



**MÄLARDALENS HÖGSKOLA
ESKILSTUNA VÄSTERÅS**

VÄRMEÅTERVINNING I VENTILATIONS LUFT

En studie om FX- och FTX-ventilation vid energieffektivisering av flerbostadshus

DARON QADER

MARIAM BEL FDHILA

Akademien för ekonomi, samhälle och teknik

Kurs: Examensarbete i industriell ekonomi med inriktning energiteknik
Kurskod: ERA402
Ämne: Energiteknik
Högskolepoäng: 30 hp
Program: Civilingenjörsprogrammet i Industriell Ekonomi

Handledare: Eva Nordlander
Examinator: Maher Azaza
Uppdragsgivare: Roland Jonsson, WSP
Datum: 2018-05-31
E-post:
Mba13002@student.mdh.se
Dqr13001@student.mdh.se

ABSTRACT

To reduce the heating demand and do savings in energy cost of buildings there are several possible actions while renovating. Thru using heat recovering systems in buildings or constructions that are well-insulated the heat demand in buildings gets reduces. Air and supply air systems with heat recovery (FTX) and exhaust air heat pump (FX) are two different ventilation types that can recycle heat in a building. Heat recovery in FTX systems is done with a heat exchanger, while in FX systems it is done by a heat pump. In this degree project, a comparison has been made between the two ventilation systems, FTX and FX, by calculating the energy consumption of a building and their recycling opportunities. Possible energy savings have been calculated and how the profitability of the systems looks. Further, the actual performance of the FTX system is investigated and if it complies with the currently reported temperature efficiency specified by the ventilation manufacturers.

Indoor air is used as a heat source when it is taken out of the building and is called exhaust air, energy is then recycled from the hot exhaust air. Exhaust air is hot because it contains indoor temperature. If heat recovery does not occur, the heat in the extract air is vented out of the housing, which means that the heat energy is lost. The energy calculations that gave an answer to how much energy is saved for each system compared to an F system has been performed in Excel and the recovered heat of the systems is calculated for each hour for a whole year and in different parts of the country, such as Kiruna, Stockholm, Örebro and Ystad . Moisture and temperature variation can affect the efficiency and recovery rates of the investigated units, therefore, cities with such geographical depiction have been chosen to be analyzed. The residual heating requirement in the house is supplied by district heating.

The result of this study shows that the FTX system brings the greatest cost savings, while the FX system offers the highest energy savings. However, FTX ventilation has a relatively large energy saving in colder climate, which makes the system more competitive with FX with respect to energy savings. Installation costs are slightly lower for FX ventilation compared to FTX ventilation, but the life span of FTX systems is 40 years while it is only 15 years for the FX system. In a short period of time, FX systems can be cheaper, but in the long run, FTX systems become more profitable.

Due to the fact that the electricity price is higher in relation to the price paid for district heat, energy savings in FX systems can not lead to cost savings. This means that the heat pump already has no economic competitiveness at many locations in the country today. According to the building rules of the building, real estate is to be calculated by 85% after the introduction of primary energy factor, which is 1.85 for electricity in a few years, which means that FX systems will not become more competitive even in energy use against the FTX system. This means that FTX systems should stand as an obvious choice of ventilation in the future. The current temperature efficiency of FTX systems can be replaced by an energy efficiency rate, which might be more accurate measure of recycled amount of energy. The

energy efficiency could therefore be introduced to avoid that more energy than expected is actually needed in the energy use of the house.

Keywords: Air and supply air systems with heat recovery, exhaust air heat pump, efficiency, energy consumption

FÖRORD

Denna studie är resultatet av vårt examensarbete inom programmet civilingenjör i Industriell ekonomi med inriktning energiteknik på Mälardalens högskola i Västerås. Examensarbetet är gjort i samarbete med företaget WSP i Stockholm och är utfört under vårterminen 2018.

Vi vill börja med att tacka Roland Jonsson på WSP som under arbetets gång bidragit med bra handledning, stort engagemang och vetskap inom ämnet för arbetet. Därefter vill vi tacka Niklas Brömster på IV Produkt som gladeligen tog sin tid för att bistå med energiteknisk kunskap i studien. Vi vill även tack Eva Nordlander som handlett oss genom examensarbetet och bidragit med hjälp i skrivandet av rapporten, vidare vill vi även tacka Jan Sandberg för stöd och diskussion gällande beräkningar och tekniska aspekter i studien.

Vi vill tacka företaget WSP för att vi fått skriva vårt examensarbete hos er och tacka alla inblandade i projektet som visat stort engagemang för vårt arbete.

Västerås, Maj 2018

Mariam Bel Fdhila & Daron Qader

SAMMANFATTNING

För att minska uppvärmningsbehovet och energikostnader i byggnader finns det ett flertal olika möjliga åtgärder. Genom att återvinna värme som finns tillgänglig i byggnader eller konstruktioner med välisolerade byggnader minskas värmebehovet i byggnader. Från- och tilluftssystem med värmeåtervinning (FTX) och frånluftvärmepump (FX) är två olika ventilationstyper som kan återvinna värme i en byggnad. Värmeåtervinningen i FTX-system sker med hjälp av en värmeväxlare medan den i FX-system sker med hjälp av en värmepump. I detta examensarbete har en jämförelse gjorts mellan de två ventilationssystemen, FTX och FX, genom att beräkna energiåtgången för en byggnad och återvinningsmöjligheterna. Möjliga energibesparingar har beräknats samt hur lönsamheten för systemen ser ut. Ytterligare undersöks FTX-systemets verkliga prestanda och om denna överensstämmer med den aktuellt redovisade temperaturverkningsgraden som ventilationsfabrikanterna anger.

Inomhusluften används som värmekälla då den förs ut ur byggnaden och kallas frånluft, energi återvinns då från den varma frånluften. Frånluft är relativt varm för att den håller inomhustemperatur. Om värmeåtervinning inte sker ventileras värmen i frånluften ut ur bostaden, vilket innebär att värmeenergin går förlorad. Energiberäkningarna som gett svar på hur mycket energi som sparas för respektive system jämfört med ett F-system, har utförts i Excel och systemens återvunna värme beräknas för varje timme under ett helt år och i olika delar av landet, Kiruna, Stockholm, Örebro och Ystad. Fuktigheten och temperaturvariation kan påverka effektiviteten och återvinningsgraden hos de undersökta aggregaten, därför har städer med så geografisk skildring valt att analyseras. Det återstående värmebehovet i huset försörjs av fjärrvärme.

Resultatet av denna studie visar att FTX-systemet medför störst kostnadsbesparing, medan FX-systemet för med störst energibesparing. FTX-ventilation har dock en relativ stor energibesparing i kallare klimat, vilket gör systemet mer konkurrenskraftig mot FX med avseende på energibesparingen. Installationskostnaden är något lägre för FX-ventilation jämfört med FTX-ventilation, men livslängden för FTX-system är på 40 år medan den enbart är 15 år för FX-systemet. På kort tid kan FX-system vara billigare, men på lång sikt blir FTX-system mer lönsamt.

På grund av att elpriset är högre i förhållande till det pris som betalas för värme kan energibesparing i FX-system inte leda till någon kostnadsbesparing. Detta gör att värmepumpen redan idag inte har någon ekonomisk konkurrenskraft på många platser i landet. Enligt boverkets byggregler ska fastighetsel räknas upp med 85% efter införing av primärenergifaktor, som är 1,85 för el om några år, vilket gör att FX-system ska ha det svårare att konkurrera även energimässigt mot FTX-systemet. Detta innebär att FTX-system ska stå som ett självklart ventilationsval i framtiden. Gällande temperaturverkningsgraden för FTX-system kan en energiverkningsgrad vara ett mer rätt mått på återvunnen mängd energi. Energiverkningsgraden skulle därför kunna införas för att undvika att mer energi än beräknat egentligen åtgår i husets energianvändning.

Nyckelord: Från- och tilluftsventilation, FTX-system, frånluftsvärmepump, FX-system, värmeåtervinning, energianvändning, värmekälla

INNEHÅLL

1	INLEDNING	12
1.1	Bakgrund	12
1.1.1	Ventilation	14
1.1.2	Frånluftvärmepump (FX)	14
1.1.3	Till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX)	16
1.2	Syfte	17
1.3	Frågeställningar	17
1.4	Avgränsning	18
2	METOD	19
3	LITTERATURSTUDIE	20
3.1	Värmeåtervinningssystem	20
3.2	Värmeåtervinning med FTX	20
3.3	Värmeåtervinning med FX	21
3.4	Jämförelser av FX- och FTX-system	22
3.5	Temperaturverkningsgrad	23
3.6	CO ² utsläpp	24
3.7	Ventilationssystem kombinerat med fjärrvärme	24
3.8	Beslut om åtgärder för energibesparing	25
4	AKTUELL STUDIE	26
4.1	Referens objekt	26
4.2	Geografisk placering och klimatdata	27
4.3	Koppling	30
4.4.1	Vatteninnehåll (Absolut fuktighet, x)	30
4.4.2	Relativ fuktighet	30
4.5	Beräkning av effektbehov och energianvändning	31

4.5.1	Mollier diagram	31
4.5.2	FTX-beräkningsmodell	34
4.5.3	FX-beräkningsmodell.....	35
4.7	Energibesparing	37
4.8	Ekonomikalkyl	37
4.9	Primärenergifaktor	38
5	RESULTAT	40
5.1	Ekonomisk analys	41
6	DISKUSSION.....	44
7	SLUTSATSER.....	46
8	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE.....	46
	REFERENSER.....	47
BILAGA 1:	NUVÄRDETABELL.....	50

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1	Tilluft i ett frånluftssystem tas in från hål i väggen och otätheter i huset.....	15
Figur 2	Tilluften dras in mekaniskt i ett till- och frånluftssystem	16
Figur 3	Värmeåtervinning genom värmeväxling	17
Figur 4	Temperatur Stockholm.....	28
Figur 5	Temperatur Kiruna	28
Figur 6	Temperatur Örebro.....	29
Figur 7	Temperatur Ystad	29
Figur 8	Mollier diagram	32
Figur 9	Tillståndsförändring i Mollier diagram.....	33
Figur 10	Tillståndsförändring i Mollier diagram.....	35
Figur 11	Tillståndsförändring i Mollierdiagram	35
Figur 12	Fjärrvärmebehov i kWh/år	40
Figur 13	Värmekostnad i kr/år.....	40
Figur 14	Energibesparing i kWh/år jämfört mot F-system	41
Figur 15	Kostnadsbesparing uppvärmningskostnad i kr/år jämfört mot F-system	42

Figur 16 Total kostnadsbesparing under aggregatens livslängd	42
Figur 17 Kostnadsbesparing per år för respektive aggregat	43
Figur 18 Verkningsgradsjämförelse för FTX-system.....	43

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1 Byggnadsbeskrivning.....	26
Tabell 2 Byggnadsteknik	26
Tabell 3 Husets energianvändning	26
Tabell 4 Kostnadsbesparing	38
Tabell 5 Primärenergifaktor	38
Tabell 6 Framtida energiprestanda.....	39

BETECKNINGAR

Beteckning	Beskrivning	Enhet
A_{temp}	Area uppvärmd till mer än +10 °C	°C
C_p	Specifikt värmevärde	J/kg°C
h	Entalpi	kJ/kg
m_g	Maximal vattenmängd	kg
m_v	Faktisk vattenmängd	kg
P_v	Partialtryck för vatten	Pa
Q	Effekt	W
q	luftflöde	m ³ /s
T	Temperatur	°C
T_{dp}	Temperatur vid dagpunkt	°C
x	Vatteninnehåll	kg/kg
ρ	Densitet	kg/m ³
η	Verkningsgrad	%
ϕ	Relativ fuktighet	%

FÖRKORTNINGAR

Förkortning	Beskrivning
BBR	Boverkets byggregler
FTX	Från- och tilluftssystem med värmeåtervinning
FX	Frånluftsvärmepump med värmeåtervinning
TVV	Tappvarmvattenflöde
VVC	Varmvattencirkulation

DEFINITIONER

Definition	Beskrivning
Frånluft	Luft som bortförs från lokal; kan bortföras till det fria eller genom ventilationsanordningar.
Inneluft	Luft inne i en byggnad.
Tilluft	Luft som förs in i lokal; kan införas via ventilationssystemen.
Uteluft	Luft som finns utomhus.
Entalpi	Entalpi mäts i enheten kJ/kg och ger den lagrade energimängden i ett ämne. Entalpin i ett ämne är tryck och temperaturberoende.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Byggnadssektorn är den största energianvändaren och koldioxidutsläpparen i EU, byggnader står för cirka 40 procent av EU:s totala energibehov (Kamendere, Zogla, Kamenders, Ikaunieks & Rochas, 2015). Med de aktuella miljömålen som EU satt upp vill Sveriges regering minska varje uppvärmd bostads energianvändning med 20% och 50% mindre än 1995 nivå, innan år 2020 respektive 2050 (Dodoo, Gustavsson & Sathre, 2011). De satta miljömålen lägger därmed ett ökat krav på energieffektivitet i bostäder. Fastighetsägarna och bostadsföreningarna har i det aktuella läget stora utbud på energilösningar och åtgärder med vilka de skulle kunna minska byggnadernas energianvändning. För fastighetsägarna kan valet av energieffektiviseringsåtgärd visa sig vara ett komplicerat val då kostnad, prestanda, funktion och anpassning i den befintliga bostaden är viktiga aspekter att ta hänsyn till. Vilken lösning som är den optimala för fastigheten i fråga kan påverkas av många faktorer och dessutom kan lösningen utformas i förhållande till vilket resultat som förväntas bli uppnått. Målet kan vara att spara i effekttimmar eller koldioxidutsläpp men samtidigt kan det bli mindre gynnsamma lösningar när man kollar på rena kostnadsbesparingar.

Vad det gäller energianvändning i bostadssektorn har värmeåtervinningssystem fått en viktig roll. Ett av alternativen för ökad energibesparing är att installera mer utvecklade ventilationssystem. Ventilationsåtgärder är bland de vanligaste insatserna för energieffektivisering (svenskventilation.se, 2018) och ventilationssystem i byggnader står för 30-60% av byggnaders energianvändning (Dodoo et al., 2011). I denna rapport ska två alternativ undersökas, frånluftsventilation med värmeåtervinning (FX) och till-och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX). Forskning visar att värmepumpar blir allt fler på grund av den pågående omställningen till ett mer hållbart samhälle samt att faktorer såsom energipriser och styrmedel har bidragit till en konstant utveckling av värmepumparnas plats på energimarknaden (polarpumpen.se, 2018a).

Inte enbart nya bostäder behöver vara energisnåla, även befintliga bostäder energieffektiviseras oftast i samband med renoveringar då det är enklare att genomföra åtgärder och välja energieffektiva lösningar när det ändå sker ingrepp i fastigheter. Då fastighetsägare och bostadsföreningar energieffektiviserar en bostad förväntas ingreppet vara en investering som ska ge avkastning över relativt kort tid, därför kan det vara intressant att luta sig över dessa åtgärders förmåga att göra skillnad i plånboken genom energibesparingen och vilka olika alternativ som kan ge bäst resultat. Givetvis beror utfallet på bostaden som undersöks och dess förutsättningar för en bättre optimering av energianvändningen. I befintliga bostäder kan flera faktorer som byggnadens skick, storlek, marknadsförutsättningar och värmelösningar som kan påverka beslutet om

energieffektiviseringsåtgärder och avgörs av de fastighetsekonomiska förutsättningarna. De befintliga fastighetsägarna är inte ensamma om att känna press från processen och kraven som miljömålen sätter, byggregler blir allt tuffare och god energiprestanda måste uppnås i kommande bostäder.

