



Självständigt arbete i energisystem 15 hp
Juni 2026

Energieffektiv ventilation inom biokemisk process- industri

Agatha Boye Niemelä, William Ernlund, August Karlsson,
Caitlin Rorabaugh, Nora Sivars, William Voss,
Isak Westlander

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik
Uppsala universitet
Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten
Institutionen för fysik och astronomi
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Uppsala 2026

Energieffektiv ventilation i biokemisk processindustri

Energy effective ventilation in biochemical process industries

Agatha Boye Niemelä, William Ernlund, August Karlsson,
Caitlin Rorabaugh, Nora Sivars, William Voss, Isak Westlander

Handledare:	Gunnar Larsson, SLU. Instruktionen för energi och teknik
Examinator:	Anders Larsolle, SLU, institutionen för energi och teknik Håkan Rensmo, Uppsala universitet. Institutionen för fysik och astronomi
Omfattning:	15 hp
Nivå och fördjupning:	Grundnivå, G2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i energisystem
Kurskod:	SLU: EX0946 Uppsala universitet: 1FA311
Program/utbildning:	Civilingenjörsprogrammet i Energisystem
Kursansvarig inst.:	Sveriges lantbruksuniversitet, SLU Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap Institutionen för energi och teknik Uppsala universitet Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten Institutionen för fysik och astronomi
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2026
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel (SLU EX0946):	Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien:	2026:10
ISSN:	1654-9392
Nyckelord:	ventilation, energieffektivisering, energisystem, ATEX, biokemisk processindustri

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Uppsala universitet

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten
Institutionen för fysik och astronomi

Ordlista och begreppsförklaring

ATEX (Atmosphères Explosibles) EU-direktiv som reglerar utrustning och arbetsmiljöer där det finns risk för att explosiva gaser eller damm kan bildas. I dessa miljöer ställs strikta krav på ventilationssystemets utformning och driftsäkerhet.

EC-fläkt (Electronically Commutated) En modern och energieffektiv typ av fläktmotor med inbyggd styrelektronik. Den möjliggör exakt varvtalsstyrning för behovs- och tidsstyrda ventilationssystem.

FA och TA Standardiserade branschförkortningar för *FrånluftsAggregat* (systemet som evakuerar den förbrukade luften från byggnaden) respektive *TilluftsAggregat* (systemet som distribuerar ny, konditionerad uteluft till lokalerna).

LEL (Lower Explosive Limit / Undre explosionsgräns) Den lägsta koncentration av en brännbar gas eller ånga i luften som krävs för att en explosion eller brand ska kunna antändas. LEL-kalkyler används för att dimensionera minimiflöden så att koncentrationen hålls på en säker nivå vid eventuella läckage.

Luftomsättning (Omsättningstal) Ett nyckeltal för hur mycket luft som tillförs eller bortförs från en lokal per tidsenhet, uttryckt i hur många gånger lokalens totala luftvolym byts ut per timme (omsättningar/h).

Retrofit Ett tekniskt tillvägagångssätt där en befintlig anläggning eller maskin uppgraderas genom att specifika komponenter byts ut mot moderna högeffektsvarianter medan det yttre höljet och infrastrukturen behålls.

SFP (Specific Fan Power / Specifik fläkteffekt) Ett mått på ventilationssystemets elektriska effektivitet, definierat som den totala elektriska ineffekten till fläktarna dividerat med det totala luftflödet ($\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$). Ett lägre SFP-värde indikerar högre energieffektivitet.

Temperaturverkningsgrad (η_t) Ett procentuellt mått på hur stor andel av termisk energi i frånluften som återvinns och överförs till tilluften innan den lämnar byggnaden.

Värmebatteri (Eftervärmningsbatteri) Ett termiskt element i ventilationsaggregatet (oftast anslutet till fastighetens fjärrvärmesystem) vars syfte är att värma tilluften den sista biten upp till lokalens eller zonens slutgiltiga börvärdestemperatur.

Vätskekopplad värmeåtervinning (VÅV) Ett återvinningssystem bestående av två separata batterier i till- respektive frånluftsflödet sammankopplade via en sluten rörkrets med cirkulerande vätska. Systemet säkerställer fullständig fysisk avskiljning mellan luftströmmarna vilket omöjliggör korskontaminering av kemikalier eller processgaser.

Sammanfattning

I denna studie utvärderas möjligheterna att energieffektivisera allmän- och processventilationen i en ATEX-klassad biokemisk processindustri. Syftet är att minska el- och fjärrvärmeförbrukningen utan att kompromissa med säkerhetskraven i riskfyllda miljöer.

Tre primära åtgärder har analyserats: sänkning av luftomsättningstal, tidsstyrd ventilation och byte av ventilationskomponenter. För den förstnämnda åtgärden simulerades en sänkning av omsättningstalet till 10 omsättningar per timme i processhallar med sluten kemikaliehantering samt 20 omsättningar per timme i en processhall med öppen kemikaliehantering. Detta gav en årlig besparing på 233 MWh och cirka 193 000 kr, vilket motsvarar en sänkning på cirka 12 % för de berörda systemen. Ytterligare utredning med LEL-kalkyler krävs dock för att säkerställa risknivåerna vid läckage. En implementering av tidsreglerad ventilation i processhallarna beräknas ge en årlig besparing på 655 MWh och 548 000 kr, motsvarande en minskning på 33 %. Reglerad tidsstyrning uppskattas spara cirka 428 MWh och 355 000 kr årligen vid halverad drift (en besparing på närmare 20 % lokalt för de reglerade aggregaten), förutsatt att ATEX-kraven medger tillfällig nedklassning av specifika ytor under obemannad tid. Den sista åtgärden med installation av moderna fläktar och djupare värmeåtervinningsbatterier beräknas spara cirka 980 MWh och 789 000 kr årligen. Detta sänker elbehovet för berörda fläktar med 30 % och uppvärmningsbehovet med närmare 38 %, vilket utgör en väl avvägd kompromiss mellan värmebesparing och aggregatens fysiska begränsningar.

Nyckelord: Ventilation, energieffektivisering, energisystem, ATEX, biokemisk processindustri

Abstract

This study evaluates the possibilities of improving the energy efficiency of general and process ventilation in an ATEX-rated biochemical process industry. The aim is to reduce electricity and district heating consumption without compromising safety requirements in hazardous environments.

Three primary measures have been analyzed: reduction of air exchange rates, time-controlled ventilation, and replacement of ventilation components. For the first measure, a reduction of the air exchange rate to 10 air changes per hour in process halls with closed chemical handling, and 20 air changes per hour in a process hall with open chemical handling, was simulated. This resulted in an annual saving of 233 MWh and approximately 193 000 SEK, corresponding to a reduction of about 12 % for the affected systems. However, further investigation using LEL calculations is required to ensure acceptable risk levels in the event of a leak. An implementation of time-regulated ventilation in the process halls is calculated to yield an annual saving of 655 MWh and 548 000 SEK, corresponding to a reduction of 33 %. Regulated time control is estimated to save approximately 428 MWh and 355 000 SEK annually at half-capacity operation (a saving of nearly 20 % locally for the regulated units), provided that ATEX requirements allow for temporary declassification of specific areas during unmanned hours. The final measure, involving the installation of modern fans and deeper heat recovery coils, is estimated to save approximately 980 MWh and 789 000 SEK annually. This reduces the electricity demand for the affected fans by 30 % and the heating demand by nearly 38 %, representing

a well-balanced compromise between heat recovery and the physical limitations of the air handling units.

Keywords: Ventilation, energy optimization, energy systems, ATEX, biochemical process industries

Förord

Detta självständiga arbete utgör vårt kandidatarbete inom Civilingenjörsprogrammet i energisystem vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts under våren 2026 på uppdrag av Cytiva i Uppsala.

Vi vill uttrycka vår tacksamhet till Cytiva för det förtroende och stöd vi fått under projektets gång. Vi riktar ett speciellt tack till Gustav Schultz och Petter Wihlborg, vars tid och engagemang har varit till ovärderlig hjälp för att vi ska kunna navigera i anläggningens ventilationssystem.

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
2	Material och metoder	9
2.1	Beräkningsunderlag	9
2.2	Regelverk	10
2.3	Teori	10
2.3.1	Fläktlagarna	10
2.3.2	Specifik fläkteffekt och dess skalning	11
2.3.3	Praktisk anpassning av effektbehov	12
2.3.4	Termiskt effekt- och energibehov	12
2.4	Minskad allmänventilation i ATEX-klassade utrymmen	12
2.4.1	Beräkningsmetod för minskad fläktel i processhallar	13
2.4.2	Beräkningsmetod för nettobesparing av värme i processhallar	13
2.4.3	Kontor	14
2.4.4	Känslighetsanalys	14
2.5	Tidsstyrning	14
2.5.1	Känslighetsanalys	16
2.6	Byte av komponenter	16
2.6.1	Beräkningsmetod – Byte till EC-fläkt	16
2.6.2	Vätskekopplad värmeåtervinning	16
2.6.3	Känslighetsanalys	17
2.7	Kombinerade åtgärder	17
3	Resultat	18
3.1	Minskad luftomsättning i lokaler	18
3.1.1	Minskad luftomsättning i processhallar	18
3.1.2	Minskad luftomsättning i kontor	20
3.2	Tidsstyrd ventilation	22
3.3	Byte av komponenter	23
3.3.1	Vätskekopplad värmeåtervinning	25
3.4	Kombinerad effekt av samtliga åtgärder	26
4	Diskussion	28
4.1	Jämförelse med tidigare studier	28
4.2	Minskad luftomsättning i lokalutrymmen	29
4.2.1	Processhallar	29
4.2.2	Kontor	30
4.2.3	Begränsningar och osäkerheter	30
4.3	Tidsstyrning	30
4.4	Byte av komponenter	31
4.4.1	Byte till EC-fläkt	31
4.4.2	Vätskekopplad värmeåtervinning	32
4.5	Sammanställda scenariot	32
4.6	Användning av AI	32
5	Slutsatser	33

1 Inledning

I dagens samhälle ökar energianvändningen varje år och under år 2024 landade energiförbrukningen på 505 TWh (Energimyndigheten, 2024), varav 125 TWh är elförbrukning (Lindström, 2024). Effektiv elanvändning är nödvändig för att minska klimatpåverkan och hushålla med naturresurser (Energimyndigheten, 2023). För att reducera den totala energianvändningen krävs dock inte enbart en effektivare elanvändning utan även ett ökat utnyttjande av alternativa energikällor (Naturvårdsverket, 2024).

Ventilation i laboratoriemiljöer utgör en kritisk del av den biotekniska industrins infrastruktur. Dessa system riskerar dock att överdimensioneras och utformas med stora säkerhetsmarginaler vilket leder till onödigt hög energianvändning, särskilt i ATEX-klassade utrymmen (Sharp, 2010). ATEX (Atmosphères Explosibles) är två EU-direktiv som reglerar hur utrymmen med risk för explosiv atmosfär ska hanteras och ventileras (Arbetsmiljöverket, 2023).

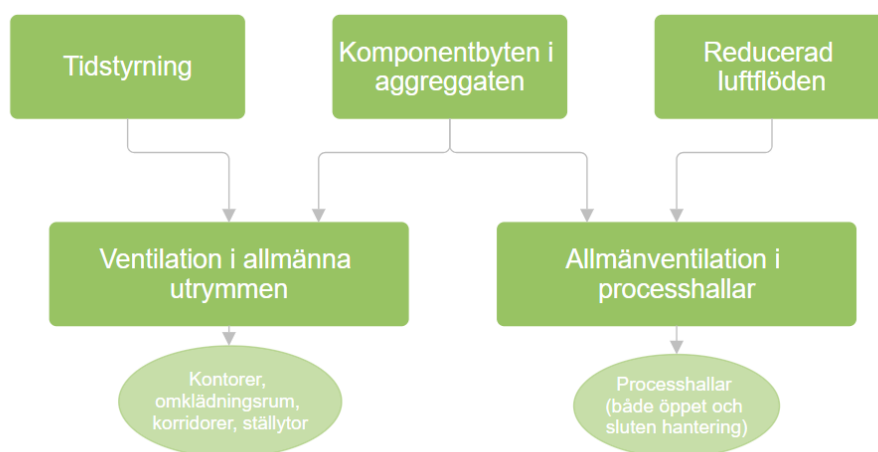
En reduktion av luftflöden och luftomsättningar i ventilationssystemen medför potential för betydande elbesparingar. En indirekt effekt av minskad ventilation är reducerade värmeförluster eftersom en mindre mängd uppvärmd luft ventileras bort, vilket i sin tur minskar uppvärmningsbehovet (Cengel & Cimbala, 2022).

Flera tidigare vetenskapliga studier har utvärderat möjligheterna till energibesparingar i ventilationssystem genom behovsstyrning och sänkta luftomsättningstal. I en studie av Hesaraki och Holmberg (2015) undersöktes effekterna av behovsstyrd ventilation i byggnader, där resultaten påvisade energibesparingar för uppvärmning av ventilationsluft på 20 % samt en minskad elförbrukning för fläktar med 30 % jämfört med konstanta flöden. Mysen m.fl. (2005) utvärderade potentialen för styrd ventilation i kommersiella och offentliga miljöer och fann att energianvändningen för ventilation kunde reduceras till mellan 38 % och 51 % av det ursprungliga behovet. Vidare genomförde Merema m.fl. (2018) fältmätningar och simuleringar som bekräftade att optimerade, behovsstyrda flöden reducerade fläktenergin med 25–55 % och minskade de ventilationsrelaterade värmeförlusterna med 25–32 %. Sammantaget bekräftar denna forskning att en optimering av luftflöden efter det faktiska behovet kan ge mycket stora och mätbara reduktioner av den totala energianvändningen. Stigande el- och bränslepriser ger dessutom ökade ekonomiska incitament till energieffektivisering.

