, och flödet ökas från 0,35 till 0,7 l/s/m² blir eleffektbehovet drygt 0,6 watt per meter rör högre i fallet med 0,7 l/s/m². Om rördiametern ökas med 50% blir det ingen skillnad i eleffektbehovet. En ökning av ventilationsflödet från 0,35 till 0,7 l/s/m² kräver således en ökning av rördiametern med 50% för att inte öka elanvändningen hos fläktarna. Det är viktigt vid dimensioneringen av ventilationskanaler i ett GEO-FTX system att säkerställa att de styrande komponenterna kan korrekt injusteras för flödet 0,35 l/s/m², det vill säga för vinterdrift och inte enbart för det höga flödet 0,7 l/s/m² för somrardrift.



Figur 3. Figuren visar den nödvändiga ökningen av rördiameter för att möjliggöra dubbleringen av ventilationsflödet, från 0,35 till 0,7 l/s/m², utan att eleffektbehovet hos fläktarna ökar.

I detta projekt, såsom i en tidigare studie [18], har det visats att avfrostningsbehovet hos FTX-system med dagens motströms plattvärmeväxlare kan kraftigt minskas eller till och med i vissa fall elimineras med hjälp av lokal geovärme. Tidigare studier kunde dock inte ge en enhetlig riktlinje till vilken temperatur uteluften ska förvärmas för att få en effektiv drift under vintermånaderna. I tabell 1 har vi visat att uteluften bör förvärmas till ungefär -2 grader Celsius innan den tillförs en motströms plattvärmeväxlare med temperaturverkningsgrad mellan 83% och 86% för att undvika påfrysningen. Tillsammans med byggnadens luftbehov (kg s^{-1}), luftens specifika värmekapacitet ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) och ortens dimensionerande vinterutetemperatur kan denna temperatur (-2 °C) användas för att bestämma dimensionerande effektbehov för uteluftsförvärmare.

För att minimera elbehovet för brinepumpen är det viktigt att genomströmningshastigheten i kollektorslangen väljs korrekt. Danish Energy Management (DEM) rekommenderade att tryckförlusten i rörledningar med diametrar 0–100 millimeter och årsdrifttimmar 0–4000 bör begränsas till 250 pascal per meter (Pa/m) [23]. Denna tryckförlust fås i kollektorslangen med innerdiameter om 26 mm och brinehastigheten på 0,56 m/s. Detta värde överensstämmer väl med det rekommenderade för genomströmningshastighet (0,6 m/s) i kollektorslangen med innerdiameter om 35 mm kopplat till bergvärmepumpen [24]. Enligt detta resonemang bör det således vara rimligt att begränsa brinehastighet i kollektorslangen till 0,5–0,6 m/s även i GEO-FTX system. Vi har utvärderat detta dimensioneringsråd (250 Pa/m) och funnit att brinepumpen i vårt fall krävde en eleffekt i storleksordningen strax under 4 % av förvärmarens värmeavgivning vid dimensionerande last [16]. Det bör noteras att Reynoldstalet för rördiametrar 26 mm och 35 mm respektive hastigheter 0,56 m/s och 0,6 m/s och kinematisk viskositet $3,0\text{--}3,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ligger mellan 3800 och 7000. Strömningen ligger således i omslaget mellan laminär och turbulent utifrån en teoretisk betraktelse.

I projektet har vi också visat hur den föreslagna ekvation 1 kan användas för att reglera brineflöde från borrhålet till uteluftförvärmare. Ekvationen kan relativt enkelt inprogrammeras i styrsystemet för att styra brinepumpen genom mätning av utelufts- och avluftstemperaturer samt ute- och avluftsmassflöden i varje tidssteg.