Det är viktigt att alla värmepumpar och andra ventilationsaggregat som installeras kan leverera utlovad prestanda och kan hålla en viss energieffektivitet. Dock har i dagens läge mätkontroller på befintliga bostäder visat att det är svårt för systemen att uppnå den beräknade prestandan, speciellt i nya hus med FTX-ventilation (Energimyndighetens beställargrupp för energieffektiva flerbostadshus [Bebo], 2014). Med andra ord behöver byggnader uppfylla utlovad prestanda på energianvändning och ett värmeåtervinningssystem bör uppfylla sin deklarerad kapacitet i avsikt att minska miljöpåverkan och driftkostnader. Idag kan inte all värme återanvändas, verkningsgraden för en sådan process är en viktig aspekt vid energiberäkningar för en byggnad. Om en ventilationsleverantör överskattar systemets verkningsgrad kan energibehovet bli större än beräknat vilket i sin tur kan leda till högre miljöpåverkan och utsläpp. Projektörer vill ha mer säkerhet i byggnadens funktionsegenskaper för att kunna uppskatta byggnaders verkliga energiåtgång, därmed krävs verkliga värden samt verkliga verkningsgrader för de energisystem som är aktuella i hemmet. För att åtgärda detta problem ska entalpiverkningsgraden undersökas i förhållande till temperaturverkningsgrad.

Enligt Energimyndighetens beställargrupp för energieffektiva flerbostadshus, Bebo, som har flertalet pågående projekt med teknikupphandlingar av olika möjliga energieffektiviseringsåtgärder, finns det exempel på renoveringar och energieffektiviseringsåtgärder som resulterat i stora energibesparingar där kostnaden ökat istället för att minska. Med de annonserade taxeförändringarna visar att effekt blir dyrare och värmebesparing blir därför av större intresse. Det finns alltså en risk att effektiviseringsåtgärder inte visar god lönsamhet i längden och att trenden av att energieffektivisera minskas (Bebo, 2014). Därför ska detta projekt ämna sig åt att beräkna hur energiåtervinningen påverkas av olika temperaturer och vatteninnehåll i frånluften i avsikt att kunna omsätta utlovade prestationsförmåga av de utvalda ventilationssystemen. Beräkningarna som utförts är önskvärda för att presentera demonstrationsexempel av hur effekttillförseln samt effekttåtervinningen ser ut i byggnaden. Projektet fokuserar på att få ett resultat av reduktion av energianvändning, men även beräkna kostnadseffektiviteten hos FTX- och FX-ventilation jämfört med simpel F-ventilation som inte har någon värmeåtervinning alls.

Detta arbete bygger bland annat på Bebo-projektet "Ett hus fem möjligheter" som presenterar fem olika alternativ med åtgärder i avsikt att göra det enklare för både ägare till flerbostadshus och bostadsrättsföreningar att kunna välja vilken väg de ska gå för att nå en kostnadseffektiv energieffektivisering. Energiberäkningsmodellen som utförts i detta examensarbete för frånluftsvärmepump bygger en del på tillgängligt underlag från detta praktiska Beboprojekt. Målet för Bebo med rapport de utgett har varit att belysa hur de redovisade alternativen inte är mer rätt eller fel än andra utan att de resulterar i olika resultat (Bebo, 2014).

Kärnan i denna rapport behandlar hur värmeåtervinning i FX-system respektive FTX-system kan bidra till att göra bostäder mer energi- och kostnadseffektiva. Beräkningsmodeller för de båda systemen har skapats för att jämföra värmebehovet i en byggnad med och utan värmeåtervinning i ventilationssystemen.

1.1.1 Ventilation

Ett ventilationssystem har som funktion att förnya inomhusluften genom att bortföra brukad luft och tillföra friskluft, vilket leder till förhindring och eliminering av luftföroreningar i byggnaden. Ventilationssystem kan även hjälpa till att värma eller kyla klimat inomhus och skapa ett undertryck.

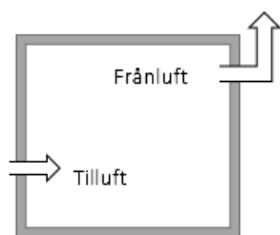
För att undvika för höga fukthalter, koldioxidhalter och andra luftföroreningar som kan orsaka obehagligt inomhusklimat är det viktigt att det ska vara god luftkvalité inomhus. Olika sjukdomar såsom allergier och astma kan utvecklas om människor lever en längre tid i inomhusklimat med usla luftförhållanden (folkhälsa.nu, 2018).

Ventilationssystem kan delas in i självdrag (S), frånluft (F) och från- och tilluft (FT). FT och F kan kompletteras med värmeväxlare respektive värmepump, vilket då får benämningarna från- och tilluft med värmeåtervinning (FTX) samt frånluft med värmeåtervinning (FX) (Energimyndigheten, 2011). I detta arbete kommer typerna FTX och FX studeras mer ingående. En kort beskrivning av samtliga system ges för att kunna ge en bättre översikt av de olika typerna.

Självdrag (S) används oftast i hus som är byggda före 1970 och inte har blivit radikal renoverade. Husen som byggdes under 1970-talet var mycket tätare i avsikt att spara energi, men ventilationen var oförändrat jämfört med tidigare perioder. Många hus hade således fortfarande självdragssystem, vilket oftast inte fungerar särskilt bra. Frånluftssystem med värmeåtervinning (FX) dominerade i slutet av 1970-talet. Hus med från- och tilluftssystem med värmeåtervinning (FTX) uppträdde också under samma period. Detta gjorde det möjligt att återvinna värme, antingen för att värma tilluften med FTX-system eller värma tappvarmvatten samt vatten till uppvärmning med hjälp av ett FX-system (Energimyndigheten, 2011).

1.1.2 Frånluftvärmepump (FX)

I ett FX-system styrs ett stadigt luftflöde ut ur huset och skapar ett undertryck i byggnaden som gör att luft kommer in från uteluftsdon eller otäta hål i hemmet. Frånluftsvärmepumpen återvinner värmen i luften och skickar sedan ut kall luft ur aggregatet, värmen som återvinns i systemet används till uppvärmning av vatten som går till exempelvis radiatorer för att värma upp hemmet (Abel & Elmroth, 2008).



Figur 1 Tilluft i ett frånluftssystem tas in från hål i väggen och otätheter i huset

En frånluftvärmepump beskrivs därför som en sammankopplad ventilation och uppvärmningssystem. Eftersom frånluftvärmepump bygger på att utnyttja byggnadens frånluft tas systemet som en värmeåtervinnande process, vilket innebär att värmepumpen omvandlar lågvärdig värme till högvärdig värme i frånluften. Den återvunna värmeenergin skickas sedan ut i byggnadens uppvärmningssystem eller vattenburna värmesystem. Återvunnen värmeenergi i frånluftvärmepump baseras på el och för att kunna installera denna typen måste det finnas ett styrt frånluftssystem. Frånluftens energimängd är oftast inte tillräckligt stor för att möta hela byggnadens totala energibehov, men det finns fortfarande goda möjligheter till att minska både värmekostnader och husets energianvändning.

Fördelen med frånluftvärmepump (FX) är att en stor del av frånluftens värme kan tas tillvara, vilket i sin tur kan minska byggnadens totala energiinköp. Det som kan ses som nackdel med denna typ av uppvärmningskälla är att värmepumpen kräver el vid drift (polarpumpen.se, 2018a).

För att förflytta värmeenergi från ett kallt medium till ett varmt krävs det ett slutet system som består av en kompressor, kondensator, expansionsventil och förångare och även ett ämne såsom HFC-134a eller propan, som kallas för köldmedium i avsikt att kunna transportera värmen i frånluftvärmepumpen.

Kompressorn hjälper till att höja tryck som i sin tur höjer temperaturen hos köldmediet, vilket innebär att denna komponent blir systemets hjärta. Det vill säga att hålla köldmediet cirkulerande i systems olika komponenter är kompressorns uppgift och detta arbete kräver någon slags energi som vanligen kommer från el.

Genom kondensorns värmeväxlare avges värme med en temperatur på upp till 55 °C till husets uppvärmningssystem när köldmedieången kondenserar med anledning av kylning mot värmesystemet. Med andra ord är överföring av värmen från värmepump till uppvärmningssystemet är kondensorns uppgift. För att värmeväxlaren ska jobba effektivt används oftast en motflödesväxlare som hjälper till med att det kalla mediet ska flöda motströms mot det varma mediet. Detta innebär att mediet i den varma delen kan avkylas till maximalt medan mediet i den kalla delen kan värmas till maximalt.

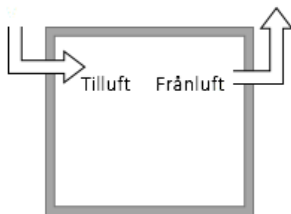
Expansionsventilen behövs i systemet för att upprätthålla tryckskillnaden mellan kondensorn och förångaren. Alltså kompressorn skulle inte kunna öka trycket i kretsen ifall det inte skulle finnas en strypventil. Entalpin varken ökar eller minskas genom denna komponent men

däremot både trycket och temperaturen minskas, vilket leder till att köldmediet ska övergå från en flytande form till ångform på grund av det låga trycket.

Vid förångaren upptar köldmediet värmeenergi, vilket gör att det ska övergå från ångform till gasform. Värmeupptaget hjälper till att öka entalpin. Förångaren är alltså lik kondensorn, men här upptas värmeenergi från omgivningen istället för att avge värme till uppvärmningssystemet. Alltså med hjälp av den tillgängliga värmekällan som är gratis kan den energikrävande förångningen göras i avsikt att utnyttja den vid värmning av värmesystemet. Därefter kommer kompressorn öka trycket och temperaturen på köldmediet, det vill säga omvandla lågvärdig värme till högvärdig värme (Energimyndigheten, 2015).

1.1.3 Till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX)

FTX är en förkortning som står för Tilluft, Frånluft och Värmeåtervinning (X). FTX-system är en mekanisk fläktstyrt till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning, som ger kontroll över mängden friskluft som tillförs i hemmet och mängden frånluft som skall släppas ut. Systemet hjälper att kontrollera mängden luftflöde i huset, vilket kan vara extra viktigt i välisolerade byggnader. I FTX-aggregat används energin i frånluften till att värma den nya inkommande uteluften, aggregatet ger inte värme till vattenburen värme och tappvarmvatten som frånluftsvärmepumpen. Ett FTX-system är inte kopplat till husets uppvärmningsmetod på något sätt, fastighetsägaren kan därmed välja vilken värmekälla som helst (svenskventilation.se, 2018).

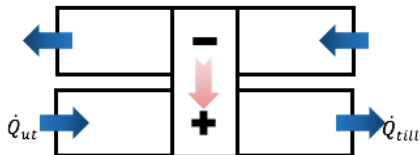


Figur 2 Tilluften dras in mekaniskt i ett till- och frånluftssystem

Värmeåtervinningen kan ske på två olika sätt, antingen regenerativt via en roterande värmeväxlare eller rekuperativt genom en plattvärmeväxlare. Regenerativ värmeåtervinning sker med en roterande värmeväxlare, man har här en värmeöverförande massa som värms respektive kyls omväxlande. Denna typ av värmeväxlare behandlar cirka 2 m³/s och har en högtemperaturverkningsgrad. Läckage på systemet kan ligga omkring 5-10% då det inte går att undvika en viss andel överföring av frånluften till tilluften. Ett regenerativt system är förhållandevis billigt i jämförelse med andra ventilationssystem (Abel & Elmroth, 2008).

Vid rekuperativ värmeväxling strömmar värmen genom en värmeväxlande yta. Plattvärmeväxlarens teknik är simpel och fungerar så att till- och frånluften passerar varandra i ett gemensamt aggregat av lamellskikt veckade aluminiumplåtar. På så sätt värmer frånluften upp aluminiumplåtarna vid vilket den kalla tilluften kan uppta värmen. Systemet har hög temperaturverkningsgrad och är, även detta, relativt billigt.

Temperaturverkningsgraden beror av de värmväxlande ytornas storlek samt värmeöverföringsegenskaper. Läckage i systemet kan ske eftersom det kan bli otätheter vid skarvarna av plåtdelarna, dessutom finns vid kallt utomhusväder risk att fukten som avges från huset blir till frost i aggregatets luftutgång (Abel & Elmroth, 2008). Ytterligare en nackdel hos plattvärmväxlaren är att den oftare kan behöva avfrostningsdrift och därmed förlorar värmeåtervinning vid negativa utomhustemperaturer. För att undvika isbildningen och att värmväxlaren ska skadas av frysningsen ska aggregatets avfrostningsfunktion vara till hjälp (Bebo, 2015).



Figur 3 Värmeåtervinning genom värmväxling

Fördelarna med att installera ett FTX-system är som tidigare nämnt att luftflödet i huset kan kontrolleras men även att det inte kräver stort utrymme, helt frikopplat från både utomhusvädret såväl som husets värmekälla. FTX-systemen ger även möjlighet att rena luften och minskar risken för fuktskador (polarpumpen.se, 2018b).

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att skapa en beräkningsmodell med avsikt att förenkla för bostadsrättsföreningar och fastighetsägare vilket av FX-system och FTX-system de bör välja för att minimera kostnader samt energiförbrukning. Detta ska utföras genom att beräkna vilken av FX- eller FTX-ventilationssystem som har störst mängd värmeåtervinning, effektbehov som krävs och om utetemperatur påverkar energibehovet av respektive system. Den ekonomiska lönsamheten av systemen skall även jämföras i studien. Jämförelsen av systemen innefattar även en lönsamhetsanalys ur kostnadssynpunkt, genom en ekonomisk kalkyl blir lönsamheten under aggregatens livslängd mer visibel.

1.3 Frågeställningar

- Hur påverkar FTX- respektive FX-system energianvändningen och uppvärmningskostnader ur fastighetsägares perspektiv?
- Hur ser lönsamheten ut vid investeringar i FTX- respektive FX-system?
- Vilken av temperaturverkningsgraden eller entalpiverkningsgraden kan stämma överens med verklig prestanda i FTX-ventilation?

1.4 Avgränsning

På grund av att energiförbrukningen i en byggnad kan ha många påverkande faktorer har mätningar på en specifik byggnad inte utförts i detta arbete. Ett villkor för att kunna jämföra de utvalda systemen är att de ska ha exakt likadana förutsättningar och därför blir det svårt att hitta byggnader som har identisk påverkan på ventilation och energikonsumtionen.

I detta arbete undersöks inte om den deklarerade entalpiverkningsgrad stämmer väl med utgångspunkt från verklig verkningsgrad. Arbetet tar även inte hänsyn till vad som kan hända med verkningsgraden då frysning av den utgående luften uppstår, eftersom jämförelsen av systemlösningarna görs enbart på teoretiska grunder och inga verkliga mätningar görs.

Energianvändningen i huset utgörs av tappvarmvatten (VV), varmvattencirkulations (VVC) samt uppvärmningsbehovet av byggnaden. Återvunnen energi från de undersökta ventilationssystemen används enbart för att täcka en del av byggnadens totala värmebehov och därmed inte för VV och VVC.

Undersökningen görs för endast fyra svenska orter: Kiruna, Örebro, Stockholm och Ystad. Detta i syfte om att undersöka inverkan av olika klimatförutsättningar.