Syftet med studien är därför att undersöka hur energianvändningen och driftskostnaden för allmän- och processventilationen kan reduceras i en byggnad med risk för explosiv atmosfär vid en biokemisk processindustriinläggning i Uppsala.

2 Material och metoder

I följande avsnitt beskrivs det underlag samt antaganden som ligger till grund för studiens analyser. Här redovisas vilka data som använts, vilka regelverk som styr ventilationslösningar i ATEX-miljöer samt de teoretiska samband som tillämpats. Avsnittet förklarar även hur beräkningar för minskad luftomsättning, tidsstyrning och komponentbyten har genomförts. Modellerna som undersöks är alla utförda som en differentiell analys för att isolera effekten av de specifika åtgärderna. Beräkningarna genomfördes i en parametrisk beräkningsmodell i Excel baserad på driftdata från Cytivas ventilationskartläggning med struktur enligt Figur 1. Slutligen beskrivs den känslighetsanalys som används för att bedöma modellens robusthet.



Figur 1: Systemskiss över modellen som visar vilken utrymme som tillhör vilken åtgärd.

2.1 Beräkningsunderlag

Majoriteten av det använda materialet inhämtades direkt från Cytiva och bestod av dokument med ritningar över byggnaden med tillhörande ventilationssystem (Bilaga A.1 och A.2). Även kalkylblad med SFP-värden, luftflöden, effekter och omsättningstal från en tidigare kartläggning (2022) utgjorde en väsentlig utgångspunkt för arbetet. För att fastställa vilka åtgärder som var tillåtna och rimliga användes interna dokument rörande klassificeringar av utrymmen på anläggningen, i kombination med tolkningar av lagstiftning samt riktlinjer från Cytivas avdelning för miljö, hälsa och säkerhet (EHS).

Valet att avgränsa studien till den aktuella byggnaden, hädanefter kallad Hus C, en av områdets cirka 60 byggnader, baserades på en analys av Cytivas tidigare kartläggning av anläggningens energianvändning (2022). Denna visade att ventilationssystemen i hus C står för en betydande andel av den totala användningen: 24,0 % av elektriciteten respektive 22,5 % av fjärrvärmen.

För beräkningen av ekonomiska besparingar användes priser på elektricitet och fjärrvärme enligt ett årsmedelvärde för de senaste fem åren. Elpriset antogs till 738 kr/MWh och fjärrvärmepriset till 858 kr/MWh (P. Wihlborg, Energy Controller, e-mailkorrespondens den 11 maj 2026).

Dessutom inhämtades timvisa temperaturdata från SMHI:s väderstation Uppsala Aut för perioden 2016–2026 (SMHI, 2026).

2.2 Regelverk

Enligt Arbetsmiljöverkets föreskrifter (AFS 2023:14) ska de hygieniska gränsvärdena följas när det gäller föroreningar i arbetsmiljön. Eftersom processen är utrustad med eget punktutsug evakueras en betydande andel av föroreningarna. Den allmänna ventilationen måste dock ha kapacitet att hantera eventuella gaser som inte evakueras fullständigt. För att fastställa koncentrationerna krävs en mer ingående analys av nuvarande gasnivåer i de olika lokalerna, särskilt i de ATEX-klassade utrymmena. Enligt AFS 2023:14 6 § ska substanserna och deras förekomst redovisas i en mättrapport enligt mallen i bilaga 2. Eventuella undantag ges i AFS 2023:10, men dessa är inte relevanta för denna utredning. Föreskrifterna anger inget om förhållandet mellan process- och allmänventilation, utan fastställer enbart att gränsvärdena ska uppfyllas i samtliga utrymmen.

För konventionella utrymmen såsom bostäder och kontor rekommenderar Folkhälsomyndigheten (FoHMFS 2014:18) en minimigräns på $0,35 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ för uteluftsflödet. För luftomsättningen gäller $0,5$ rumsolymer per timme, vilket innebär att halva lokalens luftvolym ska bytas ut varje timme. För övriga utrymmen såsom laborationssalar och korridorer där produkter eller kemikalier transporteras föreskrivs ett minsta flöde på 6 oms/h enligt Cytivas egna tekniska rekommendation (2017). I samma dokument fastställs 10 oms/h för skyddade områden, exempelvis processhallar med sluten kemikaliehantering, och 20 oms/h i processhallar med öppen kemikaliehantering i anslutning till punktutsug, reaktorer eller dragskåp.

Ventilationssystemet utgör en väsentlig säkerhetsåtgärd mot explosionsrisk, särskilt i ATEX-klassade utrymmen. Zonklassificeringen i ATEX-klassade utrymmen påverkas av luftflödet vilket innebär att ventilationssystemet är avgörande för kontrollen av toxiska utsläpp i processindustrier (HSE, u.å).

ATEX-utrymmen indelas i zonerna 0, 1 och 2 där zon 0 utgör den mest riskfyllda miljön till följd av ständig eller långvarig exponering för explosiv atmosfär (MCF, 2026). Ventilationssystemet är därmed avgörande för regleringen av och varaktigheten för en explosiv atmosfär i byggnader (HSE, 2004).

2.3 Teori

För att beräkna fläktars effektbehov vid varvtals- och flödesförändringar används de klassiska fläktlagarna (eng. *affinity laws*). Dessa teoretiska samband behöver dock ofta anpassas i praktiken eftersom ett ventilationssystems verkningsgrad förändras vid delast. Utöver drivenergin till fläktarna presenteras de termodynamiska sambanden för att beräkna systemets termiska effekt- och energibehov vid uppvärmning av tilluft.

2.3.1 Fläktlagarna

För att uppskatta hur en fläkts prestanda förändras vid en ändring av varvtalet används fläktlagarna. Enligt Cengel & Cimbala (2022) gäller följande ideala samband för en centrifugalfläkt under antagandet om konstant verkningsgrad:

$$\frac{q_{ny}}{q_{nu}} = \frac{\omega_{ny}}{\omega_{nu}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta p_{ny}}{\Delta p_{nu}} = \left(\frac{\omega_{ny}}{\omega_{nu}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_{ny}}{P_{nu}} = \left(\frac{\omega_{ny}}{\omega_{nu}} \right)^3 \quad (3)$$

där q är volymflödet, ω är fläktens varvtal, Δp är tryckuppsättningen och P är den mekaniska axeleffekten. Indexen nu och ny betecknar det ursprungliga respektive det nya tillståndet. Samband (3) visar att effektbehovet teoretiskt är proportionellt mot kuben på flödes- och varvtalsförändringen.

2.3.2 Specifik fläkteffekt och dess skalning

För att koppla den fluidmekaniska teorin till byggnadstekniska nyckeltal används begreppet specifik fläkteffekt, SFP (eng. *Specific Fan Power*). Begreppet SFP definieras som den elektriska ineffekten (P_{el}) dividerat med volymflödet (q):

$$\text{SFP} = \frac{P_{el}}{q} \quad (4)$$

Den elektriska effekt som fläktmotorn drar från elnätet (P_{el}) motsvarar den aerodynamiska effekten som tillförs luften ($q \cdot \Delta p$) dividerat med systemets totalverkningsgrad (η_{tot}). Verkningsgraden inkluderar samtliga förluster i motor, drivrem och fläkthjul (Cengel & Cimbala, 2022):

$$P_{el} = \frac{q \cdot \Delta p}{\eta_{tot}} \quad (5)$$

Genom substitution av ekvation (5) i (4) erhålls SFP som funktion av tryck och verkningsgrad:

$$\text{SFP} = \frac{\Delta p}{\eta_{tot}} \quad (6)$$

För att analysera hur SFP förändras vid en flödesreducering kombineras ekvation (2) och (6). Detta resulterar i följande uttryck för förhållandet mellan det nya och ursprungliga SFP-värdet:

$$\frac{\text{SFP}_{ny}}{\text{SFP}_{nu}} = \left(\frac{q_{ny}}{q_{nu}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\eta_{tot,nu}}{\eta_{tot,ny}} \right) \quad (7)$$

Detta samband visar att SFP, under antagandet om konstant verkningsgrad ($\eta_{tot, nu} = \eta_{tot, ny}$), minskar med kvadraten på flödesreduceringen.

2.3.3 Praktisk anpassning av effektbehov

I verkliga system minskar totalverkningsgraden (η_{tot}) vid låga flöden eftersom fasta förluster, till exempel magnetisering och friktion, utgör en allt större andel av de totala förlusterna vid låga flöden. Därmed blir det teoretiska kubiska sambandet i ekvation (3) alltför optimistiskt. Fältmätningar på frekvensstyrda ventilationssystem och pumpar visar att exponenten i drift sällan når 3,0 utan i stället uppgår till cirka 2,2 vid dellast, med en standardavvikelse på 0,3 (Moser, 2024).

För att erhålla realistiska energibesparingskalkyler justeras exponenten i fläktlagen för effekt till 2,2:

$$\frac{P_{el,ny}}{P_{el,nu}} \approx \left(\frac{q_{ny}}{q_{nu}} \right)^{2,2} \quad (8)$$

Eftersom exponenten är empiriskt bestämd är det även av betydelse att genomföra en känslighetsanalys baserad på den kända standardavvikelsen.

2.3.4 Termiskt effekt- och energibehov

Utöver fläktel krävs termisk energi för att värma tilluften. Utifrån termodynamiska principer (Cengel & Cimbala, 2022) beräknas den nödvändiga värmeeffekten $\dot{Q}$ med avseende på luftens volymflöde q , densitet ρ och specifika värmekapacitet c_p :

$$\dot{Q} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{ut} - T_{in}) \quad (9)$$

där T_{in} och T_{ut} är temperaturen före respektive efter värmebatteriet. Sambandet visar att värmeeffekten, i motsats till fläktelen, minskar linjärt med luftflödet.

Den totala termiska energin E under en tidsperiod t med konstant effekt beräknas som:

$$E = \dot{Q} \cdot t \quad (10)$$

Den totala energibesparingen vid en flödesreducering beräknas genom en jämförelse av energianvändningen före och efter flödesreduceringen. Värmeanvändningen kan även beräknas med hjälp av värmeåtervinningsgraden ($\eta_{V\Delta V}$) enligt ekvation 11:

$$E = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (1 - \eta_{V\Delta V}) \cdot \Delta T \cdot t_{\text{drift}} \quad (11)$$

Det elektriska energibehovet beräknas genom att effekten multipliceras med drifttiden. Beräkningen kan utgå från två driftinställningar: lågt flöde (LF) och högt flöde (HF) enligt ekvation 12:

$$E_{el} = P_{el, HF} \cdot t_{HF} + P_{el, LF} \cdot t_{LF} \quad (12)$$

2.4 Minskad allmänventilation i ATEX-klassade utrymmen

Processhallar med sluten kemikaliehantering (kemikalier i kärl) vars omsättningstal översteg kraven i Cytivas tekniska specifikation (2017) identifierades, liksom en processhall med öppen hantering där marginal fanns i förhållande till riktlinjerna. Totalt valdes tre processhallar med sluten kemikaliehantering och en processhall med öppen hantering ut för

analys. De tre processhallarna med sluten hantering hade ett genomsnittligt omsättningstal på 12,4 oms/h och processhallen med öppen kemikaliehantering ett omsättningstal på 24 oms/h. Dessa värden utgjorde utgångspunkten för beräkningarna av energibesparingarna i de olika scenarierna.

1. **Referensscenario:** Nuvarande driftförhållanden utan förändrade luftomsättning.
2. **Scenario, luftflöde enligt Cytivas riktlinjer:** Detta scenario innebär en sänkning av omsättningstalet till 10 oms/h för de tre processhallarna med sluten hantering (från 12,4 oms/h) samt till 20 oms/h för processhallen med öppen hantering (från 24 oms/h).
3. **Scenario, sensorstyrd ventilation:** Detta scenario innebär att allmänventilationen i processhallarna med sluten hantering sänks till 6 oms/h och i processhallen med öppen hantering till 10 oms/h.

Scenario 2 valdes för att beräkna besparingen om omsättningstalen fastställs i enlighet med riktlinjerna. Scenario 3 analyserar den energibesparing som kan uppnås genom installation av VOC-sensorer kopplade till ventilationen, för att vid behov forcera luftflödet vid förhöjda gaskoncentrationer i processhallarna. Processhallen med öppen hantering antogs i detta scenario ha egenskaper motsvarande en hall med sluten hantering. Detta motiveras av att öppen kemikaliehantering endast sker vid påfyllning av kärl vilket pågår under en begränsad del av drifttiden. Följaktligen antogs ett flöde på 10 oms/h även för denna lokal. Med ett sensorstyrt ventilationssystem elimineras behovet av konstant maximal luftomsättning.