4.2 Rekommendationer och besparingsmöjligheter för fastighetsägare

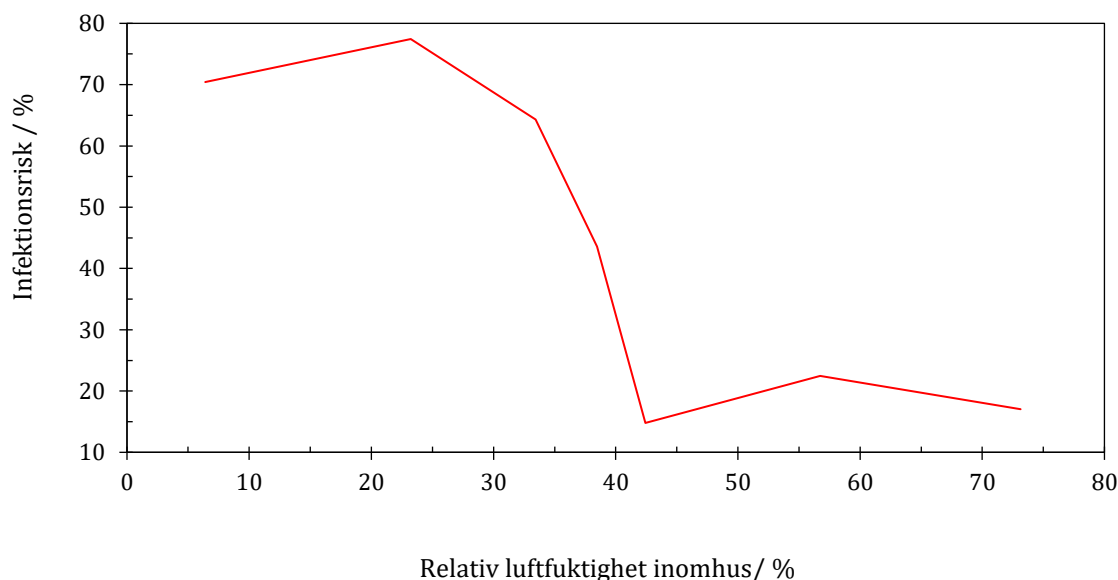
I projektet visades att geotermisk förvärmning av uteluften kan potentiellt eliminera avfrostningsbehovet hos en modern plattvärmeväxlare i Stockholmsklimat. Vidare visades att uteluftens temperatur inte bör höjas avsevärt över -2 grader Celsius även om det finns möjlighet till det. En höjning högt över minus 2 grader kommer endast att höja avluftstemperaturen när det är som kallast ute. Detta bör undvikas i möjligast mån. En välbalanserad och klok förvaltning av värmeenergin i borrhålet möjliggör att fler lägenheter kan betjänas med den tillgängliga energin under marken. Onödigt hög utarmning av värmeenergin kommer att kyla ned borrhålet vilket kommer att minska dess värmekapacitet och potentiellt leda till ökat behov av eftervärmning. Detta kan undvikas genom en korrekt förvärmning av uteluften som föreslås i detta projekt.

Fastighetsägare i dagsläget ställer oftast in tilluftstemperaturen på 20 grader för att undvika eventuella klagomål från de boende. Denna tilluftstemperatur jämfört med 18 grader kräver ett effekttillskott motsvarande $2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ tilluftsflöde. Detta anstränger fjärrvärmenätet när det är som kallast och kan öka uppvärmningskostnaden med ungefär 1000 till 2000 kr/ (m^3/s) tillförd luft¹. Ovan nämndes att avfrostning av plattvärmeväxlare i ett FTX-system kräver i genomsnitt ett effekttillskott på cirka

¹ Beräkningen baseras på effekttavgiften 450–850 kr/kW

6,2 watt per kvadratmeter uppvärmd golvyta. Genom att (efter)komplettera FTX-system med lokal geotermisk förvärmning av uteluften kan detta effektbehov eventuellt elimineras i Stockholms klimat. För ett flerbostadshus på 3000 kvadratmeter med tilluftstemperatur på 18 grader kan det alltså innebära en potentiell kostnadsbesparing med omkring 9 500 till 18 000 kronor per eliminerad avfrostningscykel². Besparingspotentialen är naturligtvis beroende på avtalet mellan fastighetsägaren och fjärrvärmeleverantören, prismodellen för använd värmeeffekt och ventilationens andel i byggnadens toppeffektbehov. Potentialen ökar ju större andel värmning av ventilationsluften har i byggnadens abonnerad värmeeffekt.