2 METOD

För att studera effektiviteten och energibehovet hos installationerna har beräkningsmodeller för respektive system skapats i programmet Microsoft Excel. Med hjälp av timvis data över temperaturer och relativ fuktighet för år 2017 har ventilationens energiåtgång, samt värmebehovet, för ett flerbostadshus beräknats. Ett typiskt hus, redan undersökt av Bebo, med luftflöde på cirka 1 m³/s används som referensobjekt i avsikt att kunna jämföra de utvalda ventilationssystem i olika delar av landet. För att få en uppfattning om hur behovet av energi varierar i olika klimat har fyra städer valts ut i skilda delar av Sverige med stora geografiska skildringar. Städerna som valts ut är Kiruna, Örebro, Stockholm och Ystad. Fuktigheten och temperaturvariation kan påverka effektiviteten och återvinningsgraden hos de undersökta aggregaten. Genom energiberäkningar och termodynamiska samband för både tillförd och återvunnen värme har mängden tillförd energi beräknats för tre fall; hur värmebehovet i huset täcks med hjälp av en F-ventilation, med FTX-system och med FX-system. Allt värmebehov som inte täcks av aggregatens värmeåtervinning försörjs av fjärrvärme. Kostnadskalkyler redovisar sedan de möjliga besparingarna i de tre fallen för varje stad.

I litteraturstudien har sedan en överblick av tidigare forskning gjorts över hur värmeåtervinning har påverkat energieffektivisering av bostäder. De vetenskapliga artiklar som använts har funnits genom databaserna ScienceDirect, Web of Science, Google Scholar och Diva. Litteraturstudien täcker även ventilationssystemens funktioner, fördelar och nackdelar presenteras i avsikt att få en djupare blick i hur värmeåtervinningsystem samt värmeväxlare fungerar och hur forskningsområdet ser ut omkring det. Ett flertal forskningsresultat gällande FTX- och FX-system är sammanfattade i detta stycke.

Genom beräkningar undersöks även skillnaden mellan temperaturverkningsgraden, som vanligtvis anges av ventilationsleverantörer, och entalpiverkningsgraden. Jämförelsen av de två olika typerna av verkningsgrad görs för att undersöka huruvida de två verkningsgraderna stämmer överens med aggregatens verkliga prestanda.

Nödvändig data för att utföra beräkningarna har tillhandahållits av handledaren till examensarbetet på WSP. Den information som WSP har bidragit med och data som är insamlad med avseende på energipriser (fjärrvärme och elpriser), har införts i Excel. För att det ska bli ett lättöverskådligt resultat görs även ekonomiska kalkyler som sista steg i studien. Vid jämförelsen i den ekonomiska analysen av respektive aggregat har nuvärdesmetoden använts.

3 LITTERATURSTUDIE

3.1 Värmeåtervinningssystem

Studier har de senaste åren visat att värmeåtervinning är en möjlighet för att minska värmeförbrukningen i byggnader, värmeåtervinningssystem hos ventilation minskar värmeförlusterna och det minskar i sin tur energikonsumtionen (Cuce & Cuce, 2017).

Att minska den primära energianvändningen från byggmaterial i hus är huvudsakligt för att kunna minska CO² utsläppen, men även renovering av befintliga bostäder ger en tydlig effekt. Genom att isolera byggnader bättre och byta ut exempelvis fönster skapas ett större behov av bättre mekanisk ventilation. Mekanisk ventilation ökar däremot energianvändningen i jämförelse med naturlig ventilation, denna ökade energianvändning kan minskas genom värmeåtervinning av frånluften (Thalfeldt, Kurnitski & Latõšov, 2017).

I en studie framförd av Cuce och Cuce (2017) nämns det att ventilationssystem med värmeåtervinning har höga förvärmnings- och förkylningspotential samtidigt som det är kostnadseffektivt och driftkostnaderna hålls låga. Denna typ av system håller även höga verkningsgrader, systemens kostnad på marknaden är däremot fortfarande hög. I studien framgår att tillverkningskostnaderna för värmeåtervinningssystemen kommer att minska kraftigt beroende på utvecklingen och använd teknik (Cuce & Cuce, 2017).

Värmeåtervinning i ventilationssystem har studerats på närmare håll under senare tid, ett exempel är Dodoo et al. (2011) som analyserade hur ventilation med värmeåtervinning påverkar en svensk byggnads primära energianvändning. Studien undersökte en rad olika uppvärmningsalternativ med och utan värmeåtervinning och visade att på en lågenergibygnad med uppvärmd area på 1190 m² bidrog värmeåtervinningen till en minskad energianvändning på 21 % än utan värmeåtervinning. Minskningen på en äldre befintlig byggnad var på 10 %, värmeåtervinningen bidrog till minskad energianvändning men ökade elbehovet i byggnaden. Ett av de undersökta alternativen var frånluftsvärmepump (FX) med värmeåtervinning, denna minskade uppvärmningsbehovet med 37 % och 12 % för lågenergi- respektive äldre byggnader i jämförelse med byggnader utan värmeåtervinning på frånluftsvärmepumpen. Studien bekräftade att värmeåtervinningens resultat var mer märkbart i lågenergibygnaden, vilket uppvisade att återvinningssystem har större påverkan i ett hus med bättre isolering och mindre luftläckor.

3.2 Värmeåtervinning med FTX

Kamendere et al. (2015) visar i deras forskning att FTX-systemen har i de undersökta husen blivit en energi- och kostnadseffektiv lösning, detta trots att installation av FTX i byggnader kan vara ett komplext projekt. Forskningen gjordes genom att samla data och genom att utföra mätningar i de två nyligen renoverade flerbostadshus belägna i Lettland. De flesta hus i Lettland är byggda vid 70-talet och det finns stor potential för energieffektivisering i landets

befintliga bostäder. Den genomsnittliga energianvändningen av bostäder i Lettland sägs enligt denna studie ligga på 180 kWh/m².

Bebo utförde en utvärdering över hur geotermisk förvärmning av ventilation, så kallad HSB-FTX, kan minska energianvändningen för ett FTX-system. Uppvärmningskomponenten förvärmer uteluften 5-10 grader beroende på uteluften. Uppvärmningssystemet placeras innan FTX-aggregatets luftintag och värmer 0-gradig luft till +5°C och -15-gradig luft värms till -5°C. Förvärmningen som Bebo undersöker är ett system som tar hjälp av geoenergi, vilket är en energiform funnen ur borrhålsvatten. Lösningen minskar effektbehovet för bostaden eftersom behovet av avfrostning i ventilationssystemet minskas via en mer uppvärmd ingångstemperatur i aggregatet och minskar därmed behovet av fjärrvärme vid toppeffekt. Projektets utvärderingen visade att HSB-FTX minskade energiuttaget av fjärrvärme vid toppeffektbehov jämfört med ett vanligt FTX-system. Besparingen i studien landade på 20-25 kW minskat fjärrvärmebehov per år och m². Besparingen av energi kan ha goda effekter så som minskade utsläpp hos fjärrvärmebolaget (speciellt i de fall då energikällan inte är förnybar) och även minskade kostnader för kunden då mindre inköpt energi krävs (Bebo, 2015).

Vidare har en studie genomfört av forskningsprogrammet E2B2, denna har utförts i samarbete med Energimyndigheterna och IQ samhällsbyggnad, projektet handlar om hur FTX-ventilation kan vara ett bra alternativ för energieffektivisering vid renovering av befintliga flerbostadshus. Forskningen gick ut på att konvertera två hus ventilationssystem från deras befintliga till ett FTX-system. Studien visade att den totala kostnaden för utbyte av F till FTX gick på 1,79 MSEK med en energibesparing på 32 kWh/m² och en besparing utav värmeeffekt på cirka 4,5 kW, medan totala kostnaden för utbyte av FT till FTX gick på ungefär 1,45 MSEK. Energibesparing blev 41 kWh/m² här samt besparingen av värmeeffekt var på 8 kW. Detta innebär att utbytet från FT till FTX möjliggör en minskning på 22 % för uppvärmningsenergin, medan utbytet från F till FTX visar en minskning på 24 % för uppvärmningsenergin (Kristoffersson, Bagge, Hamid, Johansson, Almgren & Persson, 2017).

Genom noggranna mätningar har forskningen visat att effektivisering med mer än 20 procent av uppvärmningsenergin kan uppnås vid ombyggnad av äldre ventilationssystem till FTX-system. Studien visade att de boende i husen upplevde ett bättre inneklimat, i jämförelse med de som bodde i samma område med äldre ventilationssystem som inte hade uppdaterats. Detta innebär att ett byte till FTX-system sänker kostnaden för köpt energi, men det finns även andra mervärden utöver den rena energibesparingen som boende och fastighetsägare skulle uppskatta. Det vill säga, renare luft, förbättrat inneklimat och tystare lägenhet (Kristoffersson et al., 2017).

3.3 Värmeåtervinning med FX

I studien utförd Doodoo et al. (2011) undersöktes effekten av värmeåtervinning på frånluftsvärmepump, resultatet visade att den primära energianvändningen kunde minska med denna typ av installation. Däremot nämndes hur risken av ökat energiåtgång kan finnas då ventilationssystemet kan öka elbehovet i byggnaden. Forskningen utfördes för ett svenskt passivhus och resultatet kan bero mycket på husets energiåtgång, husets design och

geografiska förutsättningar. Ett positivt resultat genom värmeåtervinning är således starkt beroende av husets typ av värmeförsörjningssystem, byggnadens lufttäthet och elen som används för värmeåtervinningssystem (Dodoo et al., 2011).

Myhren, Olofsson och Bergdahl (2013) utförde en forskning i avsikt att belysa möjligheter för frånluftvärmepump (FX) vid renovering för att nå sänkningar av energianvändning. Forskningen visade att energibesparing hamnade på 5 kWh/m² vid installation av frånluftvärmepumpar med lågtemperatursradiator. Med detta menas att energianvändningen sänktes med 33% vid investering i systemet. Studien påpekade att FX-ventilation med lågtemperatur-tilluftradiator inte kunde täcka bostadens hela energibehov, vilket innebär att frånluftvärmepump är en begränsad värmekälla och måste kompletteras med en annan värmeproduktion (Myhren et al., 2013).

3.4 Jämförelser av FX- och FTX-system

FTX-systemet (mechanical supply and exhaust ventilation with heat recovery) och frånluftvärmepump, FX (exhaust ventilation with exhaust air heat pump) är två alternativ för att förbättra inomhusluften och öka energieffektiviteten hos byggnader i kalla geografiska områden.

Thalfeldt et al. (2017) utförde en studie vars syfte var att ta reda på vilket ventilationsalternativ, mellan FX- och FTX-ventilation som är det mest energieffektiva ur både miljö- och kostnadssynpunkt. Referensbyggnaden i forskningen var ett hus byggt under perioden 1960-1990, beläget i f.d. Sovjetområdet och med en yta på 2968 m². Frånluftsvärmepumpen eliminerade i princip fjärrvärmekonsumtionen i huset, speciellt under sommarperioden. FX-systemet täckte cirka 60 % av areans värmebehov. FTX kunde presentera en mycket jämnare fjärrvärmebaserad energitillförsel till huset under det undersökta året och fungerade bättre då huset är välisolerat och otätheter är reducerade. Med temperaturer från 2016, visade slutresultatet av studien att FTX kostade ungefär 25 € mer per m² av den uppvärmda arean. FTX-systemet krävde även högre investeringskostnader än FX-ventilation, FTX-systemet erfordrar mer omfattande konstruktioner vid installationen och renovering av byggnaden. I studien antogs luftflödet vara lika stort in som ut, inga öppna fönster eller dylikt har tagits hänsyn till. I verkliga fall kan detta vara faktorer som får slutsvaret av studien att skilja. Den minimala ventilationstemperaturen sattes till 4°C i denna studie.

I BeBos teknikupphandling, *Värmeåtervinningssystem i befintliga flerbostadshus*, var syftet att initiera utveckling av energieffektivisering i befintliga flerbostadshus. Två ventilationsalternativ undersöktes och demonstrerades inför upprustning som kommer behövas i flera befintliga byggnader. Det ena var en kondenserande värmepumpsteknik (FX) och den andra var ett till- och frånluftssystem (FTX). Resultatet av upphandlingen visade att båda systemen har bra värmeåtervinning, men fortfarande stor potential för förbättring samt utveckling av kostnad- och energieffektivitet (Bebo, 2014). Däremot kunde undersökningen inte visa vilket system som var bättre för att både systemen har olika fördelar och nackdelar gällande ekonomi, energianvändning och inomhusklimat. Med detta menas att det är viktigt

att titta på byggnadens förutsättningar vid val av värmeåtervinning innan man bestämmer sig eftersom systemlösningarna kan passa för olika byggnader beroende på vilka egenskaper som ska prioriteras (Bebo, 2014).

Vidare hade Energimyndighetens undersökning visat att två av de fyra byggnader som hade en frånluft värmepump (FX) klarade uppställda krav på energieffektivisering men ingen av byggnaderna kunde klara utlovad energiprestanda. Två av de tre analyserade byggnaderna som hade ett FTX-system kunde klara uppställda krav på energieffektivisering.

Enligt undersökningen utförd av Bebo visade inneklimatenkät inga tendenser till problem i respektive system, det vill säga både värmepumpar och FTX kan ge ett tillfredställande inomhusklimat systemlösning. Dock har FTX en fördel då den tillför byggnader förvärmad, filtrerad och ren luft, detta ger förutsättningar till ett förbättrat inomhusklimat i jämförelse med FX-system där luft släpps in via fläktar och luftinsläpp i väggen. Rapporten visar även att det finns ett stort behov av att vidare utveckla reglerstrategier för avfrostning i avsikt att få en mer effektiv värmeåtervinning utan att eftervärmare ska behöva användas (Bebo, 2014).

3.5 Temperaturverkningsgrad

Värmeåtervinningssystem kan göra det möjligt för ett ventilationsaggregat att uppnå en temperaturverkningsgrad på 90 % i vissa fall, roterande värmeväxlare är den som uppvisat högst verkningsgrader (Cuce & Cuce, 2017). I studien på de Lettländska byggnaderna med FTX-ventilation uppvisades under den mätta perioden att temperaturverkningsgraden på tilluftsidans minsta värde uppgå till 71% och maximalt uppnåddes 86%. Forskningen visade att en faktor som påverkade temperaturverkningsgraden väldigt mycket var utomhustemperaturen. Förutsättningarna vid forskningens referenspunkt var en genomsnittlig utetemperatur på +3,6 °C, den lägsta temperaturen var -6,9 °C och den högsta +14,8 °C. Den högsta verkningsgraden uppmättes under de varmaste dagarna av mätperioden och den lägsta verkningsgraden blev uppmätt de kallaste nätterna i perioden (Kamendere et al., 2015).

En bidragande faktor till sänkt temperaturverkningsgrad kan vara obalans i ingående och utgående luftflöde. I studien utförd av Kamendere et al. (2015) uppmättes inflödet till större än utflödet. Inflödet och utflödet i bostäderna hade en differens på 30%, orsaken till detta kan ha varit ventilationens filter som varit för smutsiga. I studiens slutsats rekommenderades ett högt inflöde av luft, för att kunna ventilera byggnaden tillräckligt och att hålla koll på inflöde och utflöde så de är ungefär lika stora för en ökad verkningsgrad.

I en studie framförd av Nilsson och Olsson (2014) nämns det att det är dags att införa en energiverkningsgrad för luftvärmväxlare, detta i och med att den aktuellt redovisade temperaturverkningsgraden inte redovisar den uppmätta prestandan med ett korrekt värde. Idag redovisas enbart temperaturverkningsgraden av aggregatleverantörerna, Nilsson och Olsson anser att kraven för redovisningen borde höjas på grund av att det kan leda till juridiska och ekonomiska åtaganden. Idag redogör leverantörerna värmeväxlarens prestanda endast genom en temperaturverkningsgrad på torr luft, vilket inte stämmer överens med

verkligheten då luftfuktigheten kan vara väldigt hög och betydande. Däremot påverkas energiverkningsgraden av uteklimatet, frånluftens temperatur och frånluftens fuktighet, därför anses energiverkningsgraden vara ett ärligare mått på aggregatets verkliga prestanda (Nilsson & Olsson, 2014). Beräkningen av temperaturverkningsgraden görs med följande formel:

$$\eta_{tilluft} = \frac{T_{till} - T_{ute}}{T_{från} - T_{ute}}$$

Ventilationssystemen som behandlas i rapporten ska förhålla sig enligt BeBos utgivna kravspecifikationsrapporter. I dessa beskrivs vilka krav ventilationerna har, för FTX-system gäller följande: temperaturverkningsgraden ska vara minst 80% och årstemperaturverkningsgraden för FTX ska minst ligga på 75%.