2.4.1 Beräkningsmetod för minskad fläktel i processhallar

För att estimerar kostnaderna för det nuvarande luftflödesöverskottet beräknades medelvärden för produktionslokalernas areor och omsättningstal. Dessa parametrar användes därefter för att bestämma det genomsnittliga luftflödet i lokalerna vilket gjordes genom att multiplicera den genomsnittliga lokalvolymen med det genomsnittliga omsättningstalet. Värdena för processhallarnas areor och luftflöden hämtades från ett internt dokument från Cytiva angående luftomsättningen i företagets ATEX-klassade utrymmen. Takhöjden beräknades i en av lokalerna enligt:

$$h = \frac{V_h}{nA}$$

där h är takhöjden, V_h utgör det totala timflödet (m^3/h), n är luftomsättningen (oms/h) och A är lokalens area (m^2).

Den nya effekten för till- och frånluftsaggregaten beräknades enligt ekvation 8. Därefter beräknades effektdifferensen ($P_{nu} - P_{ny}$) och multiplicerades med 8 760 timmar för att erhålla den årliga besparingen i kWh/år. Slutligen beräknades den årliga ekonomiska besparingen genom att multiplicera energibesparingen med det antagna elpriset.

2.4.2 Beräkningsmetod för nettobesparing av värme i processhallar

Det minskade luftflödet medför en värmebesparing i huvudaggregatet (HA1) eftersom en mindre mängd luft behöver värmas. Detta medför att värmebesparingen för HA1

beräknas enligt:

$$E = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (1 - \eta_{V\dot{A}V}) \cdot \Delta T \cdot t_{\text{drift}}$$

Flödet q varierar för de olika driftscenarierna, drifttiden t_{drift} uppgår till 8 760 h (kontinuerlig drift året om) och faktorn $(1 - \eta_{V\dot{A}V})$ utgör den andel av värmebehovet som behöver tillföras via fjärrvärmenätet. Vidare är ΔT differensen mellan börvärdet för inomhustemperaturen och uteluftens årsmedeltemperatur. Parametrarna c_p och ρ betecknar luftens specifika värmekapacitet respektive densitet. Den årliga fjärrvärmebesparingen multipliceras med 0,858 kr/kWh för att erhålla den ekonomiska besparingen i kr/år.

2.4.3 Kontor

Ett utrymme som tidigare var en laborationssal och därmed var ATEX-klassat hade byggts om till kontor. Allmänventilationen var fortfarande inställd på det högre luftflöde som laborationssalen krävde. I detta fall beräknades besparingspotentialen för en sänkning av luftflödet till en lämplig nivå för kontorsverksamhet.

2.4.4 Känslighetsanalys

Genom en känslighetsanalys baserad på ett gynnsamt (bästa fall) och ett ogynnsamt (värsta fall) driftscenario undersöktes modellens robusthet under olika initialtillstånd. Bland de parametrar som användes i modellen identifierades fyra med en högre grad av osäkerhet. Dessa varierades inom intervallet ± 1 standardavvikelse från det antagna medelvärdet. De parametrar som inkluderades i analysen var fläktlagens exponent samt de tre beräknade temperaturerna från SMHI: årsmedeltemperatur T_{ute} , dagstemperatur $T_{\text{ute,dag}}$ och nattstemperatur $T_{\text{ute,natt}}$.

Fläktlagsexponenten vilken i basutförandet sattes till 2,2 varierades med en standardavvikelse på $\pm 0,3$. För temperaturdata som baserades på SMHI:s mätningar mellan åren 2016 och 2026 beräknades standardavvikelsen. Årsmedeltemperaturen T_{ute} uppgick till 7,74 °C med en standardavvikelse på $\pm 0,59$ °C, medan medeltemperaturen för dagtid uppgick till 9,17 °C med $\pm 0,61$ °C och nattid till 6,30 °C med $\pm 0,58$ °C.

Ett *bästa fall* med gynnsammare initiala driftförutsättningar simulerades genom att kombinera en högre fläktexponent med högre utomhustemperaturer. Omvänt simulerades ett *värsta fall* med ogynnsammare initiala driftförutsättningar genom att kombinera en lägre fläktexponent med lägre utomhustemperaturer.

2.5 Tidsstyrning

Behovsstyrning av luftflöden utifrån verksamhetens drifttider i allmänna utrymmen utgör en etablerad metod för att optimera energiprestandan i ventilationssystemen. Genom att reducera flödena under obemannade tider minskas både elanvändningen för fläktdrift och fjärrvärmeanvändningen för uppvärmning av uteluft. För att implementera tidsstyrningen användes systemritningar och ventilationskartor (Bilaga A.1) för att identifiera de aggregat som försörjer allmänna utrymmen i hus C. Processventilation samt utrymmen med specifika termiska krav, exempelvis elcentraler och autoklaver, exkluderades.

Studien simulerade och jämförde två driftscenarier med ett referensfall:

1. **Referensscenario:** Nuvarande driftförhållanden med kontinuerligt flöde dygnet runt.

2. **Reducerad drift:** Flödesreducering till 50 % under obemannad tid mellan klockan 18:00 och 06:00.
3. **Alternerande drift:** Helt avstängd ventilation under obemannad tid mellan klockan 18:00 och 06:00.

Beräkningarna i modellen utgick från två driftlägen för respektive aggregat: högt luftflöde (HF) under dagtid samt lågt luftflöde (LF) under nattetid. Den årliga elanvändningen för fläktdrift (E_{el}) beräknades genom en summering av elbehovet under drifttiderna för högföde (t_{HF}) respektive lågföde (t_{LF}) enligt ekvation 12:

$$E_{el} = P_{el, HF} \cdot t_{HF} + P_{el, LF} \cdot t_{LF}$$

Fläkteeffekten vid högföde ($P_{el, HF}$) hämtades direkt från befintliga driftdata. Effekten vid reducerat flöde ($P_{el, LF}$) beräknades enligt ekvation 8:

$$P_{el, LF} = P_{el, HF} \cdot \left(\frac{q_{LF}}{q_{HF}} \right)^{2,2}$$

Den årliga fjärrvärmeanvändningen för uppvärmning av tilluft ($E_{värme}$) beräknades utifrån ventilationssystemets aggregathierarki. Primäraggregatet HA1 förvärmer uteluften till 16 °C innan den distribueras till sekundäraggregaten. Sekundäraggregaten eftervärmer därefter tilluften från 16 °C till respektive zons specifika börvärde.

För primäraggregatet HA1 beräknades fjärrvärmeanvändningen ($E_{värme, primär}$) med hänsyn till värmeåterviningsgraden η_{VAV} enligt ekvation 11:

$$E_{värme, primär} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (1 - \eta_{VAV}) \cdot \Delta T_{primär} \cdot t_{drift}$$

Även för detta fall beräknades värmebehovet separat för natt- respektive dagtid och summerades därefter. Luftens densitet (ρ) sattes till 1,2 kg/m³ och dess specifika värmekapacitet (c_p) till 1,0 kJ/(kg · K). Temperaturskillnaden för primäraggregatet definierades som:

$$\Delta T_{primär} = T_{till, primär} - 1 - T_{ute}$$

där $T_{till, primär} = 16$ °C. Temperaturen T_{ute} är ett beräknat årsmedelvärde från SMHI-data för perioden 2016–2026 i Uppsala Aut. För de aggregat som tidsreglerades nattetid beräknades värmebehovet separat för dagtid (kl. 06:00–18:00) med en medeltemperatur på 9,17 °C och för nattetid (kl. 18:00–06:00) med 6,30 °C. För aggregat som saknade tidsstyrning tillämpas i stället Uppsalas årsmedeltemperatur på 7,74 °C för hela drifttiden. I temperaturskillnaderna subtraherades 1 °C som en tryckuppvärmningskorrigering, vilket gjordes för att kompensera för den temperaturökning som uppstår över fläktarna till följd av mekaniskt arbete.

För sekundäraggregaten sker ingen ytterligare värmeåtervinning, varför fjärrvärmeanvändningen ($E_{värme, sekundär}$) beräknades direkt utifrån eftervärmningsbehovet enligt ekvation 11:

$$E_{värme, sekundär} = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{sekundär} \cdot t_{drift}$$

Temperaturskillnaden för sekundäraggregaten definierades som:

$$\Delta T_{sekundär} = T_{till, sekundär} - 1 - T_{in}$$

där $T_{in} = 16$ °C och $T_{till, sekundär}$ motsvarar det valda aggregatets temperaturinställning.

2.5.1 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen för tidsregleringsåtgärden genomfördes på samma sätt som för åtgärden med minskat luftflöde vilken beskrevs i avsnitt 2.4.4. Detta motiverades av att samma underliggande osäkra parametrar användes i modellen.

2.6 Byte av komponenter

I denna del av studien analyserades potentialen för energibesparing genom utbyte av äldre fläktar och värmeåtervinningsbatterier i Cytivas ventilationssystem. Arbetet baserades på en analys av Cytivas interna driftdata där information om fläkttyp, SFP-värden, ålder, skickbedömning, luftflöden och drifttider sammanställdes.

2.6.1 Beräkningsmetod – Byte till EC-fläkt

För respektive fläkt utgick beräkningarna från den eleffekt som angavs i Cytivas driftdata. SFP-värdet för den befintliga fläkten beräknades genom att dividera effekten med fläktens luftflöde, i enlighet med ekvation 4:

Tryckuppsättningen i ventilationssystemet uppskattades utifrån de beräknade SFP-värdena. Genom att anta en totalverkningsgrad för fläkt, motor och transmission kunde tryckuppsättningen approximeras enligt ekvation 6:

$$\Delta p = \eta_{\text{tot}} \cdot \text{SFP}$$

Eftersom $1 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s}) = 1 \text{ kPa}$ kunde Δp uttryckas direkt i kPa. I beräkningarna användes $\eta_{\text{tot}} = 0,45$ som ett representativt värde för äldre installationer.

Ventilationssystemen antogs i sin helhet vara oförändrade vid fläktbytet. Detta innebar att kanaler, filter och don bibehölls. Därför antogs även systemets tryckfall vara detsamma före och efter bytet, och den nya fläkten jämfördes vid samma driftläge som den gamla.

För varje system definierades och analyserades en driftpunkt med hjälp av ett tillverkarbaserat fläkturvalsverktyg. I studien användes källan Ebm-papst (2024) som exempel för att illustrera hur en modern EC-kammarfläkt presterar vid samma driftpunkt (q och Δp) som det befintliga systemet. Verktyget möjliggjorde val av en lämplig fläktstorlek samt avläsning av motsvarande eleffekt vid samma luftflöde och tryckfall som i det ursprungliga driftfallet. Syftet var att uppskatta hur mycket lägre effekt en ny fläkt kan uppnå vid oförändrade driftförutsättningar. EC-fläktar användes som referens eftersom de utgör standarden i moderna ventilationssystem.

2.6.2 Vätskekopplad värmeåtervinning

Vätskekopplad värmeåtervinning används i miljöer med höga renhetskrav, såsom laboratorier och industriella processhallar, eftersom frånluft och tilluft hålls helt fysiskt separerade enligt Svensk Ventilation. Teknikens prestanda mäts i temperaturverkningsgrad vilket styrs av batteriernas värmeöverförande area, antalet rörrader, lamelltätheten samt vätskeflödet. Enligt branschriktlinjer från Svensk Ventilation kan moderna, optimerade vätskekopplade system i dag nå en verkningsgrad på 65–80 % under ideala förhållanden. I praktiken begränsas dock befintliga äldre anläggningar till följd av aggregatens fysiska

dimensioner och fläktarnas förmåga att hantera tryckfall. Dalenbäck, J.O. (2019) visade i studier av befintliga system inom industrin att den genomsnittliga verkningsgraden för dessa anläggningar i drift är lägre och uppgår till mellan 44 och 50 %. För att höja verkningsgraden i en äldre anläggning utan att byta hela aggregatet simulerades installation av djupare, högpresterande batterier i de befintliga hölkena.

2.6.3 Känslighetsanalys

Den antagna totalverkningsgraden är inte ett uppmätt värde utan baserades på typiska värden för äldre installationer. Av denna anledning identifierades verkningsgraden som den mest osäkra parametern i beräkningarna. Verkningsgraden bestämmer direkt systemets initialtillstånd genom att påverka det beräknade tryckfallet och därmed även den eleffekt som krävs för att uppnå driftläget.

För att undersöka hur denna osäkerhet påverkar effektbehovet genomfördes en känslighetsanalys utifrån två nya scenario-specifika baslinjer. Verkningsgraden analyserades vid nivån 40 %, vilket representerar ett ogynnsamt driftscenario (värsta fall) med högre initial referensförbrukning, samt vid nivån 50 %, vilket representerar ett gynnsamt driftscenario (bästa fall). Detta motsvarar en förändring på ± 5 procentenheter från det antagna värdet. Syftet var att belysa modellens parameterkänslighet och bedöma beräkningarnas robusthet under dessa varierande initiala driftförutsättningar.

2.7 Kombinerade åtgärder

För att utvärdera den sammantagna energibesparingen kombinerades samtliga enskilda åtgärder i en integrerad beräkningsmodell. Eftersom åtgärderna interagerar med varandra kan de enskilda besparingarna inte adderas direkt utan att orsaka en dubbelräkning av energipotentialen. Exempelvis påverkar en flödesreducering nattetid det effektbehov som en ny fläkt eller en optimerad värmeåtervinning kan spara under dessa timmar. Modellen beräknade därför de nya drifteffekterna och värmebehoven sekventiellt, där flödesförändringar (tidsreglering och minskad luftomsättning) applicerades före komponentbyten (fläktar och värmeväxlare). För att undvika en kombinatorisk explosion exkluderades osäkerheten för fläktverkningsgraden i känslighetsanalysen för det sammansatta scenariot. Genom denna metodik säkerställdes att den totala energireduceringen inte överskattades.