Samtliga tidigare studier om GEO-FTX system har nästan uteslutande handlat om utvärdering och viktning av de tekniska och ekonomiska för- och nackdelarna. Lite tid har ägnats åt att påminna och upplysa fastighetsägare om de viktiga hälsoaspekterna kopplade till ventilationssystem och rumsluft under vintermånaderna. Uteluften under vintermånaderna är generellt torr i Sverige. När uteluft av minus 15 grader och relativ fuktighet 90% värms till 18 grader minskar dess relativa fuktigheten till cirka 7–8%. Mängden fukttillskott till inomhusluften varierar från byggnad till byggnad och beror främst på boendevanor och hur väl ventilationen fungerar. Den genomsnittliga uppfuktningen och temperaturhöjningen är omkring 2,0–2,5 g_{ånga}/kg_{torr luft} respektive 3 grader i svenska flerbostadshus. Detta resulterar i en rumstemperatur på 21 grader med relativ fuktighet 20–23%. Figur 4 visar hur vår infektionsrisk varierar med relativ luftfuktighet inomhus. Ur figuren framgår tydligt att den största infektionsrisk föreligger när relativa fuktigheten ligger mellan 15 och 25%. Tyvärr ligger den relativa fuktigheten inomhus oftast inom detta spann eller lägre i svenska flerbostadshus under vintermånaderna [18, 21]. Det vore mer hälsosamt om den relativa fuktigheten kunde hållas runt 30% i våra bostäder och det är någonting fastighetsägare bör beakta. Det är viktigt att komma ihåg att förångningen av fukten inte är gratis. Det krävs ett värmetillskott motsvarande 6,0–7,5 kW/(m³/s) tilluft för att förånga ett fukttillskott på 2,0–2,5 g_{ånga}/kg_{torr luft} inomhus.



Figur 4. Förändring av infektionsrisken med relativ luftfuktighet inomhus [25].

² 3000 m² · 0,35 l/(s m²) ≈ 1,0 m³/s (tilluftsbehov)

6,2 W/m² · 3000 m² · 10⁻³ kW/W · 450 kr/kW ≈ 8400 kr (kostnad per avfrostningscykel)

8400 kr + [2,4 kW/(m³/s) · 1,0 m³/s · 450 kr/kW] ≈ 9 500 kr (avfrostningskostnad + kostnad att höja tilluftstemperaturen från 18 till 20 grader). Om effektavgiften sätts till 850 kr/kW blir möjlig besparing 17 850 kr ≈ 18 000 kr per eliminerad avfrostningscykel.

5 SLUTSATSER

Följande huvudsatser kan dras från den utförda forskningen i projektet:

- 1) Korrekt val och styrning av drifttemperaturer och driftflöden har stor betydelse för en effektiv drift av ett GEO-FTX system. Temperaturen på inkommande ventilationsluften bör höjas till strax över -2 grader Celsius innan den tillförs en motströms plattvärmeväxlare med temperaturverkningsgrad mellan 83 och 86%, men inte högre.
- 2) Genom förvärmning av tilluften till -2 grader kan avfrostningsbehovet hos motströms plattvärmeväxlare kraftigt minskas och till och med elimineras under vissa förutsättningar i Stockholms klimat. För att säkerställa rätt tilluftstemperatur bör temperaturverkningsgraden hos värmeväxlaren minst vara 83% procent, men helst högre för att eliminera behovet av eftervärmning under de kalla dagarna (se tabell 1).
- 3) Eliminering av avfrostningsbehov kan medföra en minskning av värmeeffektbehovet med omkring $6,2 \text{ W/m}^2$ uppvärmd golvyta. En minskning av tilluftstemperaturen från 20 till 18 grader skulle medföra en ytterligare effektbesparing motsvarande $2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ tillfört luftflöde.
- 4) Föreslagen ekvation 1 kan användas för att reglera brineflöde från borrhålet till uteluftförvärmare för att förhindra påfrysningen i plattvärmeväxlaren i GEO-FTX-systemet. Ekvationen har validerats genom dynamiska energisimuleringar med gott resultat och kan relativt enkelt inprogrammeras i styrsystemet.
- 5) Det är viktigt att genomströmningshastighet i kollektorslangen väljs korrekt för att minska elbehovet hos brinepumpen utan att minska värmeavgivningen från uteluftsförvärmaren. Tryckförlusten i kollektorslangen bör begränsas till 250 Pa/m i enighet med nuvarande rekommendationer [23]. Det innebär att genomströmningshastigheten i kollektorslangen med inre rördiamanter på 26–35 mm bör sättas till $0,5\text{--}0,6 \text{ m/s}$ (se resonemanget på sidan 19–20).
- 6) Förslagna styrstrategier för GEO-FTX system för somrardrift har visats i figurerna 2a och 2b. Vår undersökning har visat att GEO-FTX kunde minska operativ temperatur med 3 till 4 grader i ett genomsnittligt flerbostadshus under en värmebölja i Stockholmsregionen.
- 7) Undersökningen har visat att GEO-FTX system kunde hålla operativ temperatur lika med eller under 26 grader under 80% av drifttimmarna under en normal sommar i Stockholms klimat. För ett motsvarande konventionellt FTX-system var andelen drygt 40%.