3.6 CO² utsläpp

Eftersom energianvändningen inom byggnadssektorn för uppvärmning och kylning står för mer än 30 % av växthusgasutsläppen i välfärdsländer och på grund av (Cuce & Cuce, 2017) oro för användning av fossila bränslen samt hållbarhetsfrågan måste energikälla hittas i avsikt att möta energiförsörjningen inom den höga energiförbrukningens sektorn. Genom att förnyelsebara energikällor såsom frånluftvärmepumpar användas kan enorma mängder fossila bränslen sparas (Lohani & Schmidt, 2009). Utsläppen beror mest på elnätet och kraftverkets energiproduktion och bränslen (Thalfeldt et al., 2017).

3.7 Ventilationssystem kombinerat med fjärrvärme

FX-systemets negativa inverkan på fjärrvärmesystem sker genom att returtemperaturen ökas och fjärrvärme konsumtionen blir minimal under sommarperioden. Då fjärrvärmens returtemperatur ökar minskas verkningsgraden i kraftvärmeverk och detta gör även att värmeförlusterna i fjärrvärmesystemen ökar. Det är av denna anledning som det önskas låga returtemperaturer i fjärrvärmenätverk, speciellt i nya nätverk. Thalfeldt et al. (2017) visade i deras studie att FTX-system var ett bättre alternativ ur fjärrvärmens synpunkt. Systemet hade de lägsta returtemperaturerna och den mest stabila energikonsumtionen i huset. Studier som denna påvisar att ventilationsåtervinning resulterat i dålig prestanda för fjärrvärmen.

Att introducera en lågtemperatur uppvärmning och en elektrisk varmvattenproduktion i kombination med FX-system skulle kunna vara en lämplig lösning för 4:e generationens fjärrvärme. Den uppnådda effektiviteten och koldioxidutsläppen av anläggningen beror på fjärrvärmesystemet som används och hur mycket FX-system används (Thalfeldt et al., 2017).

3.8 Beslut om åtgärder för energibesparing

Då en fastighetsägare ska ta beslutet att göra en energibesparande investering kan den följa principen att kolla den årliga kapitalkostnaden för investeringen och jämföra denna med värdet av den årliga energibesparingen. Då besparingssumman per år är högre än investeringens årskostnad kan åtgärden vara lönsam att utföra (Abel & Elmroth, 2008). En annan princip som många fastighetsägare går efter är att undersöka åtgärdens ekonomiska sida genom att se hur den tillfälliga ekonomiska situationen ser ut, hur finansieringen ska ske etc. Om investeringen uppfyller lönsamhetskriterium genomförs den. För att kunna använda en lönsamhetsberäkning som underlag för ett investeringsbeslut är det en förutsättning att veta kalkylräntan och att ha antagit en framtida energiprisökning (Abel & Elmroth, 2008).

Enligt Jonsson och Karlsson (2014), som utfört en av rapporterna för Bebo, anses en ekonomisk kalkyl för ett teoretiskt projekt vara onödigt då kostnadsresultaten är långt ifrån vad det egentligen kommer kosta. Kostnadsförutsättningar är långt ifrån allmängiltiga och fjärrvärme- och elnätsbolagen har stor påverkan på hur lönsam en energiåtgärds kostnad blir. Därmed påverkar det även i vilken kommun byggnaden ligger i. Den geografiska placeringen har betydelse då fjärrvärmeleverantörer och nätägare har olika taxekostnader över landet. Vissa leverantörer har fasta priser, vissa har infört rörliga priser och andra har både en fast kostnadsdel och en rörlig del. Många leverantörer har säsongsdifferentiering i sina priser, där priset är lågt när efterfrågan är låg under varmare delen av året och priset är högt då efterfrågan ökar. Det högsta effektvärdet under den kallaste perioden avgör även effektpriset för byggnaden. Skillnaden i pris beror mest på hur fjärrvärmen är producerad, samt om det finns kraftvärme tillgängligt. Lönsamheten för en investering i energieffektivisering påverkas därför av hur taxemodellen är uppbyggd (Bebo, 2014). Fjärrvärmepriset och elpriset per kWh skiljer sig, speciellt under sommarperioden då fjärrvärmepriset kan bli mellan tre till fem gånger billigare än elen. För att det ska löna sig att använda frånluftsvärmepumpen i detta fall ska värmefaktorn vara högre än prisskillnaden. Värmefaktorn för värmeproduktionen ligger vanligtvis omkring 3-5 medan den för varmvattenproduktionen ligger mellan 2,5 och 2,7 (Bergqvist, 2018).

4 AKTUELL STUDIE

4.1 Referens objekt

Den utförda energiberäkningsmodellen för ventilationssystemen är realiserad för en fiktiv byggnad som tänks ha samma förutsättningar som den undersökta byggnaden i rapporten *Ett hus fem möjligheter*, som är en studie utarbetad av Roland Jonsson och Emma Karlsson på WSP (2014). Projektet *Ett hus fem möjligheter* sammanställer en överblick över möjliga energieffektiviseringar för denna byggnad från miljonprogramstiden.

Byggnaden har teoretiskt placerats i de fyra städerna Kiruna, Stockholm, Ystad och Örebro. Byggnadsåret för byggnaden är 1970 och är ett typiskt miljonprogramshus med 6 trapphus och totalt 36 lägenheter. Beskrivningen av byggnaden finns sammanfattad i tabellerna nedan:

Tabell 1 Byggnadsbeskrivning

Antal lägenheter	36
Antal våningar	3
Antal källarvåningar	1
Antal trapphus	6
Antal hissar	0
Antal tvättstugor i byggnad	2
Area A_{temp} , m ²	2874

Specifikationer gällande byggnadstekniken och energiförbrukningen för huset är sammanfattade i tabell 2 och 3.

Tabell 2 Byggnadsteknik

Stomme	Betong	Värde
Vindsbjälklag	140 mm betong, 100 mineralullsmatta	0,38 W/m ² K
Fönster	1+1 glas	2,8 W/m ² K
Balkonger	Indragna	
Yttervägg 1	300 mm lättbetong, luftad fasadskiva	0,40 W/m ² K
Yttervägg 2	200 mm lättbetong, 120 oluftat tegel	0,51 W/m ² K
Yttervägg 3	150 mm reglar + mineralull, luftad fasadskiva	0,30 W/m ² K
Källarvägg	30 mm träullsmatta, 300 mm betong	1,36 W/m ² K
Källarbjälklag	300 mm betong	0,26 W/m ² K

Tabell 3 Husets energianvändning

Ventilation	Frånluftsventilation med ventilationsflöde på 1850 l/s
Uppvärmning	Fjärrvärme, radiatorer 65°C-50°C, inomhustemperatur 22°C

Tappvarmvatten	Fjärrvärmväxlare
Undercentral	Fjärrvärmväxlare

Uppmätt energianvändning

Uppvärmning	114 kWh/m ²
Tappvarmvatten	40 kWh/m ²
Totalt	154 kWh/m ²

(Bebo, 2014)

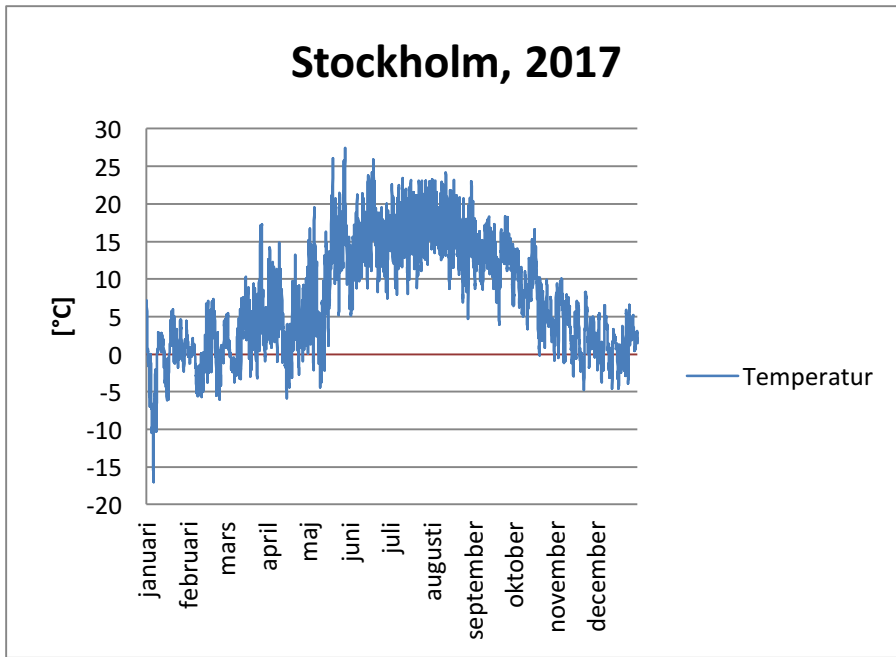
Byggnaden har ett uppvärmningsbehov från att utomhustemperaturen är 17 °C eller kallare. Luftflödet på 1850 l/s anses teoretiskt vara för hög, därmed är byggnaden överventilerad. Luftflödet motsvarar ungefär 0,43 l/s,m² och är uppmätt vid OVK-besiktning enligt Jonsson och Karlsson (2014).

I denna studie antas inomhustemperaturen vara 21 °C, vilket skiljer från projektet Ett hus fem möjligheters inomhustemperatur som var 22 °C. Enligt Sveby är 21°C en lämplig inomhustemperatur för lokaler och bostäder (Sveby.org, 2018).

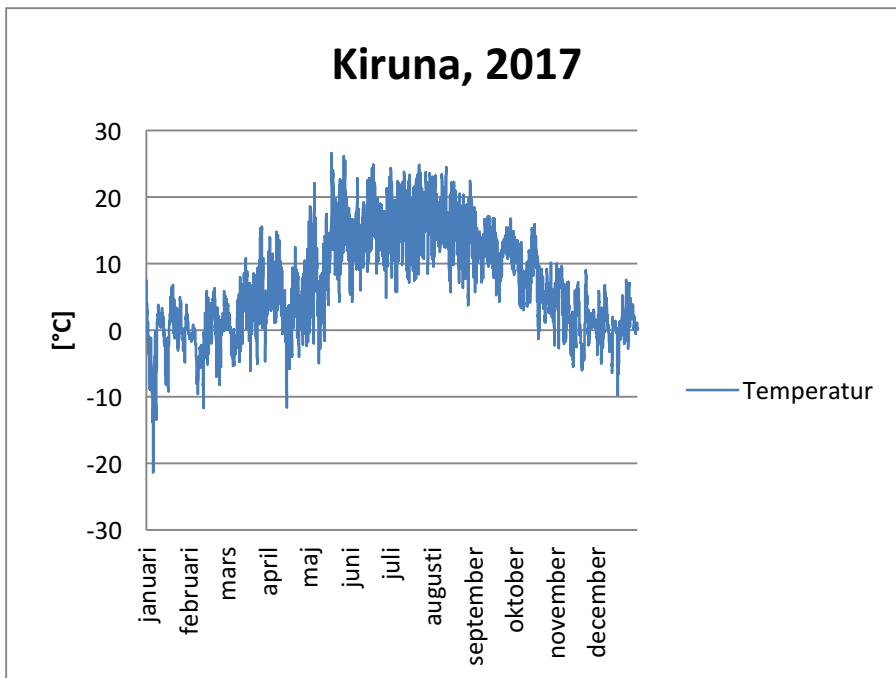
Detta projekt är ett helt teoretiskt projekt, alla beräkningar och lösningar är fristående från enskilda leverantörer.

4.2 Geografisk placering och klimatdata

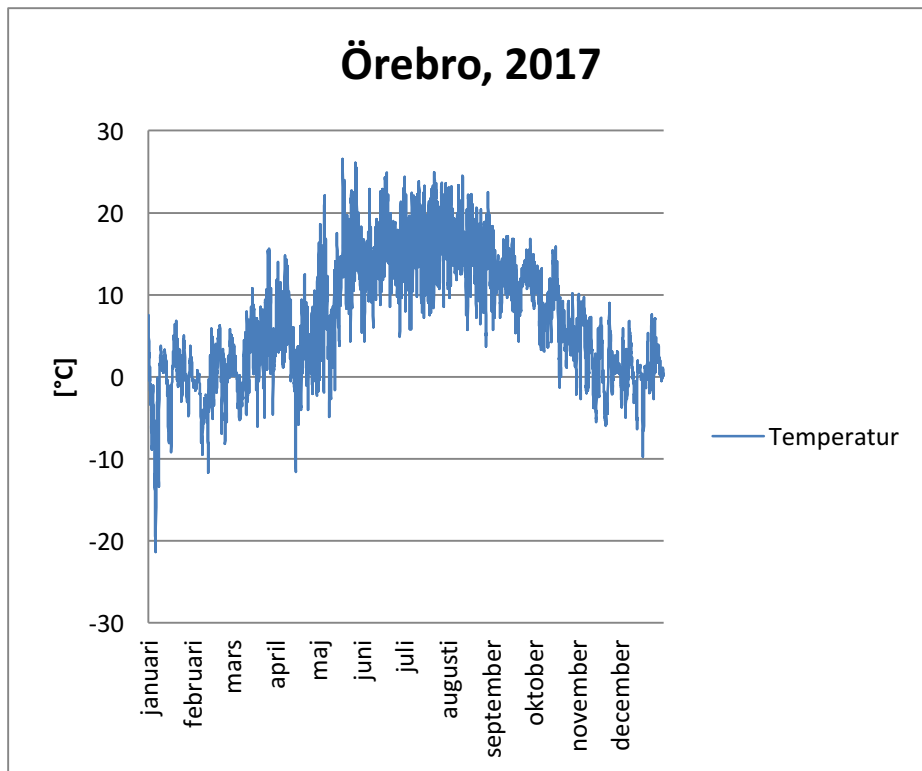
SMHI har i samarbete med Sveby tagit fram klimatdata för elva olika städer i Sverige. Beräkningarna har baserats på klimatdatafilerna som hämtats från Svebys hemsida och innehåller data med temperaturen och relativ fuktighetsgrad för varje timme under år 2017. Temperaturer är tagna för städerna Stockholm, Kiruna, Ystad och Örebro för att jämföra hur städernas klimat påverkar aggregatets energiåtgång. Genom att ta städer från både norra, mellersta och södra Sverige kan undersökningen ge svar om hur fuktigheten i luften och temperaturen påverkar aggregatets användning. Temperaturvariationen för de undersökta städerna är redovisad i diagrammen nedan:



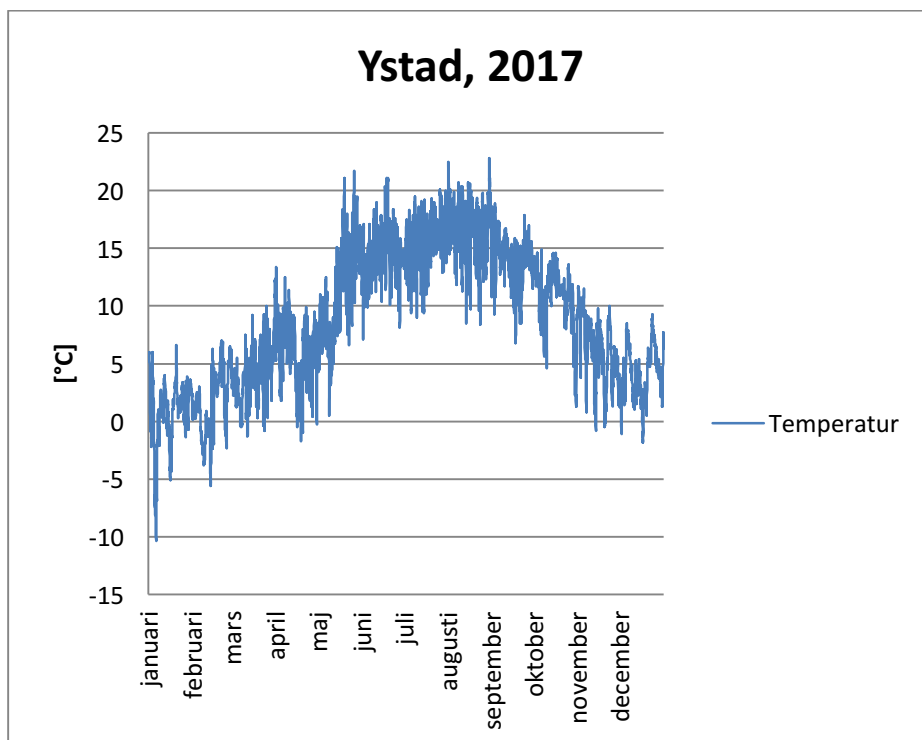
Figur 4 Temperatur Stockholm



Figur 5 Temperatur Kiruna



Figur 6 Temperatur Örebro



Figur 7 Temperatur Ystad

Driftkostnaderna per kommun ser olika ut och lönsamheten påverkas därför även på så sätt av byggnadens geografiska placering. Uppvärmningskostnaderna varierar beroende på kommun, el- och fjärrvärmebolag och inverkar därmed på lönsamheten i ventilationsinvesteringen.