Den kombinerade analysen utgick från två sammansatta driftscenarier benämnda medelväg respektive extremfall. Medelvägsscenario kombinerade en sänkning av allmänventilationen enligt Cytivas riktlinjer (Scenario 2) med en nattlig flödesreducering till 50 % i de tidsreglerade utrymmena. Extremscenariot kombinerade i stället en sensorstyrd ventilation (Scenario 3) med en tillfällig eller fullständig nattavstängning av ventilationen under obemannad tid. Benämningen extremfall används då detta scenario definierar beräkningsmodellens övre gränsvärde för energibesparing. Genom att simulera en fullständig nattavstängning etableras en teoretisk ytterlighet, vilket gör det möjligt att kartlägga modellens totala beräkningsområde.

Känslighetsanalysen för de båda kombinerade scenarierna genomfördes genom att variera fläktexponenten samt utomhustemperaturerna enligt samma metodik som för de enskilda åtgärderna. Detta möjliggjorde en jämförelse mellan en moderat och en mer genomgripande driftstrategi under varierande yttre förutsättningar.

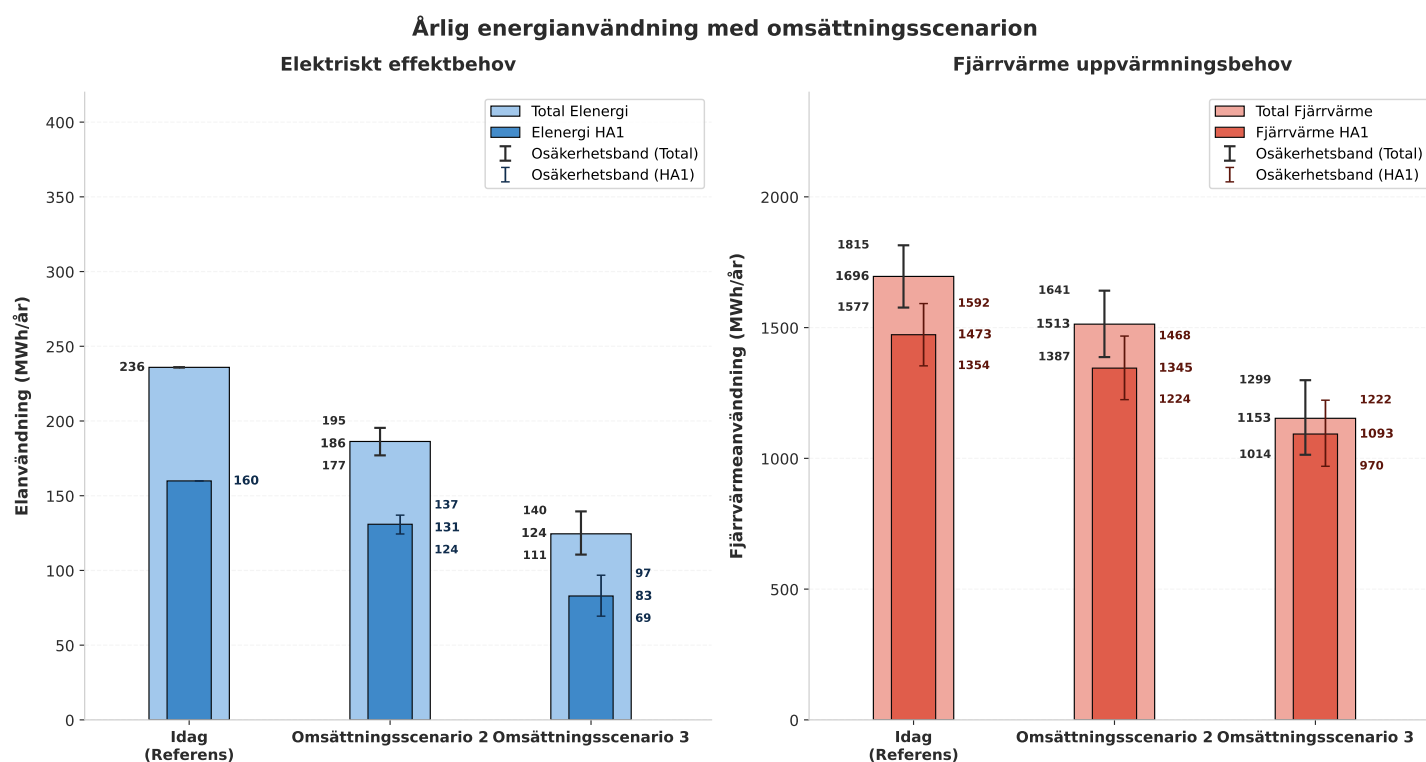
3 Resultat

I följande avsnitt presenteras de resultat som erhöles utifrån de beräkningsmetoder som beskrevs i kapitel 2. Resultaten redovisas för scenarierna minskad luftomsättning, tidsstyrning och komponentbyten samt för ett sammansatt fall där samtliga åtgärder kombineras. Fokus ligger på hur åtgärderna påverkar energianvändningen och driftskostnaderna i C-husets ventilationssystem. Det bör understrykas att resultaten bygger på differentiella analyser där endast de komponenter som direkt påverkas av respektive åtgärd inkluderades. Beteckningen 'Total' representerar därmed den inkrementella förändringen (nettoenergiförändringen) i stället för systemets totala, absoluta energianvändning.

3.1 Minskad luftomsättning i lokaler

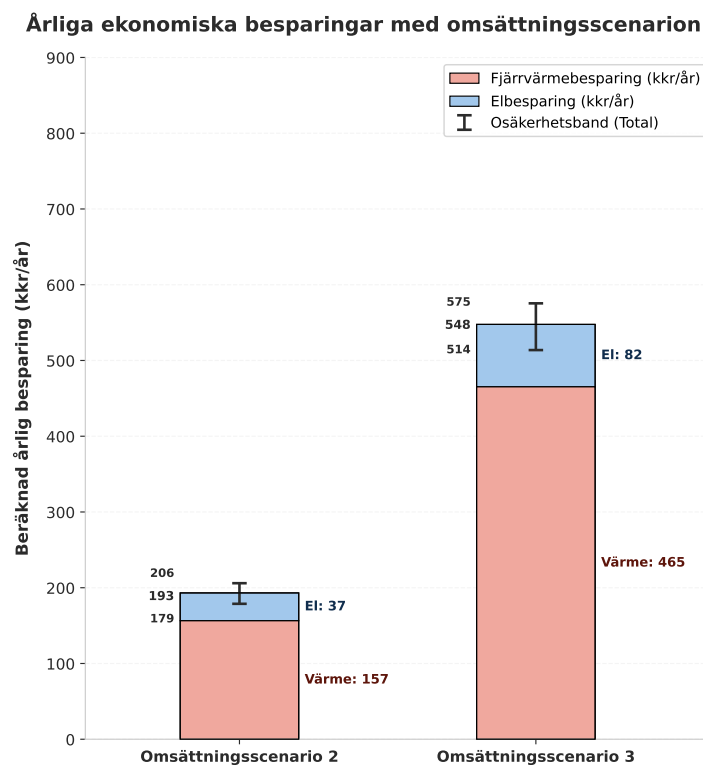
Luftomsättningen i lokalerna reducerades på två sätt: dels genom en sänkning av omsättningstalet i de ATEX-klassade processhallarna, dels genom en flödesanpassning i ett före detta laboratorietrymme vilket i dag används som kontor.

3.1.1 Minskad luftomsättning i processhallar



Figur 2: Årlig el- och värmeanvändning vid ändrade luftomsättningstal för de tre driftscenarierna med osäkerhetsband.

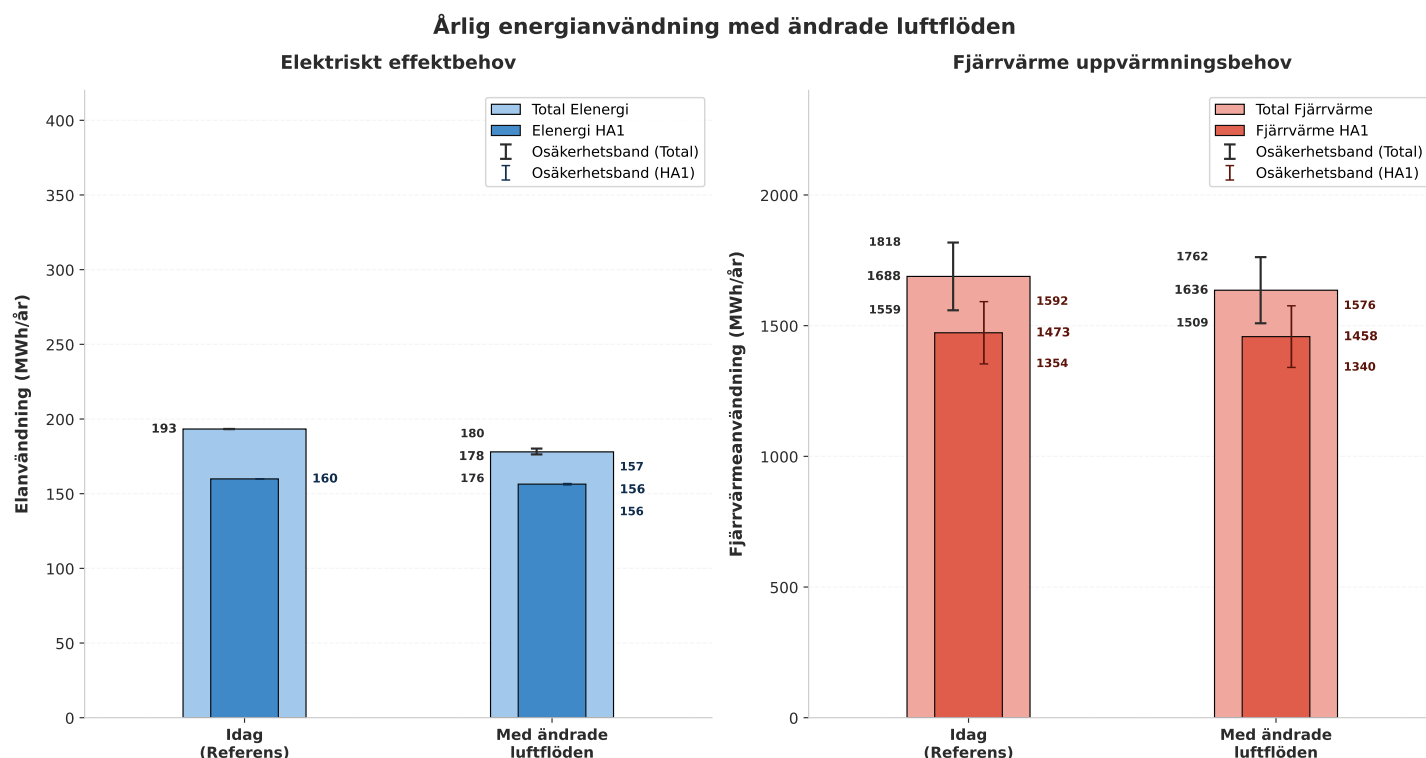
De båda scenarierna i figur 2 visar en minskning av energianvändningen för båda energislagen, varav scenario 3 resulterar i den största besparingen för både el och fjärrvärme. Vidare är osäkerhetsbandet för fjärrvärme betydligt bredare; i scenario 3 uppgår det till ± 129 MWh/år för fjärrvärme och till ± 16 MWh/år för el.



Figur 3: Årliga ekonomiska besparingar för omsättningsscenarierna, inklusive osäkerhetsband.

Figur 3 visar att omsättningsscenario 3 medför den största besparingen vilken uppgår till 548 000 kr/år, att jämföra med scenario 2 som ger 193 000 kr/år. Den huvudsakliga besparingen beror på minskat fjärrvärmebehov. Värmebesparingen utgör cirka 85 % av den totala besparingen i scenario 3.

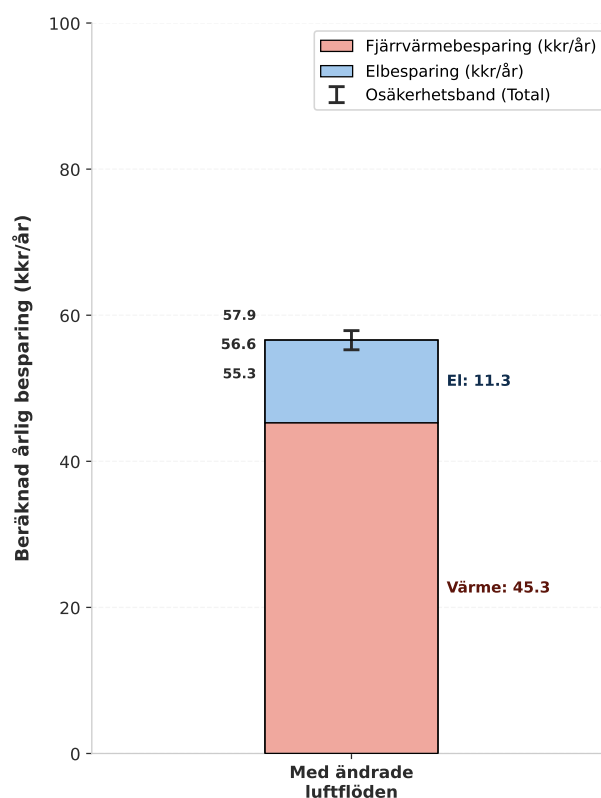
3.1.2 Minskad luftomsättning i kontor



Figur 4: Årlig el- och värmeanvändning vid ändrade luftflöden för kontoret med osäkerhetsband.