- 8) Kylningskapaciteten hos ett GEO-FTX system kan ökas genom att öka tilluftsflödet från 0,35 till 0,7 l/s/m². Utvärderingen har visat att denna ökning kan minska operativ temperatur med 2,0 till 2,5 grader i ett genomsnittligt flerbostadshus under värmeböljan i Stockholmsregionen [15]. Denna dubbling av ventilationsflödet kräver en ökning av diametern hos ventilationskanalerna med 50% för att inte öka elanvändningen hos fläktarna (se figur 3).

- 9) Relativ luftfuktighet inomhus är generellt låg i svenska bostäder under vintermånaderna. Torr inneluft försämrar vår självrensningmekanism vilket ökar infektionsrisken (se figur 4). Därför är det viktigt att relativ luftfuktighet inomhus åtminstone inte är under 30% under vintermånaderna. Detta bör inte avsevärt öka påfrysningfrekvensen hos plattvärmeväxlaren, men sannolikt lär förbättra hälsoaspekter för de boende

6 PUBLIKATIONSLISTA

I projektet slutfördes och publicerades följande doktorsarbete, artiklar och examensarbeten:

Doktorsarbete

Behrouz Nourozi. *Advances in Ventilation Heat Recovery - An assessment of peak load shaving using renewables*. KTH Royal Institute of Technology. ISBN 978-91-8040-199-9. 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1652112/FULLTEXT01.pdf>

Vetenskaplig artikel 1

Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. Maximizing thermal performance of building ventilation using geothermal and wastewater heat. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 143., Pages 90-98. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.025>

Vetenskaplig artikel 2

Cong Wang, Qian Wang, Behrouz Nourozi, Henrikki Pieskä, Adnan Ploskić. Evaluating the cooling potential of a geothermal-assisted ventilation system for multi-family dwellings in the Scandinavian climate. *Building and Environment*. Volume 204. 108114. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108114>

Konferensartikel 1

Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. Identifying frost threshold in a balanced mechanical ventilation system by inlet and exhaust air temperature control. The 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC2019). Harbin, China. 2019. DOI: 10.6084/m9.figshare.9209846.v1

Konferensartikel 2

Behrouz Nourozi, Sasan Sadrizadeh, Adnan Ploskić. Critical values for condensation and frost onset in air recuperators – A detailed heat transfer evaluation. Department of Civil & Architectural Engineering, School of Architecture and the Built Environment, KTH Royal Institute of Technology. 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4080991>

Examensarbete 1

Filip Johansson. *Investeringsanalys av ett GeoFTX-system under vinterdriften*. Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Byggt teknik och Design. TRITA-ABE-MBT; 22521. Stockholm. 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1682570/FULLTEXT01.pdf>

Examensarbete 2

Emin Osmic. *Frost prediction in heat exchangers: The influence of relative humidity and outdoor temperature on frost formation in plate heat exchangers*. Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Hållbara Byggnader. TRITA-ABE-MBT; 22640. Stockholm, 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1694867/FULLTEXT01.pdf>

Examensarbete 3

John Alexandersson. *Life Cycle Cost Analysis of two high temperature cooling systems supplied by geothermal energy*. Kungliga Tekniska Högskolan. Byggetenskap. Hållbara Byggnader. TRITA-ABE-MBT; 22639. Stockholm, 2022. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1694857/FULLTEXT01.pdf>

Teknikartikel 1:

Adnan Ploskić, Louise Rosén. Komplex ventilationssystem ska få bättre styrning. Svensk Byggtjänst. Byggekoll. 19-avgusti-2020.