4.3 Koppling

Vanligtvis används enbart fjärrvärme som värmekälla i hus som är försedda med FTX-system. El behövs enbart till systemets fläktar och pumpar. En frånluftsvärmepump drivs, till skillnad från FTX, av el. Återvunnen värmeenergi från pumpen brukar användas till varmvatten och till att höja returtemperaturer från element till fjärrvärmenätet. I en byggnad med FX-system används därför fjärrvärme endast som spetsenergi när frånluftsvärmepumpens energi inte räcker till (Bergqvist, 2018).

På grund av att flera inkopplade system ökar komplexiteten av beräkningarna har både ventilationssystemen antagits bidra som värmekälla till husen men är inte kopplade till TVV eller VVC för byggnaden.

4.4 Fukttillskott i inomhusluft

Människor och deras aktiviteter såsom dusch, torkning av tvätt, matlagning, städning, disk och ytterligare andra aktiviteter leder till fukttillskott i inomhus luft. Det innebär att boendevanor har stor betydelse för hur mycket fukt tillförs inomhus luft. Den dominerande andel fukthalt måste tas hand om med hjälp av ventilation i avsikt att luftfuktigheten i rummet ska inte bli för hög. Fukttillskott inomhus ska uppgå till mellan 2-4 g/m³ vid normala förhållanden, vilket innebär att fukthalten inomhus luft är 2-4 g/m³ kommer att vara högre än utomhus. Storleken på ventilation avgör hur mycket vattenånga som kan transporteras bort. Vid högre än 4 g/m³ fukttillskott inomhus luft tyder på att antingen fukttillskottet är avsevärt högre än vad som förutsätts eller ventilationen är för liten för att klara av att bortföra fukten (Abel & Elmroth, 2008).

4.4.1 Vatteninnehåll (Absolut fuktighet, x)

Vatteninnehållet i luften är uppmätt i kilogram vatten per kilogram luft. Luft kan ses som en blandning av torr luft och vattenånga. Luften kan bara bära vattenånga fram tills den når mätnadsgränsen som beror på luftens temperatur och tryck. Lufttillskottet ökar luftens vatteninnehåll inomhus. Då luften kyls avger den kondensvatten, detta sker i ventilationsaggregat då luften kyls och vatten avges (Fläktwoods, 2009).

I Sveriges uteluft kan den absoluta luftfuktigheten variera mellan 1-14 gram vatten per kg luft, vanligast är att vatteninnehållet ligger omkring 3-10 gram per kg luft (byggnadsstyrelsen, 1983).

4.4.2 Relativ fuktighet

Relativ fuktighet är ett procentmått på andelen vattenånga i förhållande till den högsta möjliga mängden vattenånga vid temperaturen i fråga. Måttet är alltså kvoten mellan vattenångans partiella tryck vid det aktuella fallet och vattenångans partiella tryck vid mätnadstillståndet. Den relativa luftfuktigheten bör optimalt vara mellan 30 och 65 procent.

Det vill säga, risk för fuktskador, kvalster och mögel ökas vid mycket högre relativfuktighet vilket inte är önskvärt (Energimyndigheten, 2011).

4.5 Beräkning av effektbehov och energianvändning

WSP Stockholm har bidragit med antaganden och värden som varit nödvändiga för beräkningen, dessa är beskrivna i detta stycke. Då den önskade inomhustemperaturen ska vara konstant hela året sätts frånluftstemperaturen sätts till 21 grader.

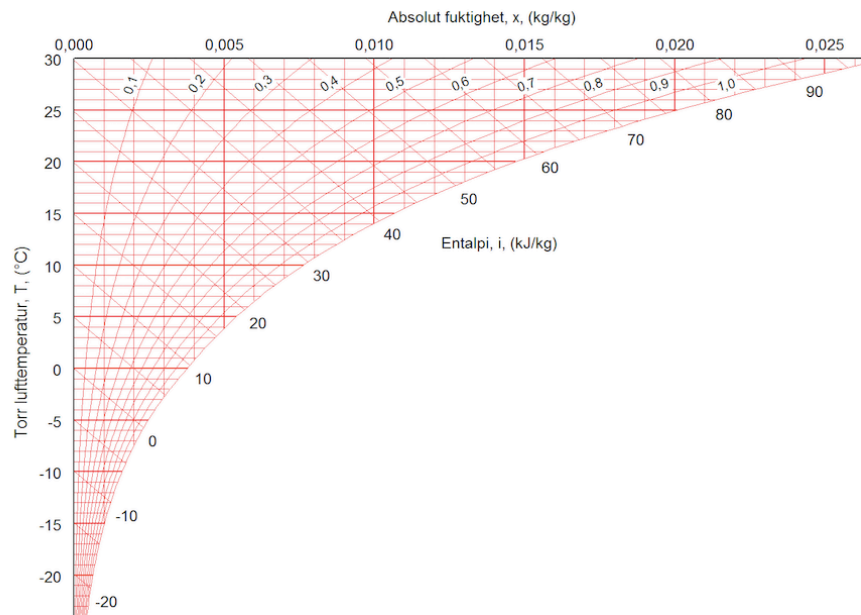
Temperaturverkningsgraden har införts som en variabel i beräkningsbladet, detta för att kunna få ut värden som motsvarar olika ventilationssystem med varierande temperaturverkningsgrader. Uppfuktningen i hemmet sätts till 2 gram i beräkningarna, luftflödet i byggnaden antas vara 1 m³/s, med ett ventilationskrav på minst 0,35 l/s, m². Enligt boverkets byggregler [BBR] (2015:3) ska ventilationssystem utformas för att hålla ett uteluftsflöde på 0,35 l/s per m² golvarea.

Luftflödet på 1 m³/s passar för en byggnad med arean 2857, arean motsvarar cirka 20 lägenheter. Arean för vilken luftflödet är anpassat beräknas enligt nedanstående:

$$\frac{\text{Önskat luftflöde}}{\text{Ventilationskrav}} = \frac{1000 \text{ l/s}}{0,35 \text{ l/sm}^2} = \text{Ventilerad area} \qquad \text{Ekvation 1}$$

4.5.1 Mollier diagram

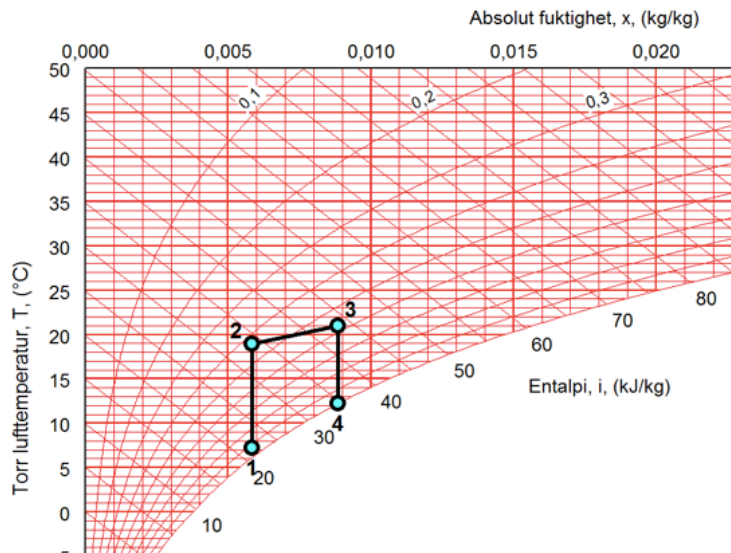
Mollierdiagrammet används för att redovisa ventilationsprocessen. Det används för att beräkna fuktighetsförändringen, temperaturen, entalpiförändringen och även effektbehovet för uppvärmning samt kylning av luften. Varje nytt tillstånd i processen beskrivs som en ny punkt med nya luftegenskaper (Fläktwoods, 2009).



Figur 8 Mollier diagram

Värminingsprocessen kan ritas som ett vertikalt streck i Mollierdiagrammet från en lägre temperatur till en högre önskad inomhustemperatur. Vatteninnehållet ändras inte under denna process utan uppfuktning av luften sker inomhus genom människors inomhusaktiviteter. Det upptagna fuktillskottet i ångform redovisas i den horisontella förändringen av diagrammet. Kylningsprocessen ritas också som ett vertikalt streck nedåt, från varm temperatur till en kallare utomhustemperatur. Luften kyls ner till en temperatur som troligtvis ligger under daggpunkten, därmed kondenseras vatten ut från aggregatet (Fläktwoods, 2009).

Ventilationsprocessen utgörs av olika steg där varje uppnått tillstånd är numrerat i Mollierdiagrammet. Steg 1 är utomhusluften innan den går in i aggregatet. Steg 2 är tilluften som kommer in till lägenheten, vid steg 3 har luften i hemmet samlat upp fukt från exempelvis matlagning och dusch och behöver därmed bytas ut. Steg 4 i processen är den luft som skickats ut igen från hemmet via aggregatet.



Figur 9 Tillståndsförändring i Mollier diagram

Med hjälp av den givna utetemperaturen och relativa fuktighet i luften vid varje timme samt användning av följande formler beräknades mängden vatten i luften (x).

$$P_{Sat} = 610,78 \cdot e^{\frac{T}{(T+238,3)} \cdot 17,2694} \quad \text{Ekvation 2}$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_{Sat}} \Rightarrow 0 \leq \phi \leq 100 \quad \text{Ekvation 3}$$

$$x = 0,62 \cdot 10^{-5} \cdot P_{Vatten} \quad \text{Ekvation 4}$$

P_{Sat} : Mättnadstryck

ϕ : Relativ fuktighet

m_v : Faktisk vattenmängd

m_g : Maximal vattenmängd

P_v : Vattnets partialtryck

X : Vatteninnehåll

Konstant totalt tryck antogs för beräkningarna av fuktig luftmassa i samtliga städer, vilket innebär att vatten i vätskeform kommer att utfällas vid daggpunkt när den relativa fuktigheten ligger på 100 %. Luften kyls med ett konstant vatteninnehåll.

$$T_{dp} = \left(\frac{4026}{16,64 - \ln P_v} - 235 \right) \quad (\phi = 100\%) \quad \text{Ekvation 5}$$

I och med att uteluften aldrig är helt torr så måste hänsyn tas till vattenmängden vid utförandet av energiberäkningar. Följande formel gäller för att finna entalpi vid fuktig luft (vatten endast i gasform):

$$h = 1,006 \cdot T + X(2501 + 1,84T) \quad \text{Ekvation 6}$$

T_{dp} : Temperatur vid daggpunkt

h : Entalpi

Värmebehovet delas in i två delar, vilket är den energimängden som går åt i ventilationssystem via frånluften för att värma upp ute temperaturen och den som värmesystemet avges vid värmeåtervinning. För att beräkna värmebehovet finns det flera olika metoder att tillämpa, allt från avancerade datorberäkningsmetoder till enkla handberäkningsmetoder. För varje steg i processen beräknas den tillförda effekten vid uppvärmningsstadiet och den återvunna energin vid kylningsprocessen. Då den kylda luftens sluttemperatur når daggpunktstemperatur eller lägre sätts den relativa luftfuktighetshalten till 100%. Den totala värmeeffekten som tillförs samt utvinns i frånluften räknas ut genom följande formel:

$$Q = (h_1 - h_2) \cdot C_p \cdot \rho \cdot q \quad \text{Ekvation 7}$$

Q : effekt (kW)

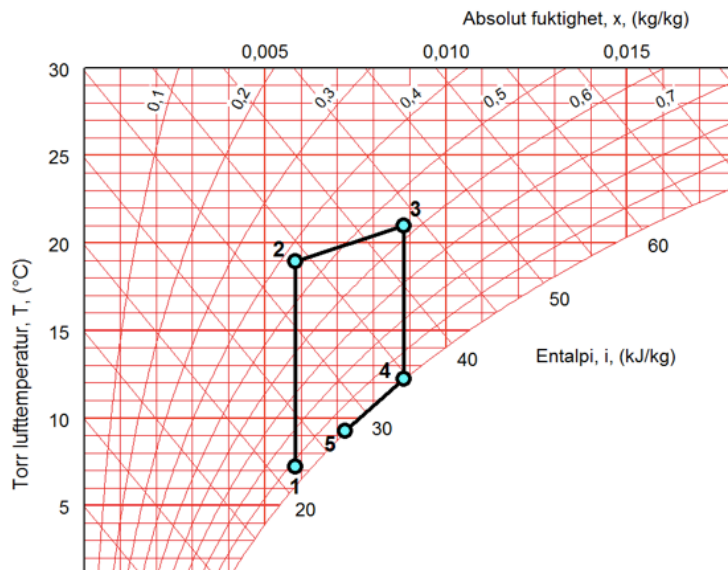
C_p : specifik värmekapacitet för luft

ρ : densitet för luft (kg/m³)

4.5.2 FTX-beräkningsmodell

Alla dagar med temperatur överstigande den önskade inomhustemperaturen (21°C) har försumrats då värmeförsel inte behövs, dagar med negativa temperaturer har en nedkylning fram till 0°C. I beräkningen tas det hänsyn till att kylningen aldrig går längre ner än 0°C då påfrysning vid aggregatet sker vid en kallare kylning av luften.

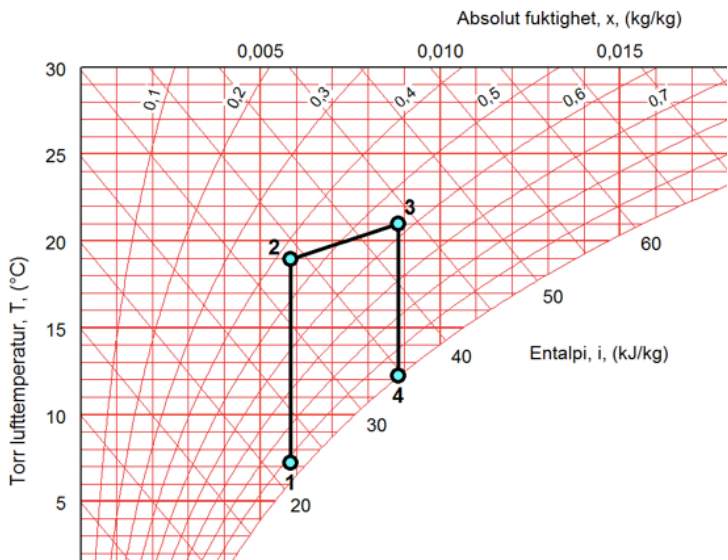
I FTX-beräkningen kyls temperaturen i punkt fyra och där två utfall måste beaktas, det ena är att punkt fyra inte når daggpunkt och att den utskickade luften kyls till önskad temperatur. Det andra fallet är att daggpunkten nås innan kylningsprocessen nått önskad temperatur, i dessa fall har punkt 5 lagts till. Punkt 5 redovisar den slutliga temperaturen som uppnås efter att daggpunkt passerats. Kylningen sker som tidigare nämnt maximalt till 0°C.