En sänkning av luftflödena i kontorslokalerna reducerar den årliga energianvändningen för både el och fjärrvärme. Figur 4 visar att den totala elanvändningen minskar från 193 MWh/år till 178 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 176 och 180 MWh/år). För luftbehandlingsaggregatet HA1 sjunker elanvändningen från 160 MWh/år till 156 MWh/år. Den totala fjärrvärmeanvändningen minskar från 1 680 MWh/år till 1 640 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 1 510 och 1 760 MWh/år). Energiminskningen förklaras av ett reducerat fläktarbete och ett minskat uppvärmningsbehov för ventilationsluften under kalla perioder.

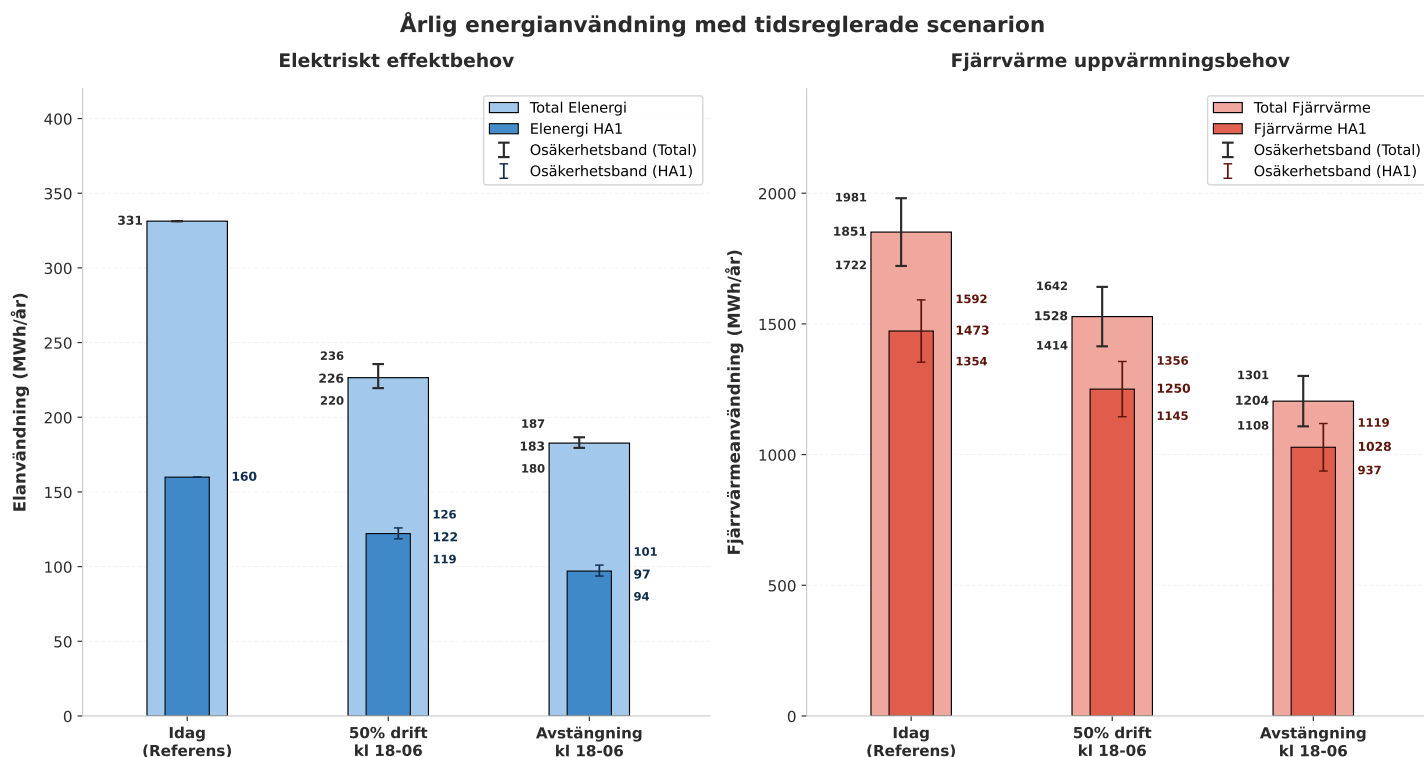
Årliga ekonomiska besparingar med ändrade luftflöden



Figur 5: Sammanställning av årliga kostnadsbesparingar jämfört med referensdriften.

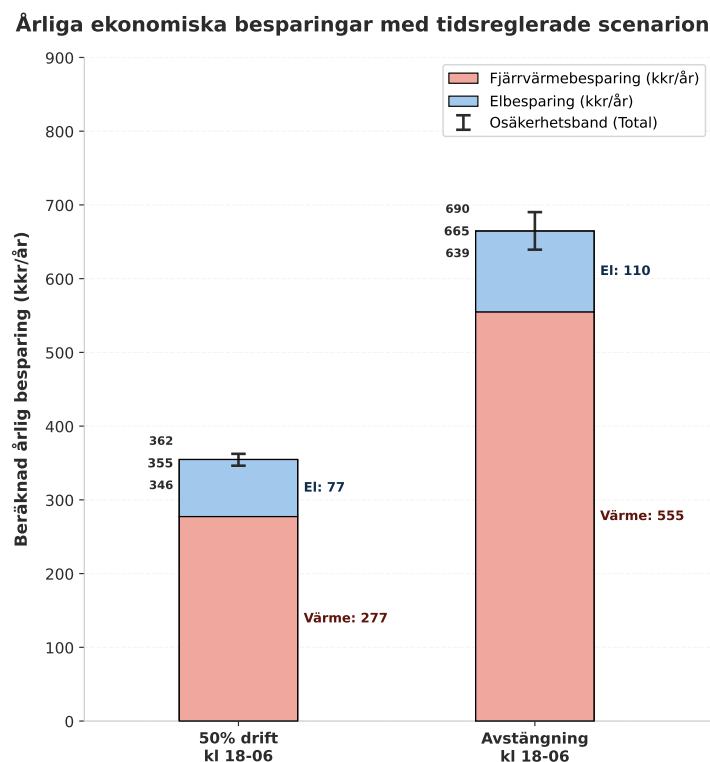
De reducerade energiflödena medför årliga kostnadsbesparingar. Enligt figur 5 uppgår den totala kostnadsbesparingen till 56,6 kkr/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 55,3 och 57,9 kkr/år). Fjärrvärmebesparingen bidrar med 45,3 kkr/år och elbesparingen med resterande 11,3 kkr/år. Åtgärden är därmed ekonomiskt lönsam trots osäkerheter i simuleringsmodellerna.

3.2 Tidsstyrd ventilation



Figur 6: Årlig el- och värmeanvändning vid tidsreglering för de tre driftscenarierna med osäkerhetsband.

En tidsstyrning av ventilationssystemet under nattetid reducerar den årliga energianvändningen för samtliga studerade aggregat. Enligt figur 6 sjunker den totala elanvändningen från 331 MWh/år till 227 MWh/år vid 50 % drift, och till 183 MWh/år vid nattavstängning. Fjärrvärmeanvändningen reduceras från 1 850 MWh/år till 1 530 MWh/år respektive 1 200 MWh/år. För luftbehandlingsaggregatet HA1 sjunker elanvändningen från 160 MWh/år till 122 MWh/år respektive 97,0 MWh/år. Det reducerade driftbehovet nattetid minskar både elbehovet och uppvärmningsbehovet.

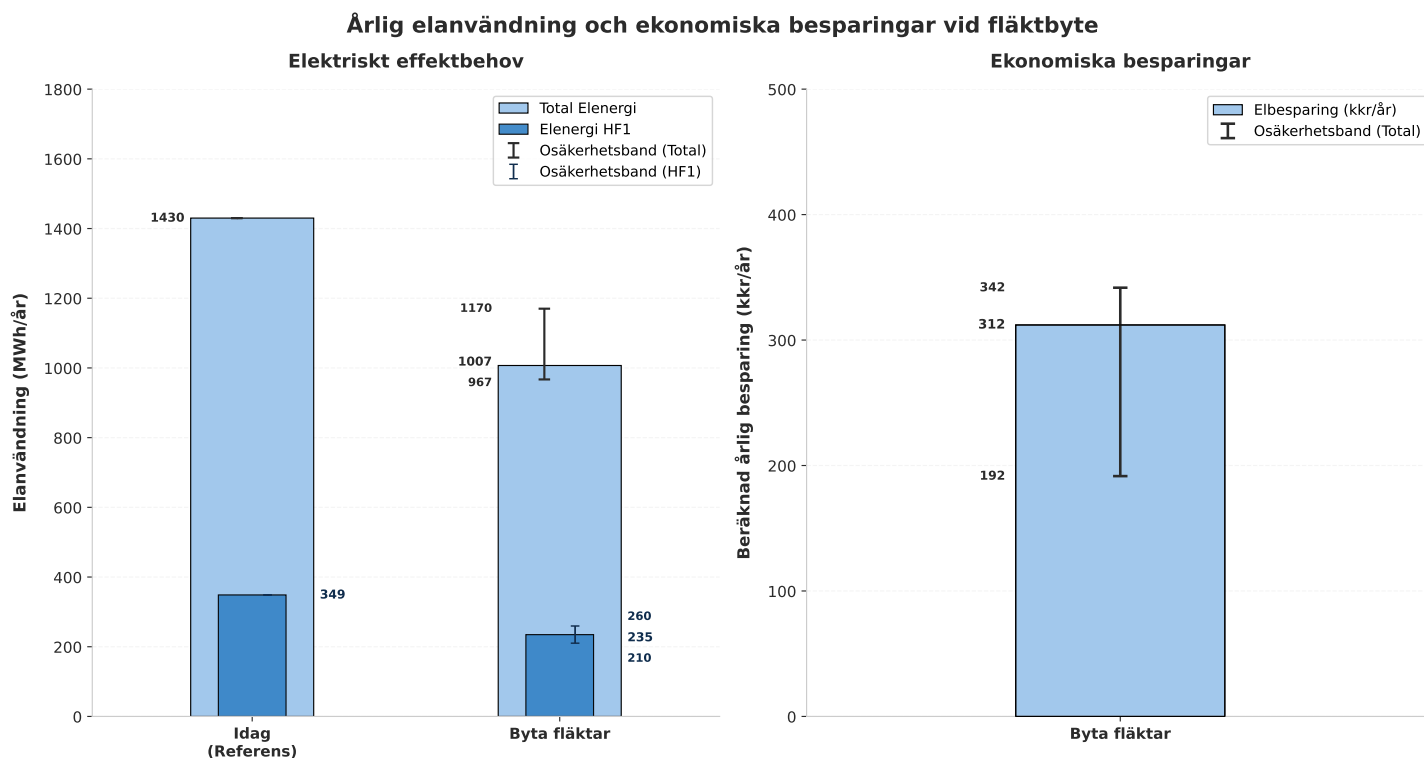


Figur 7: Sammanställning av årliga kostnadsbesparingar jämfört med referensdriften.

Den minskade energianvändningen medför kostnadsbesparingar jämfört med referensdriften. Enligt figur 7 uppgår den totala besparingen till 355 kkr/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 346 och 362 kkr/år) vid 50 % drift. Fjärrvärmebesparingen utgör 277 kkr/år av denna summa och elbesparingen 77,4 kkr/år. Vid nattavstängning uppgår den totala årliga besparingen till 665 kkr/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 639 och 690 kkr/år). Fjärrvärmebesparingen bidrar med 555 kkr/år och elbesparingen med 110 kkr/år. Driftscenario med nattavstängning utgör därmed den mest lönsamma åtgärden i studien.

3.3 Byte av komponenter

Resultaten omfattar de fläktar som identifierades ha besparingspotential. Samtliga analyserade aggregat uppvisar positiva besparingar inom hela sitt osäkerhetsintervall. Det sammanlagda resultatet redovisas för hela åtgärden, men detaljerade värden för enskilda aggregat återfinns i projektets beräkningsunderlag.