7 REFERENSER

- [1] Internet: <https://www.energimyndigheten.se/statistik/den-officiella-statistiken/statistikprodukter/energistatistik-for-flerbostadshus/>
- [2] Regeringen. Infrastrukturdepartementet. Sveriges tredje nationella strategi för energieffektiviserande renovering. 2019.
- [3] Wallin, J. Case studies of four installed wastewater heat recovery systems in Sweden. Case Stud. Therm. Eng. 26, 101108. 2021.
- [4] Internet: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/hushallens-ekonomi/inkomster-och-inkomstfordelning/hushallens-boende/pong/statistiknyhet/hushallens-boende-2019/>
- [5] Mats Andreasson, Margaretha Borgström, Sven Werner. Värmeanvändning i flerbostadshus och lokaler. Stockholm: Svensk Fjärrvärme. Rapport 2009:4. 2009.
- [6] Kempe P, Jonsson R. Nybyggt flerbostadshus med förvärmning med borrhålvatten. BeBo - Energimyndighetens nätverk för energieffektiva flerbostadshus. Slutrapport. Juni 2015.
- [7] Orpana LF. Luftbehandlingssystem i energiberäkningar. En studie av produktdata och beräkningsmetoder. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond – SBUF. ID: 12994. November 2015.
- [8] Simanić B. Förvärmning av ventilationsluft mha borrhålvärme utan värmepump, fallstudie Vivalla Örebro. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond – SBUF. ID: 12930. Juni 2016.
- [9] Sundin M. Geotermisk förvärmning av ventilationsluft. En utvärdering av ventilationssystemets energieffektivitet. Uppsala Universitet. Examensarbete 30 hp. UPTec ES 18 018. ISSN: 1650-8600. Maj 2018.
- [10] Kragh J, Rose J, Svendsen S. Mechanical ventilation heat recovery in cold climates. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Vol. Bind 2, 1. Ed. Reykjavik. 2005.
- [11] Christofer Åström, Pär Bjelkmar, Bertil Forsberg. Ovanligt många dödsfall i Sverige sommaren 2018. Läkartidningen. <https://lakartidningen.se/klinik-och-vetenskap-1/artiklar-1/originalstudie/2019/05/ovanligt-manga-dodsfall-i-sverige-sommaren-2018/>
- [12] Internet: <https://www.svd.se/a/xPVe68/det-ar-vi-som-skapar-dodliga-varmeboljor>
- [13] Linda Fridh. Engelska skolan i Lund ställde in lektioner på grund av värmen. SVT Nyheter. 27 AUGUSTI 2019. <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/skane/engelska-skolan-i-lund-stalldede-in-lektioner-pa-grund-av-varmen>
- [14] Internet: <https://www.hyresgastforeningen.se/stod-och-rad/lagenbeten/inomhustemperatur-hur-varmt-ska-det-vara/>
- [15] Cong Wang, Qian Wang, Behrouz Nourozi, Henrikki Pieskä, Adnan Ploskić. Evaluating the cooling potential of a geothermal-assisted ventilation system for multi-family dwellings in the Scandinavian climate. Building and Environment. Volume 204. 108114. 2021.

- [16] Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. Maximizing thermal performance of building ventilation using geothermal and wastewater heat. Resources, Conservation and Recycling. Volume 143., Pages 90-98. 2019.
- [17] Internet: <https://www.sbuf.se/Projektsida?project=63a517ae-4847-45d0-830a-af8e97e07a7>
<https://www.e2b2.se/forskningsprojekt-i-e2b2/varme-och-ventilation/effektiv-varmeatervinning-fran-spillvarme/>
- [18] Per Kempe, Karin Lindström, Agneta Persson, Peter Karlsson. Geotermisk förvärmning. Inventering, analys av mätdata vinter och sommar samt dimensioneringsråd. Version: 1.0. BeBo. 2021-12-30.
- [19] Helge Averfalk, Sven Werner. Framtida fjärrvärmeteknik. Möjligheter med en fjärde teknikgeneration. ENERGIFORSK. RAPPORT 2017:419. 2017.
- [20] Behrouz Nourozi, Qian Wang, Adnan Ploskić. Identifying frost threshold in a balanced mechanical ventilation system by inlet and exhaust air temperature control. The 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC2019). Harbin, China. 2019.
- [21] Anton Hallgren, Simon Israelsson. Ventilation i flerbostadshus - hur fungerar den ur ett fuktperspektiv? Examensarbete i Byggteknik, 15 hp. Linnéuniversitetet, Fakulteten för Teknik. 2018-06-13.
- [22] Adnan Ploskić, Qian Wang, Reducing the defrosting needs of air-handling units by using heat from wastewater in apartment buildings in cold climates. Applied Thermal Engineering. Volume 157, 113647, 2019.
- [23] Mariager K. Danish Energy Management A/S. Duct and Piping Guideline. 2011. https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=41498
- [24] Erik Björk, José Acuña, Eric Granryd, Palne Mogensen, Jan-Erik Nowacki, Björn Palm, Kenneth Weber. Bergvärme på djupet. Boken för dig som vill veta mer om bergvärmepumpar. Stockholm, April 2013. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:619184/FULLTEXT01.pdf>
- [25] Noti, JD. Blachere, FM. McMillen, CM. Lindsley, WG. Kashon, ML. et al. High Humidity Leads to Loss of Infectious Influenza Virus from Simulated Coughs. PLoS ONE 8(2): e57485. DOI:10.1371/journal.pone.0057485. 2013.