Figur 10 Tillståndsförändring i Mollier diagram

4.5.3 FX-beräkningsmodell

Till skillnad från FTX-systemet behöver tilluften i ett FX-system inte värmas upp på samma sätt i aggregatet, ny frisk luft släpps in via tilluftsdon. Detta medför att endast kylningen beräknats vilket är från punkt 3 i Mollier diagrammet. Vid kylprocessen är det som skiljer sig att sluttemperaturen för kylningen alltid når 2°C, oberoende vilken den aktuella utetemperaturen är. Även i denna beräkningsmodell kan kylningssteget se ut på två olika sätt, det ena fallet är då kylningen till den önskade temperaturen på 2°C nås utan att passera daggpunkt. Denna punkt utgör punkt 4, presenterad i bilden nedan.



Figur 11 Tillståndsförändring i Mollierdiagram

Vid det andra fallet kan daggpunkten ligga på varmare temperatur än önskade 2 °C och kylningen fortsätter längs kondenseringskurvan fram tills den når 2°C. Denna punkt blir då kallad punkt 5.

Vid utförandet av beräkningarna har hänsyn inte tagits till fastighetselen och eventuella luftläckage i fastigheten har försumrats. I beräkningsmodellen beräknas vilken eleffekt som behövs för att täcka värmebehovet i huset. Uppvärmningsbehovet för den utvalda byggnaden antas vara den som framgår av Bebos rapport Ett hus fem möjligheter, den används som utgångspunkt i den utförda beräkningsmodellen uppgår till 114 kWh/ m², år. Det totala värmebehovet för huset har sedan beräknats och värmepumpens kapacitet har kunnat tas fram. Totala värmebehovet beräknades för ett helt år genom att multiplicera uppvärmningseffekten med arean för byggnaden.

$$\text{Totalt värmebehov} = 2857 \cdot 114 = 325714 \text{ kWh/år}$$

I bebos rapport (2014) antas att FX används då utetemperatur inte överstiger 17 °C, därför beräknades antal gradtimmar genom att maximal temperatur på 17 °C subtraheras med medeltemperatur för samtliga städer. Därefter uppskattades behovet per grad genom att ta totala värmebehovet delat med gradtimmarna. Med hjälp av behovet per grad och skillnaden mellan maximal temperatur och utetemperaturen uppskattades värmebehovet för varje timme. Beräkningen redogörs nedan:

$$\text{Gradtimmar} = \frac{17 - \text{medeltemperatur}}{8760}$$

$$\text{Behov per grad} = \frac{325\,714}{\text{gradtimmar}} = \text{kW/grad}$$

$$\text{Värmebehov vid varje timme} = (17 - T_{\text{ute}}) \cdot \text{behov per grad} = \text{kWh}$$

I den skapade beräkningsmodellen har en kalkyl kunnat göras kring hur pass stort energibehov värmepumpen täcker samt hur stor energimängd som måste tillföras genom en annan energikälla, i detta fall fjärrvärme.

4.6 Temperaturverkningsgraden

En värmväxlares förmåga att återvinna värme beskrivs av temperaturverkningsgrad som betecknas med η . Kvoten mellan temperaturskillnaden vid ett visst flöde och den största möjliga temperaturskillnaden mellan de två flödenas inloppstemperatur definierar temperaturverkningsgraden. Temperaturverkningsgraden anges som en konstant för att den beror på material, värmväxlande ytans storlek samt värmeövergångstalet som är på bägge sidor om den värmeförande ytan (Abel & Elmroth, 2008).

Verkningsgrad ligger alltid mellan intervallet 0 till 1, sålunda mellan 0 till 100%, där 100% innebär fullständigt värmeöverföring. Värmväxlaren måste vara ren samt de filter som ingår behöver bytas eller rengöras regelbundet för att en jämn temperaturverkningsgrad skall kunna hållas (Abel & Elmroth, 2008).

Värmväxlarens temperaturverkningsgrad visas i ekvation 8:

$$\eta_{tilluft} = \frac{T_{till-T_{ute}}}{T_{från-T_{ute}}$$

Ekvation 8

4.7 Energibesparing

För att kunna tydliggöra de olika ventilationstypernas uppnådda besparing genom värmeåtervinningen har energiåtgången först beräknats för ett simpelt F-ventilationssystem som inte har någon återvinning alls och där all uppvärmning för huset måste ske med fjärrvärme. Sedan har samma beräkningar gjorts med FTX- och FX-system för att se hur mycket energibehov som kan täckas av ventilationernas värmeåtervinning. Den kvarstående uppvärmningsenergin, som alltså inte täcks av FTX eller FX, försörjs av fjärrvärme.

4.8 Ekonomikalkyl

Vid en investering av ett ventilationssystem är det långsiktiga kostnadsresultatet viktigare än själva huvudkostnaden av systemet och dess installation. Kostnaderna vid användningsfasen av ett ventilationssystem kan uppgå till mycket högre kostnader än själva huvudinvesteringen (Fläktwoods, 2009). Totalkostnaden för investering i ett ventilationssystem innehåller inte bara kostnaden för inköp och montering utan även för drift, underhåll och energianvändning. Det vill säga, 10-15 procent av den totala livscykelkostnaden står för ett vanligt ventilation aggregats inköpspris. Alltså 85-90 procent av den totalkostnaden är för både drift och underhållskostnader (Energimyndigheten, 2011).

I alla slags investeringar görs en bedömning över hur de kan leda till framtida ekonomiska besparingar. För att bedöma om en energiteknisk lösning eller åtgärd har en rimlig följd måste framtida energibesparingar jämföras mot den kostnad som krävs för att åstadkomma dem. På grund av att installationskostnaderna kan vara väldigt varierande beroende på ort, hustyp och andra förutsättningar för byggnaden har ingen investeringskostnad bestämts i detta arbete. Istället har den ekonomiska kalkylen som utförts haft som syfte att tydliggöra för fastighetsägare hur stor en ventilationsinstallation kan vara för att investeringen ska vara lönsam.

Först beräknades uppvärmningskostnaden för ett hus F-system där hela värmebehovet täcks av fjärrvärme. Sedan har beräkningar gjorts för att se hur stora besparingar i fjärrvärmekostnad som kan göras med hjälp av FTX- respektive FX-ventilation. Kostnadsuppgifter som använts vid beräkningar och uppskattning har för Stockholm tagits från Ellevios hemsida, för Kiruna har priser hämtats från tekniska verken, för Ystad från Ystad energi och för Örebro hämtades priser från energileverantören E.on.

I lönsamhetskalkylen beräknas en möjlig brytpunkt för en lönsam investering, kalkylen har genomförts med nuvärdesmetoden. Detta ger den maximala investeringssumman för fastighetsägare för att under aggregatets och lufrörens livslängd kunna få tillbaka investeringens värde. Vid beräkningen har kalkylräntan antagits vara 5 %, vidare antas energiprisökningen vara 2 % per år över konsumentprisindex. Investeringen blir således

lönsam då internräntan överstiger $5\% - 2\% = 3\%$. Med hjälp av internräntan och livslängden för ventilationerna har nuvärdesfaktorn hittats i nuvärdestabellen, som finns bifogad som bilaga 1. . Värdena för procentsatserna samt livslängden för installationerna är tagna från Bebos rapporter och utvärderingar. I tabell 1 visas livslängden för aggregaten, värdena tagna ur nuvärdestabellen samt besparingen i kr/år mot F-system för Stockholm stad.

Tabell 4 Kostnadsbesparing

Aggregattyp	Livslängd	Nuvärdesfaktor	Besparing i kr/år
FTX	40 år	23,1	57250
FX	15 år	11,9	42930

Med hjälp av nuvärdesfaktorn beräknades brytpunkten för lönsam investering för hela byggnaden enligt nedan:

$$\text{FTX: } 57250 \cdot 23,1 = 1\,322\,475 \text{ kr}$$

$$\text{FX: } 42930 \cdot 11,9 = 510\,867 \text{ kr}$$

Lönsamhetsberäkningen är utförd på samma vis för de fyra analyserade städerna. Besparing per år jämförs sedan för de två ventilationstyperna genom att dela den totala besparingen på livslängden för respektive.

4.9 Primärenergifaktor

Primärenergifaktorn är ett mått på hur många kWh bränsle det behövs för att skapa 1 kWh användbar energi till hemmet, exempelvis el. Framöver kräver BBR att hänsyn ska tas till primärenergifaktorn hos energibäraren som för el är 1,85 och för fjärrvärme ligger på 0,95. BBR har satt krav på att elenergi ska användas på ett effektivt sätt för att begränsa effektbehovet. Flera byggtekniska installationer kräver elenergi såsom ventilation, belysning, elvärme, motorer och cirkulationspumpar.

Flerbostadshus ska vara utformade så att primärenergitalet ska vara högst $78 \text{ kWh/m}^2 A_{\text{temp}}$ och år. För att kunna bestämma ett primärenergital för byggnaden behöver hänsyn tas till primärenergifaktorer som är presenterade i tabellen nedan (BBR, 2018):

Tabell 5 Primärenergifaktor

Energibärare	Primärenergifaktor
El	1,85
Fjärrvärme	0,95
Fjärrkyla	0,62
Biobränsle	1,05
Olja	1,11
Gas	1,09

Flerbostadshuset som beräkningarna i denna studie utförts på skulle i nuvarande situationen ha en energiprestanda redovisad under *aktuell energiprestanda* i tabell 6. Efter införandet av primärenergifaktorn kommer energiprestandan uppgå till siffrorna presenterade i tabellen under *total framtida energiprestanda*:

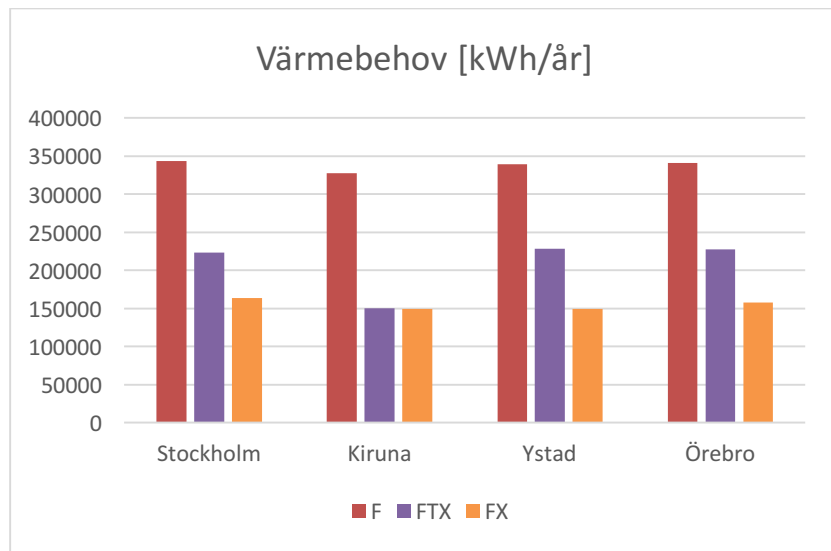
Tabell 6 Framtida energiprestanda

Ventilationstyp	Energibärare	Aktuell energiprestanda	Primärenergifaktor	Total framtida energiprestanda
FTX	Fjärrvärme	223041 kW/år	0,95	211889 kW/år
FX	Fjärrvärme	108160 kW/år	0,95	102752 kW/år
FX	El	55040 kW/år	1,85	101824 kW/år

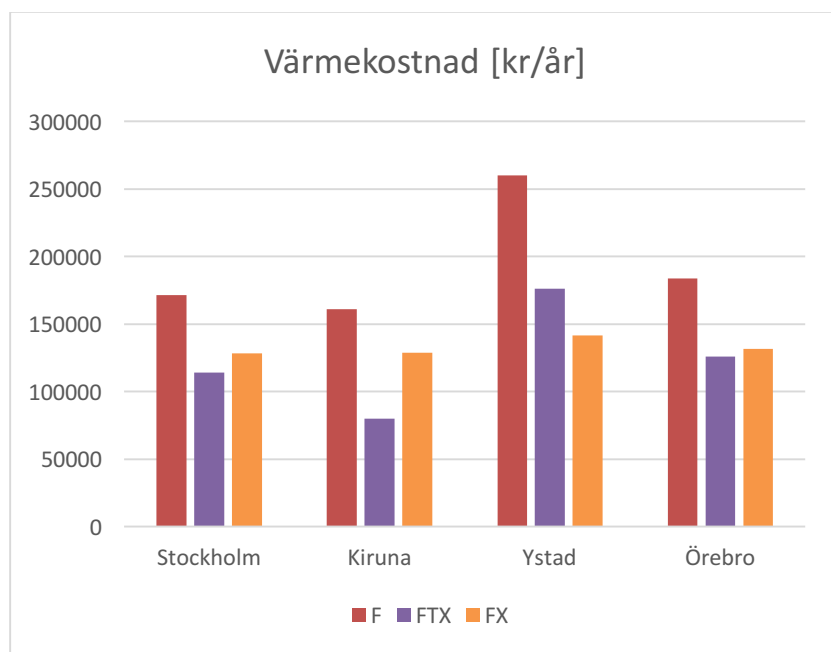
Total framtida energiprestanda beräknas genom att multiplicera primärenergifaktorn med aktuell energiprestanda. Den totala energimängden för FTX-system uppgår till 211 889 kW/år och FX-system når 204 576 kW/år efter uppräkningsfaktor med primärenergifaktorn.

5 RESULTAT

Besparingsmöjligheterna för FTX- och FX-system har jämförts med ett F-system där ingen värmeåtervinning sker. Följande figur redovisar värmebehovet vid användning av simpelt F-system utan värmeåtervinning, med FTX och med FX i de fyra undersökta städerna. I figur 13 presenteras kostnaderna för värmeförseln med respektive system installerat i kombination med fjärrvärme. Med ett F-system täcker fjärrvärme hela värmebehovet, medan återvinningen i de andra systemen minskar det totala behovet av fjärrvärme i byggnaden.