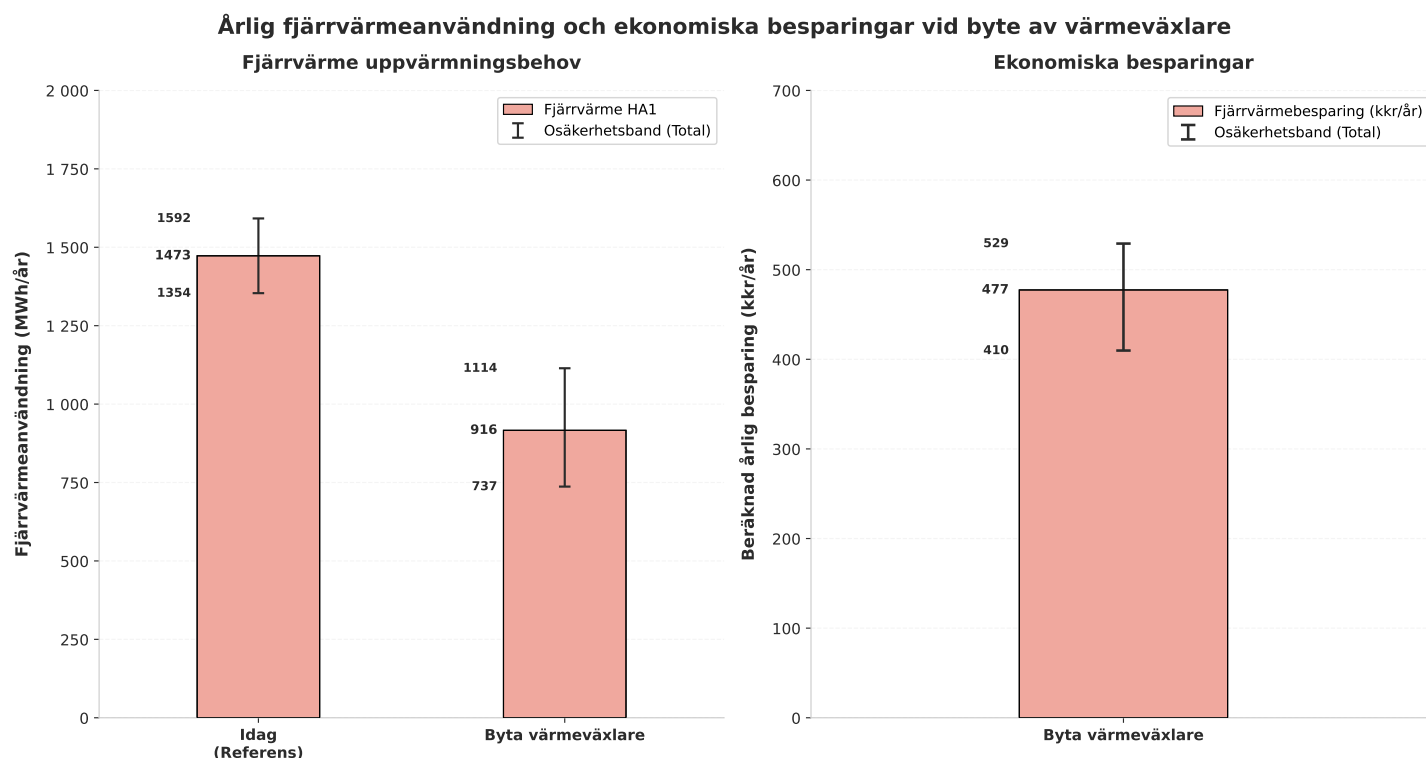


Figur 8: Sammanställning av elanvändning och ekonomisk besparing vid byte till EC-fläktar.

Ett byte av befintliga fläktar till EC-fläktar reducerar den årliga elanvändningen. Enligt figur 8 minskar den totala elanvändningen från 1 430 MWh/år till 1 010 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 967 och 1 170 MWh/år). För aggregat HF1 sjunker elanvändningen från 349 MWh/år till 235 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 210 och 260 MWh/år). Reduktionen motsvarar en minskning av elbehovet med cirka 30 % jämfört med referensscenariot vilket bekräftar åtgärdens potential.

Den minskade elanvändningen medför en årlig kostnadsbesparing. Figur 8 visar att åtgärden medför en beräknad årlig besparing på 312 kkr/år. Även under ogynnsamma förutsättningar uppgår den lägsta besparingen till 192 kkr/år medan det mest fördelaktiga fallet kan ge upp till 342 kkr/år. Investeringen medför låg ekonomisk risk eftersom samtliga scenarier inom osäkerhetsintervallet resulterar i positiv lönsamhet.

3.3.1 Vätskekopplad värmeåtervinning

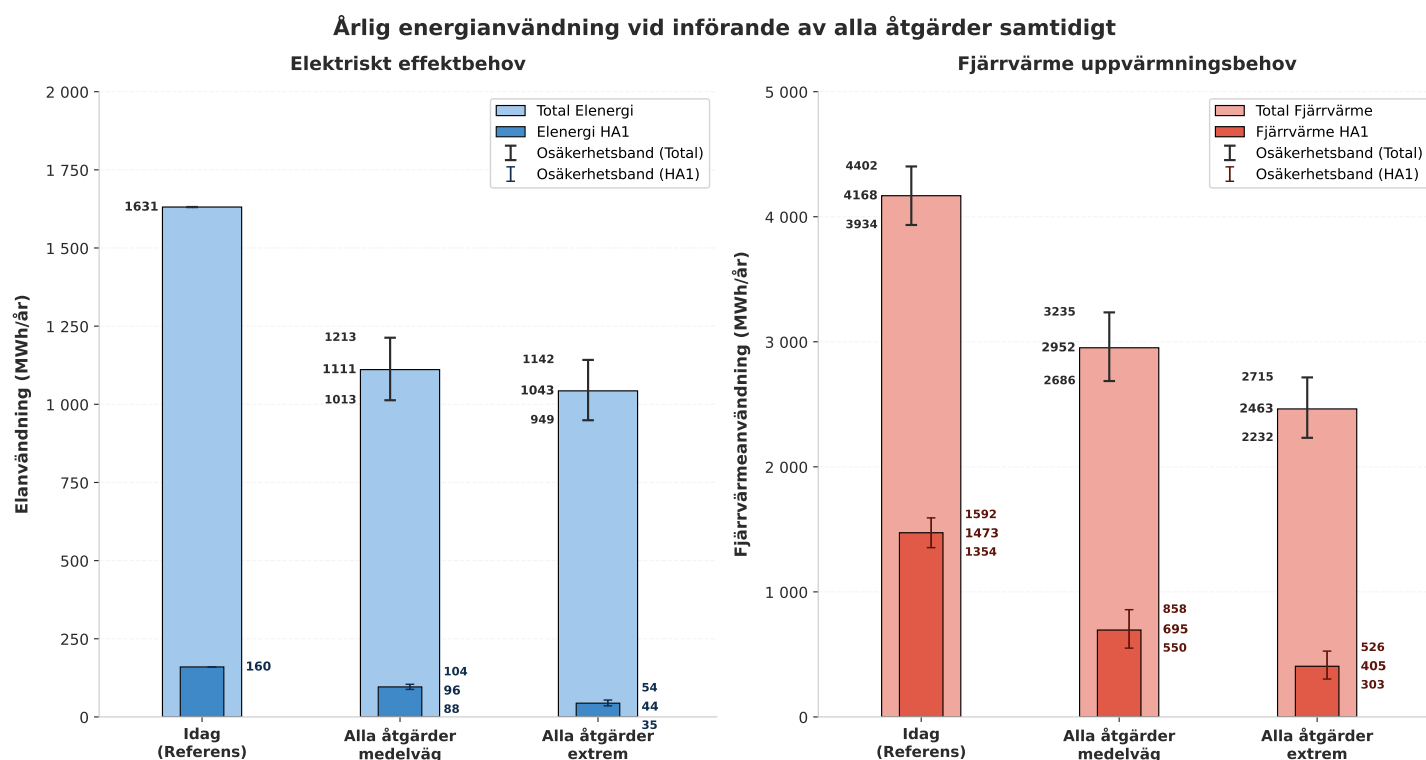


Figur 9: Sammanställning av årlig fjärrvärmeanvändning och kostnadsbesparing vid utbyte av värmeväxlare.

En uppgradering av värmeåtervinningsbatterierna i aggregat HA1 ger en minskning av den årliga fjärrvärmeanvändningen. Enligt figur 9 reduceras fjärrvärmebehovet för HA1 från 1 470 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 1 350 och 1 590 MWh/år) till 916 MWh/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 737 och 1 110 MWh/år) efter byte av värmeväxlare. Genom denna optimering höjs systemets temperaturverkningsgrad till 60 %. Den högre återvinningsgraden minskar energiförlusterna i frånluften och sänker behovet av köpt fjärrvärme för uppvärmning av tilluften.

Den reducerade värmeanvändningen medför årliga kostnadsbesparingar för fastighetsdriften. Figur 9 visar att åtgärden medför en beräknad årlig besparing på 477 kkr/år. Även i det minst gynnsamma scenariot uppgår besparingen till 410 kkr/år och kan under optimala förhållanden nå upp till 529 kkr/år. Projektets ekonomiska risk är därmed låg eftersom besparingen förblir hög i samtliga simulerade driftfall.

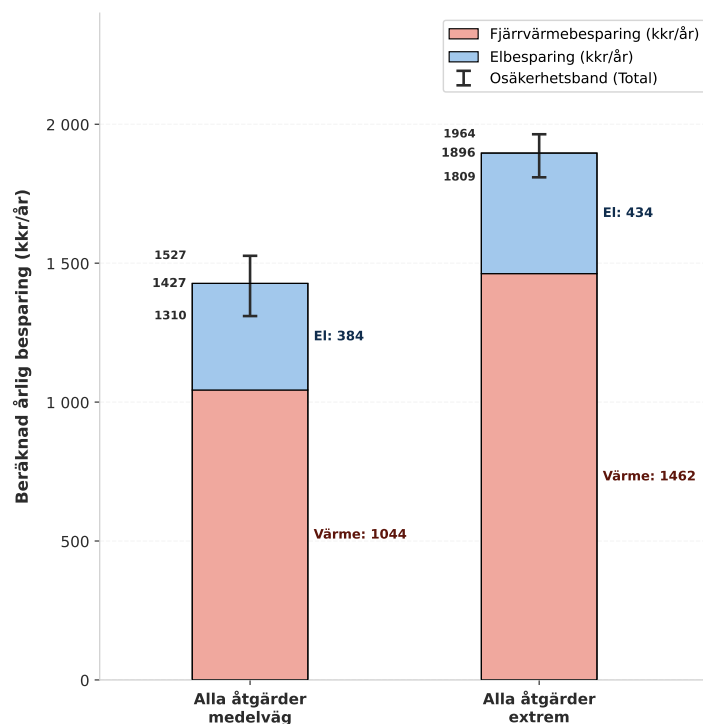
3.4 Kombinerad effekt av samtliga åtgärder



Figur 10: Sammanställning av årlig el- och fjärrvärmeanvändning jämfört med referensdriften, baserat på medel- och extremfall.

Att implementera samtliga energieffektiviseringsåtgärder parallellt resulterar i en sänkning av fastighetens totala energibehov. Enligt figur 10 minskar den totala elanvändningen från 1 630 MWh/år till 1 110 MWh/år i medelvågsscenarioet (med ett osäkerhetsintervall mellan 1 010 och 1 210 MWh/år) och till 1 040 MWh/år i extremscenarioet (med ett osäkerhetsintervall mellan 949 och 1 140 MWh/år). Fjärrvärmeanvändningen minskar från 4 170 MWh/år till 2 950 MWh/år respektive 2 460 MWh/år. För aggregat HA1 minskar elanvändningen från 160 MWh/år till 96,0 MWh/år respektive 44,0 MWh/år samtidigt som dess fjärrvärmeanvändning faller från 1 470 MWh/år till 695 MWh/år respektive 405 MWh/år. De sammanslagna åtgärderna eliminerar en betydande del av energiförlusterna vilket leder till en mer resilient fastighetsdrift.

Årliga ekonomiska besparingar vid införande av alla åtgärder samtidigt



Figur 11: Sammanställning av årliga kostnadsbesparingar jämfört med referensdriften.

De sammantagna energibesparingarna medför årliga ekonomiska besparingar för verksamheten. Enligt figur 11 uppgår den beräknade totala besparingen till 1 430 kkr/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 1 310 och 1 530 kkr/år) för medelvägsscenarioet. I detta scenario bidrar värmebesparingen med 1 040 kkr/år och elbesparingen med 384 kkr/år. Om extremscenarioet realiserar ökar den totala besparingen till 1 900 kkr/år (med ett osäkerhetsintervall mellan 1 810 och 1 960 kkr/år) där värmebesparingen står för 1 460 kkr/år och elbesparingen för 434 kkr/år. Investeringarna medför hög ekonomisk avkastning oavsett vilket av scenarierna som realiserar.

4 Diskussion

I denna studie har vi utgått från ett idealt scenario där de utbytta komponenterna presterar med maximal verkningsgrad och där den lägsta luftomsättningen som krävs enligt lagstiftning antas vara tillräcklig. Vi är dock medvetna om att det i praktiken finns flera faktorer som komplicerar implementeringen av dessa åtgärder.

I resultaten redovisas osäkerhetsband som motsvarar känslighetsanalysen. Det är intressant att notera att det simulerade *bästa fallet* (med gynnsammare parametrar för driften) inte leder till den största ekonomiska besparingen. I stället gav *värsta fallet* (med lägre fläktexponent och lägre utomhustemperaturer) den största absoluta kostnadsminskningen. Detta förklaras av att känslighetsanalysen tillämpar scenario-specifika baslinjer, *värsta fallet* utgår från en betydligt högre initial referensförbrukning vilket ger utrymme för en större absolut energireducering, trots att *bästa fallet* är mer energieffektivt i absoluta tal.