Figur 12 Fjärrvärmebehov i kWh/år

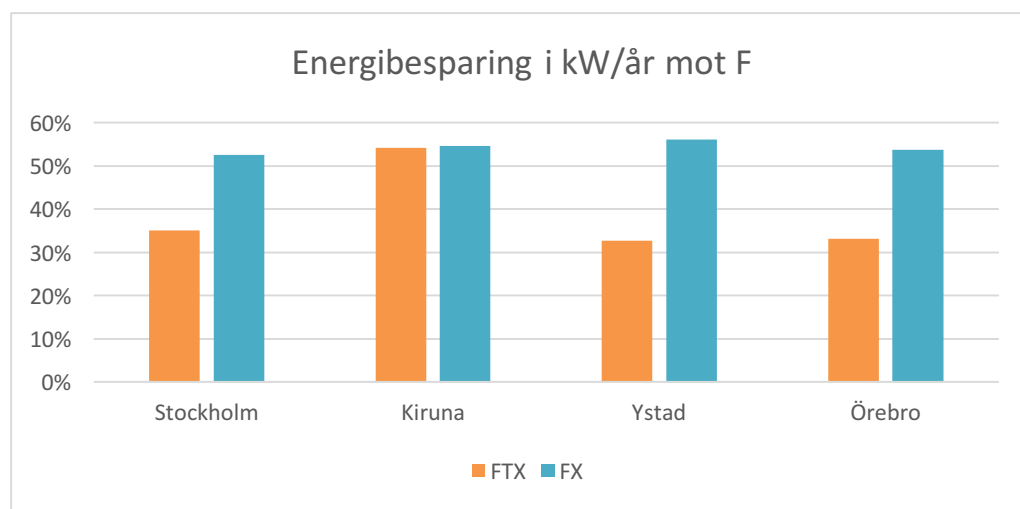


Figur 13 Värmekostnad i kr/år

FX-systemet är det system som kan ge lägst uppvärmningsbehov i de utvalda städerna visar resultaten från beräkningarna, dock minskar skillnaden ju lägre utetemperaturen blir. I Kiruna är skillnaden som minst medan den i Ystad är som störst. Med andra ord blir FX-systemet inte lika lönsamt i kallare klimat. Däremot är energibesparingen som FTX-systemet hämtar i förhållande till F-systemet fortfarande betydande när det gäller minskning av den årliga energiförbrukningen. Se figur 14 för energibesparingen, kostnadsbesparingen för FTX- och FX-system presenteras i figur 15.

Orsaken till varför FX-systemet blir mer lönsamt i varmare klimat när det kommer till energibesparing är att värmepumpens och värmeväxlarens funktion för energiåtervinning skiljer sig åt. Det vill säga att värmepumpens värmeåtervunna mängd är konstant, vilket beror enbart på att den kyler frånluften från rumstemperaturen till 2 °C oavsett utetemperaturen, så länge behov av uppvärmning föreligger. Men ju kallare uteluften är desto mer kan värmeväxlaren återvinna.

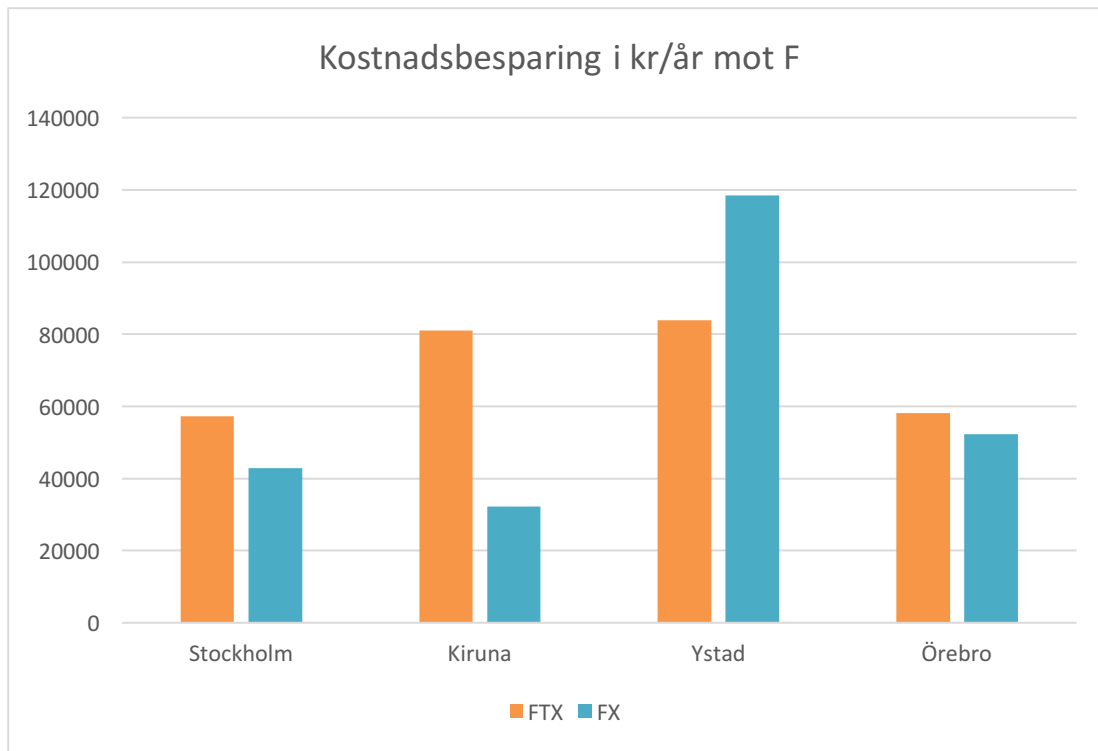
Under år 2017 blir den totala mängden återvunnen värme för FTX och FX cirka 121 MWh/år respektive 180 MWh/år i Stockholm. Motsvarande siffror i Kiruna är 177 och 178 MWh/år. Detta visar att den totala mängden värme som är återvunnen i Stockholm är större i FX-systemet jämfört med FTX-systemet. I och med det är kallare i Kiruna visar beräkningarna att FTX-systemet kan återvinna nästan lika mycket som FX-systemet. Uppvärmningsbehovet är fortfarande högre för FTX, vilket kan ses i figuren nedan.



Figur 14 Energibesparing i kWh/år jämfört mot F-system

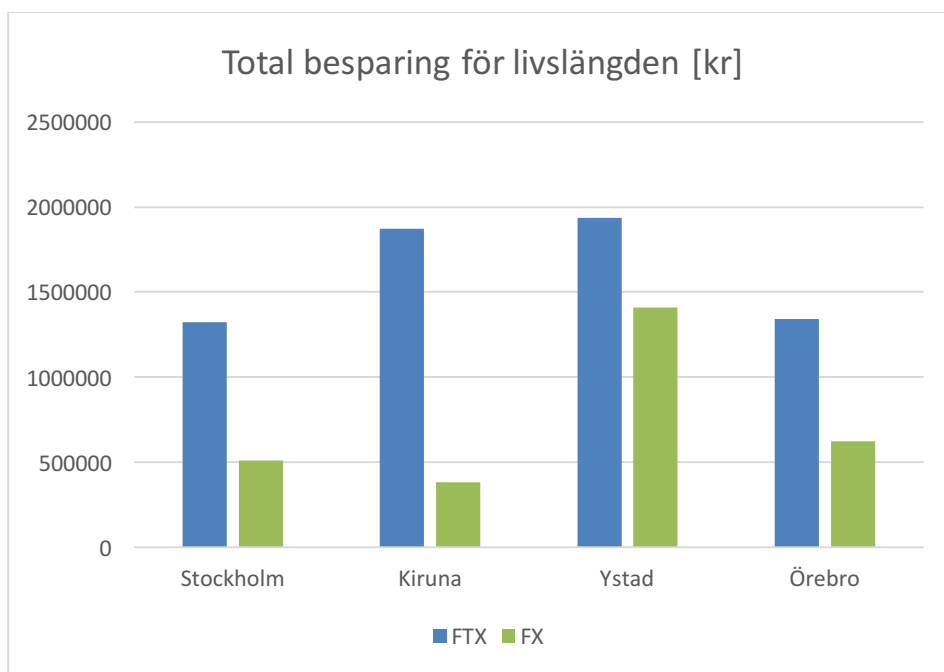
5.1 Ekonomisk analys

I diagrammet nedan visas hur minskningen av uppvärmningskostnaderna ser ut vid ett utbyte av F-ventilation mot FTX- respektive FX-ventilation. Staplarna i diagrammet visar vilka möjliga kostnadsbesparingar varje system hämtar jämfört med ett F-system utan värmeåtervinning. I figur 15 visas hur kostnadsbesparingarna ser ut för varje ort, FTX-lösningen i Ystad är kostsam och i Kiruna är det ett oerhört lönsamt alternativ.



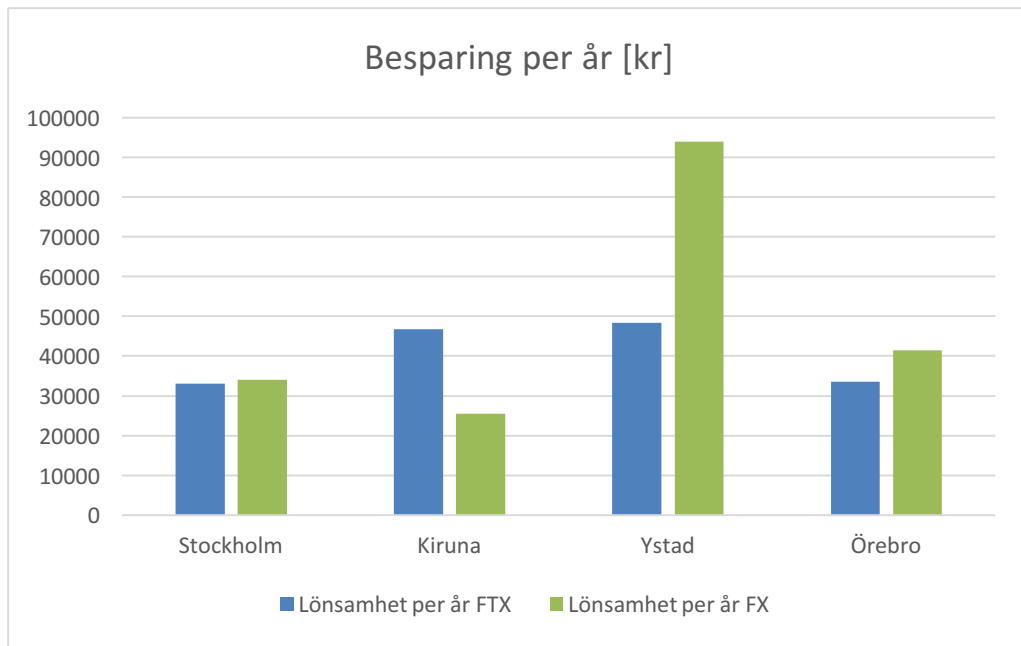
Figur 15 Kostnadsbesparing uppvärmningskostnad i kr/år jämfört mot F-system

Den totala besparingen för aggregaten och installationens totala livslängd presenteras för de fyra städerna i nedanstående diagram:



Figur 16 Total kostnadsbesparing under aggregatens livslängd

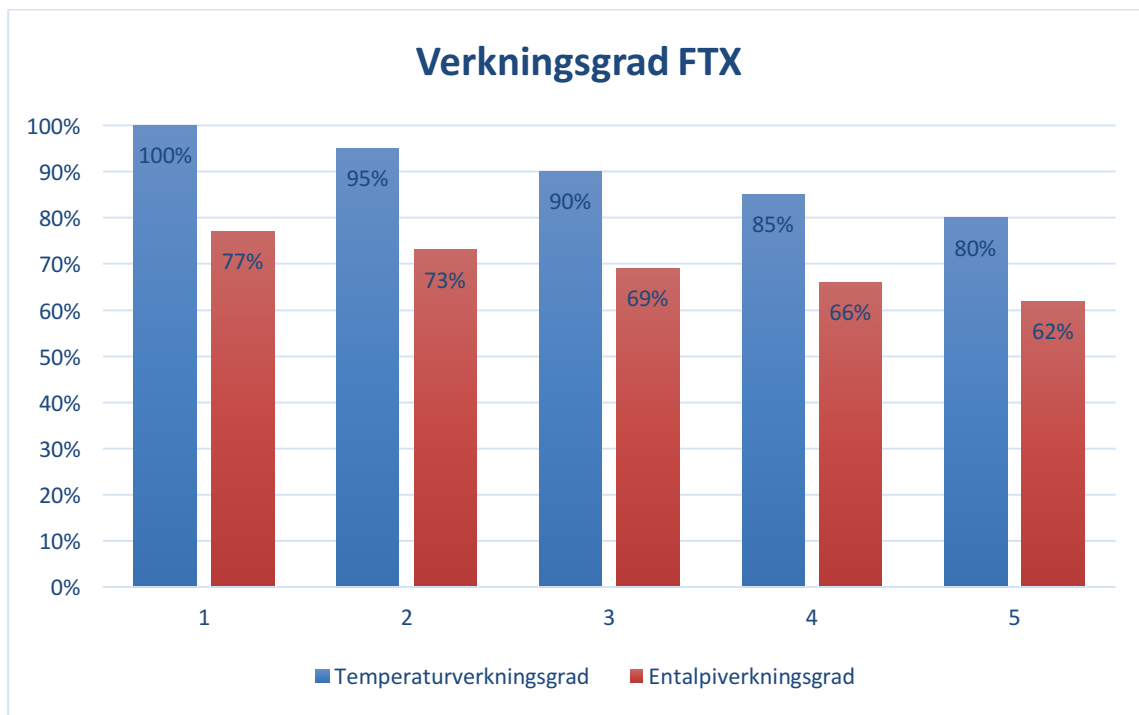
För att redovisa en jämnare likhetsgranskning över hur besparingen ser ut för respektive ventilation har den ovan beräknade besparingen presenterats för varje år istället för hela livslängden. Diagrammet ovan var mer svårtolkat på grund av de olika livslängderna, figur 16 tydliggör den möjliga besparingen för varje år för varje stad:



Figur 17 Kostnadsbesparing per år för respektive aggregat

De erhållna resultaten från jämförelsen av de två ventilationssystemen är presenterade ovan.

Figur 18 visar entalpiverkningsgraden i förhållande till temperaturverkningsgraden för ett FTX-system vid fem olika verkningsgrader. Verkningsgraden i diagrammet har undersökt för Stockholmstemperaturer med 1 gram uppfuktning i byggnaden. Andra analyserade städer uppvisade samma mönster som följande diagram med en aning skiljande siffror.



Figur 18 Verkningsgradsjämförelse för FTX-system

6 DISKUSSION

6.1 Energibesparing

FX-system är den ventilationstyp som ger störst energibesparing, speciellt i södra Sverige. En av anledningarna till att FX-systemet presenterat resultat om högre energibesparing är att den inte lika lätt påverkas av luftläckageförlust som uppstår i byggnader. Det krävs tätare byggnader för att ett FTX-system ska kunna leverera lika bra som ett FX-system vad det gäller energibesparing. Detta påvisar vikten av att förebygga byggnaders otätheter och isoleringar.

I och med att FX-systemet kyler frånluften till 2°C konstant kan FTX-systemet återvinna mer värme då temperaturerna är kallare än 2°C. FTX-systemet kyler ända ner till 0°C vilket gör att mer energi återvinns vid kallare temperaturer.

FTX-systemets prestation beskrivs tydligt genom hur en vanlig värmeväxlares uppvärmnings- och kylningsprocess ser ut, en så kallad Carnot cykel. Generellt för en Carnot cykel gäller att högre temperaturskillnad mellan varmt medium och kallt medium leder till högre verkningsgrad. Vilket i denna studie är den bakliggande förklaringen till varför FTX-systemet ger bäst resultat vid kalla utomhustemperaturer. I Kiruna har utomhustemperaturen skiljt sig mest från de önskade 21°C inomhus, vilket därför resulterat i bäst FTX resultat.

FX-systemets värmefaktor vid varmvattenproduktion är ganska låg och under sommarperioden då fjärrvärmepriserna är mycket lägre än elpriserna blir det mer lönsamt att försörja husets värmebehov med fjärrvärme trots att antalet behövda kWh är större utan frånluftsvärmepumpen.

I jämförelse med FX-system fungerar FTX-system bäst då huset är välisolerat och otätheter är reducerade. Då byggnader med FX-system får in ny luft via luftinsläpp, fläktar och otätheter blir en fördel hos FTX-system att det säkerställer en bra luftkvalitet eftersom tilluften renas med ett filter. Detta medför att filtren måste bytas regelbundet vilket kan medföra en extra kostnad för ett FTX-system.