Osäkerheter som inte omfattades av känslighetsanalysen inkluderar brister i underlaget från Cytivas historiska driftdata från 2022. Vi identifierade inkonsekvenser i hur temperaturer registrerats, där medelvärden har använts i vissa fall och faktiska mätvärden i andra. Dessutom saknas vissa aggregat i de äldre ventilationskartorna från tidigt 2000-tal trots att de ingår i driftdata. En fysisk avvikelse är ett nytt trapphus anslutet till en av produktionshallarna med undertryck vilket orsakar ett oavsiktligt luftläckage. Vi bedömer detta som en konstruktionsbrist som bör åtgärdas för att minska onödiga värmeförluster.

4.1 Jämförelse med tidigare studier

De omfattande energibesparingspotentialer som identifierats i vår studie av Hus C ligger i linje med den etablerade forskningen kring behovsstyrd ventilation (DCV) i olika typer av fastigheter.

Tidigare studier av Mysen m.fl. (2005), Hesaraki och Holmberg (2015) samt Merema m.fl. (2018) bekräftar samstämmigt att en optimering av luftflöden efter det faktiska behovet genererar stora, mätbara reduktioner av den totala energianvändningen. Där Mysen m.fl. (2005) fann att ventilationens energianvändning i kommersiella och offentliga miljöer kunde reduceras till mellan 38 % och 51 % av det ursprungliga behovet, påvisade Merema m.fl. (2018) genom fältmätningar en sänkning av fläktenergin med 25–55 % och en minskning av de ventilationsrelaterade värmeförlusterna med 25–32 %. Vidare undersökte Hesaraki och Holmberg (2015) DCV i bostadsbyggnader och rapporterade specifika energibesparingar för uppvärmning av ventilationsluft på 20 % samt en minskad elförbrukning för fläktar med 30 % jämfört med konstanta flöden. Dessa intervall och procentsatser korrelerar mycket väl med de resultat vi erhållit för Hus C, där exempelvis installationen av moderna fläktar beräknas sänka elbehovet med just 30 %, medan tidsreglerad drift sänker energianvändningen med närmare 20 % lokalt.

Även om potentialen för energibesparing är universell över olika sektorer, belyser en jämförelse med dessa studier de unika tekniska och säkerhetsmässiga utmaningar som präglar en biokemisk processindustri jämfört med konventionella lokaler. Tidigare forskning fokuserar primärt på bostäder, utbildnings- och kontorsbyggnader, där ventilationen dimensioneras och styrs utifrån personbelastning, koldioxidhalter (CO_2) och allmän inomhusluftkvalitet.

I en ATEX-klassad miljö, som hos Cytiva, blir styrsignalerna och kraven betydligt mer

komplexa. Här väger säkerhetsaspekter såsom kontroll av toxiska utsläpp och explosionsrisker tyngre än renodlad personkomfort. Vårt Scenario 3 med VOC-sensorer i processhallarna kan ses som en industriell motsvarighet till de DCV-system som beskrivs i den tidigare forskningen, men där driften begränsas av strikta regulatoriska ramverk (såsom AFS 2023:14) och behovet av kontinuerliga LEL-kalkyler i stället för enkla CO_2 -mätningar.

Slutligen ger sammanslagningen av denna forskning ett starkt akademiskt stöd för de specifika åtgärdsområden vi analyserat, samt förhållandet mellan el- och värmebesparing. Merema m.fl. (2018) belyser vikten av lessons learnt från verkliga fallstudier där system i praktiken ofta är felinställda för den verksamhet som bedrivs, vilket direkt speglar vår upptäckt av det ombyggda laboratoriet som fortfarande ventilerades med ursprungliga, höga flöden. Både Mysen m.fl. (2005), Merema m.fl. (2018) och Hesarakis och Holmberg (2015) understryker dessutom dualiteten i att spara både el och värme. I vårt klimat i Uppsala så blir det i likhet med deras slutsatser tydligt att den linjära kopplingen mellan flöde och värmebehov gör att de termiska besparingarna står för den absolut största ekonomiska drivkraften (cirka 85 % i omsättningsscenario 3). Detta visar att även om fläktelens besparingspotential är betydande och väl dokumenterad i forskningen, är det optimeringen av det termiska systemet och minskningen av ventilationsförluster som genererar de största ekonomiska vinsterna för fastighetsdriften.

4.2 Minskad luftomsättning i lokalutrymmen

Minskad luftomsättning utgör en central metod för att optimera energianvändningen genom att anpassa luftflödena efter det faktiska behovet. Genom granskning av driftförutsättningarna i processhallar och kontorsutrymmen kan onödig ventilation identifieras och reduceras. Nedan diskuteras potentialen för flödesreducering inom dessa zoner tillsammans med tillhörande begränsningar och osäkerheter.

4.2.1 Processhallar

Studien visar att en övergång till behovsstyrd ventilation medför betydande ekonomiska besparingar. Scenario 3 resulterade i en besparing på 548 kkr/år (figur 3) vilket motiverar en teknisk uppgradering med LEL-sensorer. Som jämförelse gav det enklare scenario 2 en besparing på 193 kkr/år. Vidare framgår av figur 3 att den enskilt största ekonomiska besparingen kommer från reducerad värmeanvändning.

Eftersom flödesreduceringen är balanserad (tillufts- och frånluftsflödena minskas i motsvarande grad) sjunker det totala uppvärmningsbehovet. Det reducerade frånluftsflödet innebär visserligen att mindre energi återvinns, men denna effekt kompenseras av det minskade tilluftsbehovet. Enligt data från Cytiva täcker den återvunna värmen i huvudaggregatet (HA1) 36 % av uppvärmningsbehovet. Det innebär att 64 % av det minskade värmebehovet utgörs av en direkt besparing av köpt fjärrvärme vilket är den primära drivkraften bakom kostnadsminskningen.

En observation i resultaten är att elbesparingens procentuella andel av den totala besparingen minskar mellan scenario 2 och scenario 3 (figur 3). Detta illustrerar fläktlagarnas kubiska natur; när flödena har reducerats drivs fläktarna redan med låg effekt varvid den marginella elbesparingen av ytterligare flödessänkningar blir liten. Värmebehovet är däremot linjärt kopplat till flödet vilket innebär att ytterligare sänkningar av luftomsättningen

och ökad drifttid i lågflödesläge fortsätter att generera betydande besparingar i fjärrvärme.

Resultaten för den minskade luftomsättningen (figur 2) visar en betydande reduktion av både el- och värmebehovet där scenario 3 ger den största besparingen (112 MWh/år för el och 543 MWh/år för fjärrvärme). En viktig observation är att osäkerhetsbandet för fjärrvärmebesparingen är bredare än för elen. Detta kan härledas till den inbyggda osäkerheten i temperaturantagandena; eftersom väderdata varierar mellan åren påverkas det termiska uppvärmningsbehovet direkt av utomhusklimatet. Fläktarnas elbehov är däremot oberoende av utomhustemperaturen vilket resulterar i en mer förutsägbar besparingskalkyl.

4.2.2 Kontor

Vid undersökningen av hus C framkom att vissa lokaler har byggts om. Detta visar att historiska data och ventilationskartor inte alltid överensstämmer med verkligheten. I studien identifierades ett exempel på detta där ett laboratorium hade byggts om till kontor och godsmottagning utan att luftflödet justerats till lämpliga nivåer. Eftersom kartorna var svårtolkade är det möjligt att fler rum har byggts om men fortfarande har kvar de ursprungliga ventilationsinställningarna. Detta bör undersökas vidare vid framtida ventilationsåtgärder i hus C.

4.2.3 Begränsningar och osäkerheter

I arbetet togs inte hänsyn till specifika LEL-kalkyler för de ämnen som hanteras i de ATEX-klassade lokalerna vilket kan motivera ett högre flöde på allmänventilationen.

Vid granskning av insamlad mätdata för de ATEX-klassade lokalerna identifierades avvikande och fysiskt orimliga luftomsättningstal. Eftersom den bakomliggande orsaken till dessa extremvärden inte kunde fastställas exkluderades dessa datapunkter från beräkningsmodellen för att säkerställa resultatets tillförlitlighet.

För den processhall med öppen hantering som inkluderades i modellen indikerade mätdata ett luftomsättningstal på 44 oms/h. Detta värde översteg kraftigt vad till- och frånluftsaggregaten var dimensionerade för. Om 44 oms/h hade applicerats i modellen hade en teoretisk flödesreducering resulterat i negativa värden för tilluftsflödet. Följaktligen korrigerades detta i beräkningarna och ett representativt projekterat värde på 24 oms/h antogs i stället.

På grund av en generell brist på uppmätta luftomsättningstal gjordes en avgränsning där fyra processhallar, av totalt 25 ATEX-klassade utrymmen, valdes ut för att utgöra beräkningsunderlaget i modellen.

4.3 Tidsstyrning

Resultaten visar att det finns betydande energimässiga och ekonomiska besparingar att hämta genom att reducera luftflödena under obemannad tid mellan klockan 18:00 och 06:00. Genom att halvera luftflödena (scenario 2) minskar den totala el- och fjärrvärmeanvändningen för hela industrianläggningens ventilationssystem med cirka 1,65 % vilket ger en årlig besparing på cirka 355 000 kr. Om ventilationen stängs av helt under dessa timmar (scenario 3) uppgår den beräknade besparingen till cirka 665 000 kr. Scenario 3 är dock inte avsett

för praktisk implementering i anläggningen utan fungerar i stället som en teoretisk referenspunkt för att belysa den maximala besparingspotentialen. Ytterligare undersökningar krävs för att avgöra vilka luftflöden som faktiskt krävs samt om det är möjligt att stänga av ventilationen ur ett arbetsmiljöperspektiv under obemannad tid.

Ställytorna och våtfyllningsdelen utgör en gråzon i förhållande till tidsstyrningsmodellen. Under dagtid kräver ställytorna minst 6 oms/h och våtfyllningsdelen 20 oms/h på grund av öppen kemikaliehantering. I arbetet har dessa ytor antagits kunna behandlas som allmänna ytor under obemannad tid eftersom ingen produkthantering sker och risken för läckage nattetid bedöms vara minimal. Huruvida denna tillfälliga nedklassning är förenlig med gällande ATEX-regelverk är oklart och kräver vidare utredning.

Elcentralerna och steriliseringsrummen exkluderades från tidsstyrningsmodellen eftersom dessa kräver kontinuerlig kylning för att förhindra överhettning av temperaturkänslig utrustning. Dessa utrymmen genererar även spillvärme med hög återvinningspotential vilket skulle minska mängden återvunnen värme i systemet om luftflödet reducerades. Beräkningsmodellen inkluderar dock inte spillvärme vilket motiverar att utrymmena exkluderades.

4.4 Byte av komponenter

I detta avsnitt diskuteras resultaten från de analyserade komponentbytena och hur dessa påverkar energianvändningen i C-husets ventilationssystem. Fokus ligger på att tolka resultaten av fläktbyten samt uppgraderad värmeåtervinning. Vidare belyses de viktigaste osäkerheterna som påverkar resultatens tillförlitlighet.

4.4.1 Byte till EC-fläkt

Resultaten visar att ett byte till EC-fläktar ger energibesparingar för både ventilations-systemet och hus C som helhet. Då samma tryckfall bibehålls i systemet kan besparingen förklaras av skillnader i fläktarnas verkningsgrad. De beräknade resultaten ligger i nivå med vad som rapporteras inom branschen där retrofit-projekt enligt tillverkaren ebm-papst ofta uppvisar energibesparingar på 30–50 % (ebm-papst, 2024). Samtidigt bör uppgifterna tolkas med viss försiktighet eftersom källan är en kommersiell aktör. Känslighetsanalysen visar dessutom att energibesparingen är relativt stabil vid variationer i verkningsgraden. Detta tyder på att slutsatserna är robusta trots osäkerheter i indata.

En osäkerhet i studien är avvikelser i Cytivas historiska driftdata från 2022. Ett exempel är att den rapporterade eleffekten inte överensstämmer med produkten av det uppmätta luftflödet och det angivna SFP-värdet. Detta tyder på osäkerhet i parametrarna. En tänkbar förklaring är att mätningarna utfördes vid olika tidpunkter under varierande driftförhållanden, eller att felregistreringar har förekommit.

För att hantera denna osäkerhet valdes SFP-värdet som den mest osäkra parametern. Eleffekten är direkt uppmätt och bedömdes därför som mer tillförlitlig, och även luftflödet antogs vara stabilt över tid. Eftersom SFP är ett härlett värde som påverkas av båda dessa mätningar utgör det den parameter där fel riskerar att ge störst genomslag. SFP beräknades därför utifrån de två mer tillförlitliga parametrarna vilket minskar risken för att inkonsekventa mätningar påverkar resultatet.

En osäkerhet i arbetet är att systemets tryckfall endast är uppskattat och baseras på typiska värden samt antaganden om verkningsgraden då exakta data saknas. Detta innebär att driftpunkten och effektbehovet för de nya fläktarna inte är helt exakta. Med tillgång till uppmätta data hade verkningsgraden för respektive aggregat kunnat bestämmas och integreras i modellen. Osäkerheten i verkningsgradsberäkningarna för komponentbytena propagerar därmed vidare till tidsstyrningsmodellen vars dellastberäkningar bygger på samma fläktparametrar.