6.2 Kostnader

FTX-systemet är inte lika elberoende som FX-systemet, vilket innebär att den årliga kostnader för byggnadens energibehov minskar något mer med FTX-system. Detta innebär att elpriset måste vara lågt i förhållande till värmepriiset för att FX-systemets energibesparing ska leda till kostnadsbesparing.

Installationskostnaden är lägre för FX-systemet jämfört med FTX-systemet. Eftersom FTX-systemet har en livslängd på 40 år, till skillnad från FX-systemet som enbart har en livslängd på 15 år, blir skillnaden i installationskostnad mindre påtaglig. Därtill är elpriset idag en osäker faktor och kan öka i framtiden, vilket innebär att FX-systemets kostnadsfördelar,

uppnådda genom energibesparing, kommer att försvinna. FTX-systemets fördelar, lång livslängd, högre årlig kostnadsbesparing genom mindre elkostnad, kan därför väga tyngre än FX-systemets låga installationskostnad.

De undersökta systemen och dess kostnadsutfall är undersökta för det aktuella prisläget och dagens prismodeller hos el- och energiföretagen. Lönsamheten kan därför komma att ändras för de olika systemen eftersom kostnadsbesparingarna baserats på det aktuella el- och fjärrvärmepriset.

6.3 Primärtal

Efter att primärenergifaktorn kommer införas kommer frånluftsvärmepumpen (FX) ha svårare att nå BBR:s krav på grund av elens höga primärenergifaktor. FX-systemet har i de utförda beräkningarna påvisat en högre energibesparing, efter införandet av primärenergifaktorn blir FX-systemets försprång i energibesparingen inte lika märkbart.

6.4 Temperaturverkningsgrad

Resultaten från beräkningarna visar att det skiljer sig mellan temperaturverkningsgraden och entalpiverkningsgraden i samtliga städer. Anledningen till detta är främst på grund av att luftens entalpi förändras med vatteninnehållet. Det vill säga att mäta temperatur är missvisande eftersom hänsyn inte tas till att relativ fuktighet innehåller olika mycket vattenånga vid olika temperaturer. Alltså har varm luft bättre förmåga att innehålla vatten än kall luft. Å andra sidan levererar inte FTX-system den verkningsgraden som leverantörer lovar, vilket innebär att mer energi kommer behövas för uppvärmning av byggnad om FTX-system inte når upp till den önskade verkningsgraden. På grund av den nödvändiga indata, flertalet mätvärden och vilket energiberäkningsprogram som används kan tillförlitligheten hos energiverkningsgraden bli lägre.

För att beräkna behovet av tillsatsenergi i båda nya och befintliga hus stämmer ofta det inte mellan utfall och beräknade värden. Behovet av tillsatsenergi är alltid större än beräknat när temperaturverkningsgraden används, vilket leder till diskussioner om beräkningsmetoden är relevant eller inte. Eftersom det handlar om energiberäkningar så bör verkningsgraden beräknas med hjälp av energi (entalpi) och inte med temperatur som leder till en bättre verkningsgrad som stämmer överens med den verkliga verkningsgraden efter installation av FTX-system.

7 SLUTSATSER

Lönsamheten hos samtliga ventilationssystem påverkas främst av utomhustemperaturen och luftfuktigheten. Detta medför att systemen varit olika effektiva beroende på den geografiska placeringen och klimatet.

FTX-systemet är inte den typen av ventilationssystem som sparar mest energimängd, däremot har systemet högst årlig kostnadsbesparing av köpt energi. Ur en fastighetsägares perspektiv kan slutsatsen dras att ett FTX-system är mer kostnadsmässigt lönsamt än ett FX-system, medan FX-systemet minskar husets köpta energi mer än vad FTX-systemet gör.

I dagens läge är FX-system ventilationstypen som har lägst installations- och investeringskostnad. Dock är livslängden hos ett FX-system betydligt kortare än hos ett FTX-system, därutöver kräver FX-systemet el vid drift vilket på grund av prisskillnaderna för fjärrvärme och el resulterar i att FX-ventilation blir dyrare. Under kommande år introduceras även primärfaktorn vilket kommer orsaka att lönsamheten hos FX-systemet blir lägre, detta på grund av elens höga primärfaktor som visar hur pass mycket primär energi som behövs i förhållande till utvunnen energi.

Temperaturverkningsgraden hos FTX-systemet är ett mått som inte är anpassat för alla klimat vilket resulterat i att det inte är ett verkligt mått på ventilationens prestanda. I och med att måttet inte är korrekt medför det att mer energi krävs för att försörja byggnadens uppvärmningsbehov och resulterar i större miljöpåverkan. Genom ett införande av energiverkningsgraden kan medvetenheten hos leverantörerna och köparna åtgärdas.

8 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Den skapade beräkningsmodellen kan vidareutvecklas genom att inkludera underhållskostnader för systemen, vilket är en faktor som kan påverka systemens ekonomiska lönsamhet under den angivna livslängden för aggregaten. För att ytterligare fördjupa resultatet av studien kan möjlig energi- och kostnadsbesparing undersökas för en bostad med FTX- och FX-system kombinerat med varandra. En lösning som involverar båda systemen kan ge en intressant jämförelse samt synvinkel då systemen enbart kombinerades med fjärrvärme i denna rapporters studerade fall.

REFERENSER

Abel, E., Elmroth, A. (2008). *Byggnaden som system* (2:a uppl.). Stockholm: Studentlitteratur.

Bebo, Energimyndigheten & Sabo. (2015). Kravspecifikation: Upphandling av värmeåtervinningsystem med FTX i befintliga flerbostadshus. Hämtad från <http://www.bebostad.se/library/1899/bebo-v-v-kravspecifikation-ftx-150310.pdf>

Bergqvist, B. (2018). Jämförelse av FX- och FTX-system för ventilation av flerbostadshus. Hämtad från <http://www.svenskventilation.se/wp-content/uploads/2018/03/Jamforelse-av-FX-och-FTX-system-for-ventilation-av-flerbostadshus-20180316.pdf>

Bergqvist, B., Wahlström, Å. & Wikensten, B. (2015). Mätning och utvärdering av värmeåtervinningsaggregat i befintliga flerbostadshus. Energimyndigheten.

Cuce, P. & Cuce, E., (2017). Toward cost-effective and energy-efficient heat recovery systems in buildings: Thermal performance monitoring, *Energy*, 137, 487-494. doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.159

Dodoo, A., Gustavsson, L. & Sathre, R., (2011). Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings. *Energy and buildings*, 43, 1566-1572. Doi:org/10.1016/j.enbuild.2011.02.019.

Ellevio.se. (2018). Prislister 2018. Hämtad från https://www.ellevio.se/globalassets/uploads/dokument/prislister-2018/sakr_sth_170601_eskatt.pdf

Energimyndigheten 2011:33. Ventilera rätt: *Bra att veta om ventilation av hus och lägenheter*. Publikation utgiven av energimyndigheten. Hämtad från https://energiradgivning.se/system/tdf/ventilera_ratt.pdf?file=1

Eon.se. (2018). Fjärrvärmeprislista. Hämtad från <https://www.eon.se/content/dam/eon-se/swe-documents/swe-eon-fjarrvarmeprislista-foretag-hallsberg-kumla-orebro-2018.pdf>

Fläktwoods. Teknisk handbok: luftbehandlingsteknologi. Hämtad från <http://www.flaktwoods.no/o/o/2/4293030b-bd15-4dad-9904-d9a0217086fa>

Folkhälsa.nu. (2018). Bristande ventilation en riskfaktor för allergi och astma. Hämtad från <http://www.folkhalsa.nu/kroniska-sjukdomar/bristande-ventilation-en-riskfaktor-for-allergi-och-astma>

Jonsson, R & Karlsson, E., (2014) Ett hus fem möjligheter: *Demonstrationsprojekt för energieffektivisering i befintliga flerbostadshus från miljonprogramstiden*. (HSB Riksförbund, Slutrapport V 1.0). Malmö: Bebo. Hämtad från <http://www.bebostad.se/library/1769/slutrapport-ett-hus-fem-moejligheter.pdf>

Jonsson, R. & Kempe, P. (2015). Nybyggt flerbostadshus med förvärmning med borrhålsvatten – HSB-FTX geoenergi utan värmepump. (Bebo-utvärdering). Stockholm:

Bebo. Hämtad från <http://www.bebostad.se/library/1835/utvaerdering-av-nybyggd-flerbostadshus-med-foervaermning-rapport.pdf>

Kamendere, E., Zogla, G., Kamenders, A., Ikaunieks, J. & Rochas, C., (2015). Analysis of Mechanical Ventilation System with Heat Recovery in Renovated Apartment Buildings, *Energy procedia*, 72, 27-33. doi:org/10.1016/j.jegypro.2015.06.005.

Kristoffersson, J., Bagge, H., Hamid, A., Johansson, D., Almgren, M. & Persson, M., (2017). Användning av värmeåtervinning i miljonprogrammet, (E2B2, 393934-1). Lund: Energimyndigheten. Hämtad från http://www.e2b2.se/library/3686/slutrapport_anvandning_av_varmeatervinning_i_miljonprogrammet_webb.pdf

Lohani, S.P. & Schmidt, D., (2010) Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system, *Renewable energy*, 35, 1275–1282. doi:org/10.1016/j.renene.2009.10.002

Myhren, J., Olofsson, T. & Bergdahl, M., (2013). Lågtemperaturuppvärmning med tilluftsradiorer och värmeåtervinning i frånluft. Hämtad från: http://www.laganbygg.se/UserFiles/Projekt/Lagtemperaturuppvarmning_med_tilluftsradiorer_och_varmeatervinning_av_franluft.pdf

Nilsson, L. & Olsson, B. (2014). Prestanda luftvärmväxlare: Förstudie. Göteborg: Lågan. Hämtad från http://www.laganbygg.se/UserFiles/Projekt/LAGAN_forstudie_prestanda_luftvarmevaxlar_e.pdf

Polarpumpen.se. (2018a). Mekanisk frånluft med värmeåtervinning. Hämtad från <https://www.polarpumpen.se/ventilation/guide/ventilationsteknik/mekanisk-franluft-f/med-varmeatervinning-fx>

Polarpumpen.se. (2018b). Mekanisk till- och frånluft med värmeåtervinning. Hämtad från <https://www.polarpumpen.se/ventilation/guide/ventilationsteknik/mekanisk-till-och-franluft-ft/med-varmeatervinning-ftx>

Sveby.org. (2018). Klimatdatafiler för 2017. Hämtad från <http://www.sveby.org>

Svenskventilation.se. (2018). FTX värmeåtervinning. Hämtad från <http://www.svenskventilation.se/ventilation/olika-satt-att-ventilera/ftx-varmeatervinning/>

Tekniskaverkenkiruna.se. (2018). Fjärrvärmeprislista. Hämtad från <http://www.tekniskaverkenkiruna.se/globalassets/fjarrvarme/bilaga-prislista.pdf>

Thalfeldt, M. Kurnitski, J. & Latõšov, E., (2017). Exhaust air heat pump connection schemes and balanced heat recovery ventilation effect on district heat energy use and return temperature, *applied thermal engineering*, 128, 402-412. doi:org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.033.

Walström, Å. (2014). Teknikupphandling av värmeåtervinningssystem i befintliga flerbostadshus. (Bebo-utvärdering). Energimyndigheten. Hämtad från <http://www.bebostad.se/projekt/teknikutvecklingsprojekt/vaermeaatervinningssystem-i-befintliga-flerbostadshus-teknikupphandling/>

Ystad.se. (2018). Fjärrvärmepriser. Hämtad från http://www.ystad.se/globalassets/dokument/bolag/yeab/fjarrvarme/fjvtaxa2017_inkl_moms.pdf

BILAGA 1: NUVÄRDETABELL

Bilaga 2. Nusummetabell real kalkylränta energiprisökning, procent t (exempel)

Antal år	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
3	3,3	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5
4	4,6	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2
5	5,8	5,7	5,5	5,3	5,2	5,0	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8
6	7,2	6,9	6,7	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,1	4,9	4,8	4,6	4,5	4,4
7	8,6	8,3	7,9	7,6	7,3	7,0	6,7	6,5	6,2	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0	4,9
8	10,1	9,7	9,2	8,8	8,4	8,0	7,7	7,3	7,0	6,7	6,5	6,2	6,0	5,7	5,5	5,3
9	11,7	11,1	10,5	10,0	9,5	9,0	8,6	8,2	7,8	7,4	7,1	6,8	6,5	6,2	6,0	5,8
10	13,4	12,6	11,9	11,2	10,6	10,0	9,5	9,0	8,5	8,1	7,7	7,4	7,0	6,7	6,4	6,1
11	15,2	14,2	13,3	12,4	11,7	11,0	10,4	9,8	9,3	8,8	8,3	7,9	7,5	7,1	6,8	6,5
12	17,0	15,8	14,7	13,7	12,8	12,0	11,3	10,6	10,0	9,4	8,9	8,4	7,9	7,5	7,2	6,8
13	19,0	17,5	16,2	15,0	14,0	13,0	12,1	11,3	10,6	10,0	9,4	8,9	8,4	7,9	7,5	7,1
14	21,0	19,3	17,7	16,3	15,1	14,0	13,0	12,1	11,3	10,6	9,9	9,3	8,7	8,2	7,8	7,4
15	23,2	21,1	19,3	17,7	16,3	15,0	13,9	12,8	11,9	11,1	10,4	9,7	9,1	8,6	8,1	7,6
16	25,4	23,0	20,9	19,1	17,4	16,0	14,7	13,6	12,6	11,7	10,8	10,1	9,4	8,9	8,3	7,8
17	27,8	25,0	22,6	20,5	18,6	17,0	15,6	14,3	13,2	12,2	11,3	10,5	9,8	9,1	8,5	8,0
18	30,4	27,1	24,3	21,9	19,8	18,0	16,4	15,0	13,8	12,7	11,7	10,8	10,1	9,4	8,8	8,2
19	33,0	29,3	26,1	23,4	21,0	19,0	17,2	15,7	14,3	13,1	12,1	11,2	10,3	9,6	9,0	8,4
20	35,8	31,6	28,0	24,9	22,3	20,0	18,0	16,4	14,9	13,6	12,5	11,5	10,6	9,8	9,1	8,5
21	38,7	33,9	29,9	26,4	23,5	21,0	18,9	17,0	15,4	14,0	12,8	11,8	10,8	10,0	9,3	8,6
22	41,8	36,4	31,8	28,0	24,7	22,0	19,7	17,7	15,9	14,5	13,2	12,0	11,1	10,2	9,4	8,8
23	45,1	38,9	33,8	29,6	26,0	23,0	20,5	18,3	16,4	14,9	13,5	12,3	11,3	10,4	9,6	8,9
24	48,5	41,6	35,9	31,2	27,3	24,0	21,2	18,9	16,9	15,2	13,8	12,6	11,5	10,5	9,7	9,0
29	68,5	56,7	47,3	39,8	33,8	29,0	25,1	21,8	19,2	17,0	15,1	13,6	12,3	11,2	10,2	9,4
30	73,2	60,1	49,8	41,7	35,2	30,0	25,8	22,4	19,6	17,3	15,4	13,8	12,4	11,3	10,3	9,4
35	100,4	79,3	63,5	51,4	42,2	35,0	29,4	25,0	21,5	18,7	16,4	14,5	12,9	11,7	10,6	9,6
40	135,6	103,6	79,4	62,2	49,5	40,0	32,8	27,4	23,1	19,8	17,2	15,0	13,3	11,9	10,8	9,8

Nusummetafaktorn = $[1 - (1+t)^{-n}] / t$



MÄLARDALENS HÖGSKOLA
ESKILSTUNA VÄSTERÅS

Box 883, 721 23 Västerås **Tfn:** 021-10 13 00
Box 325, 631 05 Eskilstuna **Tfn:** 016-15 36 00
E-post: info@mdh.se **Webb:** www.mdh.se