4.4.2 Vätskekopplad värmeåtervinning

Resultatet för den föreslagna åtgärden visar att en uppgradering till en temperaturverkningsgrad på 60 % är ett fördelaktigt alternativ för aggregat HA1. Även om det är teoretiskt möjligt att nå 70–80 % i helt nybyggda system med optimala luftvägar begränsas denna anläggning av de befintliga plåthöljernas fysiska dimensioner. Om ett kraftigt överdimensionerat batteri installeras i ett äldre hölje uppstår ett högt luftmotstånd vilket leder till ökad elanvändning. En temperaturverkningsgrad på cirka 60 % bedöms därför vara en avvägd kompromiss mellan värmebesparing och ökning av fläktel. Denna nivå lyfter anläggningen i hus C1a–C1c från en ineffektiv drift (36 %) till att prestera över branschnittet för befintliga anläggningar vilket normalt uppgår till 44–50 %.

En naturlig förlängning av denna studie är att utreda möjligheten att ersätta delar av fjärrvärmebehovet med ett värmepumpsystem. Eftersom fjärrvärmepriset överstiger elpriset ger ett sådant system förutsättningar för en betydande ekonomisk besparing utan att energianvändningen ökar i absoluta termer. Vi föreslår att en sådan utredning genomförs som ett separat arbete med fokus på vilken typ av värmepump som är tekniskt lämplig givet anläggningens befintliga infrastruktur.

4.5 Sammanställda scenariot

En osäkerhet i det sammanställda scenariot är att åtgärderna inte är oberoende av varandra. Valet av EC-fläkt och dess dimensionering baserades på en specifik driftpunkt med givna flöden och tryckfall. Om luftomsättningen senare sänks eller driften tidsstyrs kan den faktiska driftpunkten förskjutas vilket gör att fläkten inte längre arbetar inom sitt mest optimala område. Detta kan påverka både verkningsgrad och SFP-värde samt i vissa fall innebära att en annan fläktstorlek hade varit mer lämplig. Det kombinerade fallet bör därför betraktas som ett samlat designbeslut där komponentvalet måste fungera även efter framtida förändringar.

4.6 Användning av AI

Artificiell intelligens (AI) har använts i arbetet för tre huvudsakliga ändamål: källkritik, kodning och språklig granskning. Inledningsvis har AI använts som ett stöd för att diskutera rimligheten och tillförlitligheten i de källor som ligger till grund för studien. Vidare har verktyget använts som stöd för att skriva Python-skript i syfte att generera och visualisera studiens resultatgrafer. Slutligen har AI använts för språklig bearbetning för att säkerställa en akademisk formalia. Detta har främst inneburit kontroll av tempus, korrigering av perspektiv samt borttagning av talspråk.

5 Slutsatser

Studien visar att det är möjligt att reducera energianvändningen och driftkostnader, inklusive elförbrukning och ventilationsförluster, i en byggnad för bioteknisk verksamhet genom att effektivisera ventilationssystemet. Tre åtgärder har analyserats för att uppnå reduktionen av energianvändning och driftkostnader: Sänkning av luftomsättningstal i processhallar, tidsstyrning av ventilation och byte av ventilationskomponenter. Vid sänkning av antalet luftomsättningar i processhallar uppgår minskningen av energianvändningen till 33 %. Den reglerade tidsstyrningen uppskattas bidra till en minskning av energianvändningen på 20 % lokalt. Den sistnämnda åtgärden beräknas sänka elbehovet med 30 % och värmebehovet med 38 %.

Genom att kombinera dessa fyra åtgärder beräknas den totala energibesparingen uppgå till maximalt 5,8 % för medelvägen och 7,7 % för extremfallet. I medelvägen ingår det reducerade scenariot i tidsstyrningen med 50 % reducerat luftflöde för allmänna utrymmen, scenario 2 i reduktion av omsättningstal till 10 oms/h i processhallarna samt byte till EC-fläktar och uppgradering av värmeåtervinningsbatterier. I extremfallet ingår det alternerande scenariot i tidsstyrningen med avstängt luftflöde, scenario 3 i reduktion av omsättningstal till 6 oms/h i processhallarna samt byte till EC-fläktar och uppgradering av värmeåtervinningsbatterierna.

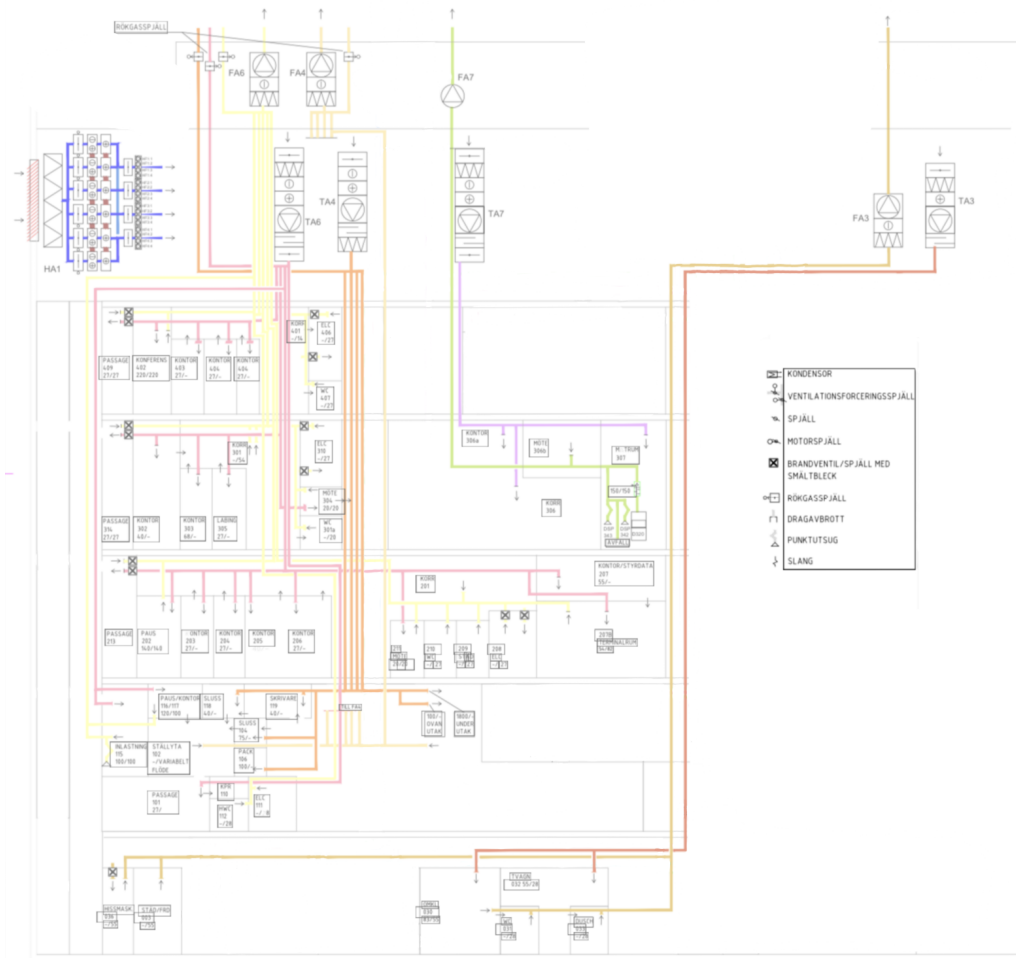
Av medelvägens besparing utgörs 520 MWh/år av elanvändning och 1 220 MWh/år av fjärrvärme, vilket motsvarar en årlig kostnadsminskning på 1 430 000 kronor. För extremfallet utgörs besparingen av 588 MWh/år elanvändning och 1 710 MWh/år fjärrvärme, vilket motsvarar en årlig kostnadsminskning på 1 900 000 kronor. Detta visar att det även i verksamheter med höga säkerhetskrav på inomhusklimatet finns en betydande outnyttjad potential att optimera energianvändningen.

Referenser

- AFS 2023:14. *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om gränsvärden för luftvägsexponering i arbetsmiljön*. <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202314/>
- AFS 2023:10. *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om risker i arbetsmiljön*. <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202310/>
- Arbetsmiljöverket (2023). *ATEX och explosiv miljö*. <https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/brand-och-explosion/atex/> [Hämtad: 7 april 2026]
- Bell, G.C. (2008). *Optimizing Laboratory Ventilation Rates. (Laboratories for the 21st Century: Best Practice Guide)*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Department of Energy.
- Cengel, Y.A. & Cimbala, J.M. (2022). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*.
- Dalenbäck, J.O. (2019). *Optimering av vätskekopplade värmeåtervinningssystem: Förstudie och mätningar*. Stockholm: Belok / Energimyndigheten.
- Ebm-papst. (2024). *Fan Selection Tool (produktinformation och valverktyg)*. ebmpapst.se. Tillgänglig: <https://ebmpapst.se/sv/produkter/Kammarfl%C3%A4ktar/K3G-Kammarfl%C3%A4kt-EC-f%C3%B6r-v%C3%A4ggmontage/> [Hämtad: 12 maj 2026].
- Cytiva. (2026). *Flödesschema luftbehandling Hus C1a*. Dokument H-LB-C1A-300. Internt dokument, ej publicerat.
- Energimarknadsinspektionen. (2026). *Det här är fjärrvärme*. <https://ei.se/konsument/fjarrvarme/det-har-ar-fjarrvarme> [Hämtad: 15 april 2026]
- Energimyndigheten. (2024). *Användning av energi*. <https://www.energimyndigheten.se/energisystem-och-analys/sveriges-energisystem/hur-fungerar-energisystemet/energianvandning/> [Hämtad: 15 april 2026]
- Energimyndigheten (2023). *Energieffektivisering i industrin*. <https://www.energimyndigheten.se/> [Hämtad: 13 juni 2026]
- FoHMFS 2014:18. Folkhälsomyndighetens allmänna råd om ventilation. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/641784832543443ea4eebe9b300c244e/fohmfs-2014-18.pdf>
- Health and Safety Executive (2004). *Hazardous Area Classification and Control of Ignition*. <https://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareacclas.htm> [Hämtad: 25 april 2026].
- Hesarakı, A. & Holmberg, S. (2015). Demand-controlled ventilation in new residential buildings: consequences on indoor air quality and energy savings. *Indoor and Built Environment*, 24(2), 162–173.
- Lindström, Erik. (2024). *Slutgiltig statistik för el och fjärrvärme*. Energimyndigheten. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2025/slutgiltig-statistik-for-el-och-fjarrvarme-2024/> [Hämtad: 7 april 2026]

- Merema, B., Delwati, M., Sourbron, M. & Breesch, H. (2018). Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies. *Energy and Buildings*, 172, 349–360.
- Moser, D. (2024). *To Affinity... and Beyond! Estimating VFD Power Draw from Motor Speed*. ASHRAE Journal. <https://www.scribd.com/document/767791316/Estimating-VFD-Power-Draw-From-Motor-Speed>
- Myndigheten för civilt försvar (2026). *Explosiv atmosfär*. <https://www.mcf.se/sv/arnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/brandfarligt-och-explosivt/brandfarliga-varor/explosiv-atmosfar/> [Hämtad: 25 april 2026].
- Mysen, M., Berntsen, S., Nafstad, P. & Schild, P. G. (2005). Occupational health and energy saving potential of demand-controlled ventilation in educational buildings. *Building and Environment*, 40(12), 1586–1593.
- Naturvårdsverket (2024). *Klimat och energiomställning*. <https://www.naturvardsverket.se/> [Hämtad: 13 juni 2026]
- Sharp, G. (2010). Demand-Based Control of Lab Air Change Rates. ASHRAE Journal, 52(2), ss. 30–41.
- Svensk Ventilation (2014). *Energieffektiv ventilation = God fastighetsekonomi*. https://www.svenskventilation.se/app/uploads/2014/07/Energieffektiv_ventilation_God_fastighetsekonomi_folder_4xA5.pdf [Hämtad: 11 maj 2026]
- Sveriges miljömål. 2025. *Begränsad klimatpåverkan*. Naturvårdsverket. <https://www.sverigesmiljomal.se/miljomalen/begransad-klimatpaverkan/> [Hämtad: 7 april 2026]
- SMHI (2026). Ladda ner väderobservationer: Lufttemperatur, momentanvärde för Uppsala Aut (Station 97510) [Datamängd]. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. <https://www.smhi.se/data/hitta-data-for-en-plats/ladda-ner-vaderobservationer/airtemperatureInstant/97510> [Hämtad: 22 maj 2026].
- Vattenfall (2025). *Nyckeltal & bränslemix 2025, Uppsala*. Vattenfall. <https://www.vattenfall.se/siteassets/2.-foretag/fjarrvarme/miljovarden-och-hallbarhet/miljorapporter---nyckeltal-och-branslemix/nyckeltal-och-branslemix-2025- uppsala.pdf> [Hämtad: 13 juni 2026]

A Bilagor



Figur A.1: Ventilationskarta över allmänventilation i hus C1a (Cytiva, 2026).

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) och Uppsala universitet (UU) kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU alternativt UU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket på respektive universitet.

Publiceras vid: SLU (Epsilon)

JA, jag Nora Sivars har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag Caitlin Rorabaugh har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag Agatha Boye Niemelä har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag William Voss har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag August Karlsson har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag Isak Westlander har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.

JA, jag William Ernlund har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta.