



Examensarbete inom medicinsk teknik

Grundnivå, 15 hp

# Energibesparing i operationsmiljöer

Fokus på ventilation i operationssal

**AWSAM NABIL HANNA  
DAN SOLOMONSEN**





# **Energibesparing i operationsmiljöer**

## **Energy Conservation in Operation Environment**

**Fokus på ventilation i operationssal**  
**Focusing on Ventilation in the Operating Room**

Awsam Nabil Hanna  
Dan Solomonsen



## Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker möjligheten att sänka luftflödet i operationssalar för energibesparing, samtidigt som låga nivåer av kolonibildande enheter (CFU) och god arbetsmiljö bibehålls. Fokus ligger på teoretiska resultat som kan stödja framtida energibesparingar och undersöker olika ventilationssystem som påverkar CFU-nivåerna.

Studien betonar vikten av luftkvalitet i operationssalar för att minimera infektionsrisken. Vid Karolinska Universitetssjukhuset och andra sjukhus används HEPA 14-filtrer, och två vanliga ventilationssystem i Sverige är omblandad ventilation (TMA) och laminar airflow (LAF). Målet är att bibehålla  $\leq 5$  CFU/m<sup>3</sup> i operationssalar och undersöka om luftflödet kan minskas utan att kompromissa med säkerheten.

Syftet är att skapa en diskussion mellan vården och fastighetsägarna för att planera energibesparingar utan att påverka luftkvaliteten. Studien ställer frågor om möjligheten att spara energi med nuvarande system och hur minskat tilluftflöde påverkar patientsäkerheten och arbetsmiljön. Studien är teoretisk och baserad på befintliga system, medan praktiska tester inte ingår.

Examensarbetet behandlar mikrobiell kontaminering och ventilationssystemens roll i operationssalar, historiska och moderna tekniker för att minska luftburen smitta, samt fördelar med AI-kontrollerad ventilation. Det undersöker också hur arbetskläder påverkar spridningen av bakteriebärande partiklar.

Resultaten visar energiförbrukning, kostnader och CFU-nivåer, med jämförelser från andra europeiska länder med liknande klimat. För- och nackdelar med olika ventilationssystem diskuteras, med fokus på kostnader, energibesparing, och integration av smarta funktioner enligt nya skandinaviska standarder.

Slutsatsen är att det finns potential för energibesparingar genom att minska luftflödet, förutsatt att låga CFU-nivåer och god arbetsmiljö bibehålls. Vidare forskning och praktiska tester rekommenderas för att bekräfta de teoretiska resultaten.

## Nyckelord

Miljö, ventilation, luftflöde, operationssal, CFU, arbetsmiljö, källstyrka, HVAC, AI



## **Abstract**

This thesis examines the possibility of reducing airflow in operating rooms to save energy while maintaining low levels of colony-forming units (CFU) and ensuring a good working environment for staff and patients. The focus is on theoretical results that can support future energy savings and research various ventilation systems that affect CFU levels.

The study emphasizes the importance of air quality in operating rooms to minimize the risk of infections. At Karolinska University Hospital and other hospitals, HEPA 14 filters are used, and two common ventilation systems in Sweden are mixed ventilation and laminar airflow (LAF). The goal is to maintain  $\leq 5$  CFU/m<sup>3</sup> in operating rooms and to investigate whether the airflow can be reduced without compromising safety.

The purpose is to create a discussion between healthcare and property owners to plan energy savings without affecting air quality. The problem statement is a study for the possibility of saving energy with current systems and how reduced supply airflow affects patient safety and the working environment. The study is theoretical and based on existing systems, while practical tests are not included.

The thesis addresses microbial contamination and the role of ventilation systems in operating rooms, historical and modern techniques to reduce airborne infection, and the benefits of AI-controlled ventilation. It also investigates how work clothing affects the spread of bacteria-carrying particles.

The results show energy consumption, costs, and CFU levels, with comparisons from other European countries with similar climates. Pros and cons of different ventilation systems are discussed, focusing on costs, energy savings, and the integration of smart features according to new Scandinavian standards.

The conclusion is that there is potential for energy savings by reducing airflow, provided that low CFU levels and a good working environment are maintained. Further research and practical tests are recommended to confirm the theoretical results.

## **Keywords**

Environment, ventilation, air flow, operating room, CFU, work environment, source strength, HVAC, AI





## Förord

Vi vill börja med att rikta vårt största tack till Johan Nordenadler och Erik Sahlin för deras ovärderliga stöd och vägledning genom hela processen av detta examensarbete. Deras insikter och råd har varit avgörande för vårt arbete och har hjälpt oss att navigera genom de utmaningar som vi stött på.

Vi vill också tacka Locum AB för att ha gett oss möjligheten att genomföra detta examensarbete. Deras tillhandahållande av resurser och data har varit fundamentalt för genomförandet av våra studier. Deras tillit och stöd har gjort det möjligt för oss att utforska viktiga aspekter av energibesparing i operationsmiljöer.

Ett stort tack riktar vi även till vår handledare Mats Nilsson vid Kungliga Tekniska högskolan (KTH). Hans engagemang, omfattande kunskap och uppmuntran har varit ovärderliga genom hela vår studietid och specifikt under arbetet med denna rapport. Hans vägledning har inte bara varit avgörande för genomförandet av detta arbete, utan har också bidragit till vår professionella utveckling inom medicinsk teknik.

Vårt arbete har fokuserat på att undersöka möjligheterna för energibesparing i operations-salar, med ett särskilt fokus på att bibehålla låga nivåer av kolonibildande enheter (CFU) och att säkerställa en god arbetsmiljö för både personal och patienter. Genom att analysera olika ventilationssystem och klädsystem, samt utforska hur teknologiska framsteg som AI och CFU-sensorer kan optimera ventilationssystem, hoppas vi kunna bidra till framtida energibesparingar inom sjukvården.

Awsam Nabil Hanna,  
Dan Solomonsen  
Stockholm, Sverige  
2024

## Ordlista

TAF- Temperature controlled Airflow

LAF - Laminar Airflow

TMA - Omblandad ventilation

CFU - Colony forming unit

Op-rum – Operationsrum

HEPA-filter – högeffektivt partikelfilter

Källstyrka – antal bakteriepartiklar som avges från en person med en specialdräkt

AI – artificiell intelligens

Cirkulationsluft – mängd återförd luft som cirkulerar i rummet efter passerat filter

Tilluft – mängd tillförd friskluft till rummet

HVAC - Heating, Ventilation, and Air Conditioning, vilket på svenska översätts till uppvärmning, ventilation och luftkonditionering. Det är ett system som används för att reglera inomhusmiljön i byggnader för att säkerställa komfort och luftkvalitet



# Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Problemformulering	1
1.2	Målsättning	1
1.3	Frågeställning	2
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Författarnas bidrag till examensarbetet	2
2	Teori och bakgrund	3
2.1	Medicinsk bakgrund	3
2.2	Teknisk bakgrund	4
2.2.1	Omblandad ventilation	4
2.2.2	Laminar airflow	4
2.2.3	Temperature controlled airflow	5
2.2.4	AI-kontrollerad ventilation inom sjukhus	5
2.3	Olika klädsystem för operation	6
3	Metoder	7
4	Resultat	9
4.1	Energiförbrukning	9
4.2	Kostnad energiförbrukning	10
4.3	CFU-nivå i operationssal	11
5	Analys och diskussion	14
5.1	För – och nackdelar med de olika ventilationssystem	14
5.2	Kostnad och energidiskussion	14
5.3	Integration av smarta funktioner	15
5.4	AI-kontrollerad ventilation	15
5.5	Utveckling av ventilationssystem	16
5.6	Implementering av Nya skandinaviska standarden	16
5.7	Förbättring av operationskläder	16
6	Slutsats	17
7	Källförteckning	19



# 1 Inledning

Ventilationssystem utgör en kritisk komponent i upprätthållandet av ren luftkvalité, särskilt inom hälso- och sjukvårdsanläggningar och mer specifikt inom operations-salar. Dessa miljöer kräver en nästan steril atmosfär för att maximera patientsäkerheten och minimera risken för infektioner. Ventilationssystemens förmåga att filtrera luften och eliminera skadliga partiklar och mikroorganismer är därför av yttersta vikt. För att uppnå den önskade renhetsgraden måste hänsyn tas till mängd cirkulationsluft, källstyrka, antal personer samt mängd tilluft för att bibehålla en optimal arbetsmiljö för både patientens och personalens välmående.

## 1.1 Problemformulering

Karolinska universitetssjukhuset och resterande sjukhus som hanteras av Locum AB använder luftrenare med Hepa 14-filtrer (se avsnitt 2.1) som rengör inomhusluften i operationssalar. I Sverige används två typer av ventilationssystem i operationsrum. Ena bygger på omblandande strömning och har oftast ett don för tilluft vid taket och don för frånfrånluft nära golvet. Det andra systemet bygger på parallellströmning där luften tillförs genom s.k. parallellströmningstak med totalt luftflöde  $>2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . [1]

I Sverige mäts Colony forming unit, även förkortat CFU (se avsnitt 2.1). I ultrarena operationssalar vill man bibehålla CFU värdet till  $\leq 10 \text{ CFU}/\text{m}^3$  för att operationssalen skall klassas som ultraren enligt Nordiska standarden [2]. Dock i Sverige har man bestämt att bibehålla medelvärde nivån  $\leq 5 \text{ CFU}/\text{m}^3$ , detta beslut togs för att säkerställa ultrarena klassen på salarna. Det som avgör luftrenhet är totalluftflödet, antal personer i salen och klädsystem. [3]

Hänsyn måste tas till arbetsmiljöreglerna. Hänsyn tas till temperatur i operationssalen, luftrenheten, klimat för patient och personal, och lukt från till exempel diatermi. Personalen och patientens välmående skall ej kompromissas. Enligt den nya nordiska standarden används det 300 liter tilluft/s [2] medan i Sverige används fortfarande 500 liter tilluft/s [1] och med ett expanderade sjukhus med fler och fler operationssalar kan man se hur detta blir ett problem. Att nästan halvera tilluftflödet sparar på energi och resurser som sedan kan användas för att förbättra sjukhusmiljön, som exempelvis mer personal och/eller mer material för sjukhuset.

## 1.2 Målsättning

Målet med examensarbetet är att presentera konkreta teoretiska resultat som kommer ligga till grund för framtida energibesparing i operationssalar. Med detta arbete skapas möjligheten att skapa en diskussion mellan vården och fastighetsägarna för att kartlägga ett plan för att spara och bevara miljön.

### **1.3 Frågeställning**

- Är det möjligt att spara på energi med dagens ventilationssystem, utan att påverka CFU-värdena samt personalens arbetsmiljö?
- Påverkar ett sänkt tilluftflöde patientens säkerhet och personalens välmående?

### **1.4 Avgränsningar**

Detta arbete kommer omfatta en förstudie som presenterar teoretiska resultat med förhoppning att teorin kan prövas praktiskt i framtiden. Förstudien kommer hålla sig till ventilationssystem som finns i operationssalarna, då det inte finns tid eller resurser att utveckla en ny teknik. Inget program kommer att kunna skapas med tanke på tidsramen inte är tillräcklig. Parametrar som personalens och patientens välmående kan inte framföras då teorin av minskat tilluftflöde måste testas i praktiken för att få resultat. Dessa parametrar inkluderar lukt ifrån diatermi och temperatur i operationssalen.

### **1.5 Författarnas bidrag till examensarbetet**

Det teoretiska beräkningar utfördes av författarna med hjälp av Erik Sahlin på Locum AB redovisa data för kostnader och energiförbrukning. Framställning av försättningsarna för projektet gjordes av författarna.

## 2 Teori och bakgrund

Detta kapitel behandlar den teoretiska och tekniska bakgrunden till mikrobiell kontaminering och ventilationssystem i operationssalar. Inledningsvis diskuteras mikroorganismers närvaro i miljön och deras betydelse, samt historiska försök att minska luftburen smitta i operationssalar, med början på 1860-talet. Kapitlet beskriver utvecklingen av mätinstrument och ventilationssystem som har förbättrat förståelsen av och kontrollen över mikrobiella föroreningar. Det förklarar olika ventilationssystem, såsom omblandad ventilation, laminar airflow och temperature controlled airflow, och deras roll i att upprätthålla sterilitet. Vidare betonas betydelsen av sterilklädsel för att minska spridningen av bakteriebärande partiklar och därigenom infektionsrisker.

### 2.1 Medicinsk bakgrund

Mikroorganismer finns överallt i vår miljö och anses vara viktiga för ekosystemet. Dessa kan däremot vara smittsamma och leda till infektioner i vissa arbetsmiljöer såsom i operationssalar därför har detta diskuterats sedan 1860-talet efter Listers försök att sterilisera luften med karbolspray. Försöket gav inga tydliga resultat på att karbolspray minskade luftburen smitta eller hade påverkan på det. Det var även svårt under denna tid att framställa ett tydligt resultat, då inga mätinstrument fanns för att fastställa värden.

Utvecklingen av mätinstrument möjliggjorde studier av mängden mikroorganismer i luften. I USA 1930 presenterade Wells luftcentrifugen och tio år efter presenterade Bourdillon slitsamplern i England. Denna utveckling användes i England 1950 för att utföra mätningar i operationssalar där det visade höga koncentrationer av bakterier i luften och även stor risk för postoperativa infektioner.

Dessa studier var ett underlag för undersökningar som gjordes 1960 av Blowers och Wallace där en risknivå för luftburen smitta konstaterades, där hög risk för smitta låg vid 700–1800 CFU/m<sup>3</sup> och låg risk vid 36–72 CFU/m<sup>3</sup>. Dessa underlag används för att fastställa risknivån för luftburen smitta. Med utvecklingen inom kirurgi ökade behovet att ha sterila operationssalar för att minska infektionsrisker speciellt vid känsliga operationer. Till detta började John Charnley att operera i rum utan ventilation men med högt tilluftflöde samt utveckling av täta arbetskläder, vilket lyckades sänka CFU-värdet. Tillsammans med tidigare studier lyckades man konstatera att relationen och vikten av tilluftflöde, kläder, antal personer och aktiviteten ligger till grund för mängd bakterier i rummet. För att förbättra ventilationen, snarare än att späda ut luftföroreningar, rekommenderas att bakteriebärande partiklar förs bort av vertikalt luftflöde ovanför operationssalen. [1]



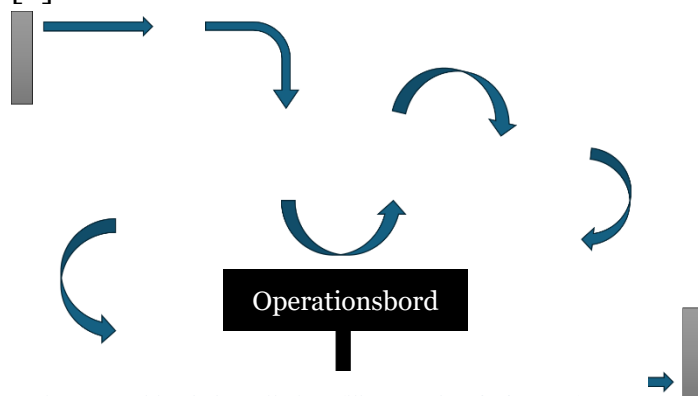
HEPA-filter står för "High efficiency particulate air" och är ett högeffektivt partikelfilter som filtrerar luften från de minsta partiklarna så att luften som strömmar in i rummet uppfyller önskad renhetsgrad. [4]

Colony forming unit förkortas (CFU), innebär mängd bakteriebärande partiklar som ger upphov till en koloni på odlingsplatta (CFU/m<sup>3</sup>). [5]

## 2.2 Teknisk bakgrund

### 2.2.1 Omblandad ventilation

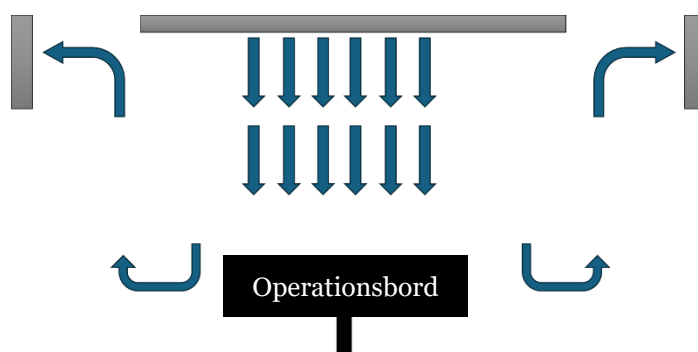
Omblandad ventilation, även kallad Turbulent mixed airflow på engelska förkortas TMA. TMA bygger på utspädningsprincipen luftflödet tillförs genom ett högeffektivt partikelfilter (HEPA) för att späda ut föroreningen till en lägre nivå. Detta medför en exponentiell minskning av höga koncentrationer av luftburna mikrober. På grund av TMA kommer koncentrationen att vara ganska konstant genom hela OP-rummet. [6]



Figur 1: Omblandad ventilation. (illustrerad av författarna)

### 2.2.2 Laminar airflow

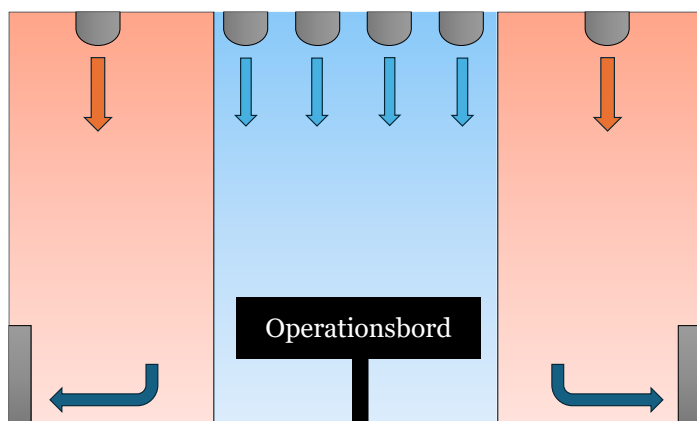
Enkelriktad parallell luftströmning, även kallad Laminar airflow på engelska förkortas LAF. LAF-systemet fungerar på så sätt att luften trycks genom HEPA-filtret i taket ovanför operationsbordet med ett högt luftflöde. Luftflödets hastighet bör vara tillräckligt hög för att bevara dess enkelriktade flöde även när flödet störs av personal och utrustning, men tillräckligt låg för att hindra turbulens. Denna teknik skapar en hög renhetsgrad i området under taket, alltså över operationsbordet. Dock påverkas luftströmmarna av instrument såsom operationslampor och operationsskärmar. Dessa kan hindra luftströmmarna från att nå operationsbordet. [6]



Figur 2: Laminar airflow. (illustrerad av författarna)

### 2.2.3 Temperature controlled airflow

Temperature controlled airflow (TAF) är en nyutvecklad teknik som används i infektionskänsliga salar. Denna teknik använder kyld HEPA-filtrerad luft ovanför operationsbordet som strömmar nedåt på grund av dess högre densitet än den omgivande luften som är varmare. Den kylda och filtrerade luften tillförs från åtta halvfäriskformade luftdon monterade i en cirkel vilket skapar en ultraren zon som expanderar från mitten av rummet. Runt det kylda centrala luftflödet sprids varmare HEPA-filtrerad luft från ytterligare åtta takmonterade halvfäriskt formade luftspri-dare. Den varma luften förhindrar stagnationszoner i rummets periferi och bibehåller temperaturgradienten för det vertikala flödet av kyld luft. [7]



Figur 3: Temperature controlled airflow (illustrerad av författarna)

### 2.2.4 AI-kontrollerad ventilation inom sjukhus

Det saknas studier och en utvecklad teknologi för ventilation med AI i sjukhus. Dock finns det artiklar [8] och studier om AI för HVAC-system [9]. HVAC står för Heating, Ventilation, and Air Conditioning, vilket är ett system som används för att reglera inomhusmiljön i byggnader och säkerställa komfort och luftkvalitet. Systemet omfattar uppvärmning för att hålla inomhusmiljön varm under kalla perioder, ventilation för att cirkulera luft och avlägsna oönskade partiklar samt tillföra frisk utomhusluft, och luftkonditionering för att kyla och avfukta luften under varma perioder. HVAC-system är avgörande för att upprätthålla en hälsosam och behaglig inomhusmiljö i både bostäder och kommersiella byggnader [10]. En studie visade att en AI-baserade HVAC-driftmekanism minskar energiförbrukningen med minst 10% samtidigt som den erbjuder bättre termisk komfort för användarna [9].

### **2.3 Olika klädsystem för operation**

Klädsystemet är en av faktorerna för att bibehålla ett lågt värde av CFU. Genom att ha arbetsdräkt minimeras spridningen av bakteriebärande hudpartiklar till luften. Kläderna ska sitta tight runt armar och ben för att minska spridningen av hudpartiklar. Det finns två typer av sterilklädsel normal arbetsdräkt och specialarbetsdräkt. Den normala arbetsdräkten har en källstyrka på  $\leq 5$  CFU och specialarbetsdräkten har en källstyrka på  $\leq 1,5$  CFU. Dessa kläder är viktiga inom operationer eftersom källstyrkan har en direkt koppling till mängden tilluftflöde (se formel, avsnitt 3) då vid mindre källstyrka behövs mindre tilluftflöde. [11]

### 3 Metoder

För att besvara frågeställningen görs det en jämförelse av olika ventilationssystem, beräkningar genom formel från TS39-standarden för att ha avgränsningar och se hur ett sänkt tilluftflöde påverkar energiförbrukningen, samt säkerställa att hålla värdena som finns i kraven, beräkningar av energibesparing vid minskat tilluftflöde (vad kostar det idag och vad skulle det kosta om mängden uteluft minskades) samt jämförelse med ett annat europeiskt land med samma klimat och flödesvärden som används där. Undersökningar gjordes med hjälp av tidigare rapporter och artiklar som hittades på PubMed [12], och Science direct [13]. Dessa rapporter hittades med nyckelorden "energy efficient", "ventilation" och "operating room" nyckelorden valdes på engelska då det visade bättre resultat.

Det teoretiska värdet uppnåddes genom formler ifrån TS39-standarden. Dessa formler tas fram baserat på konsensus mellan flera parter som t.ex. företag, användare, intressegrupper och regeringar. I detta fall hjälpte Johan Nordenalder med att ta fram denna standard. Formeln är  $Q = \frac{q_s * n}{c}$

Denna ekvation hjälpte till att beräkna det teoretiska värdet för behövt cirkulationsluftflöde. Här är "Q" cirkulationsluftflöde, "n" antal personer i operationssalen, "c" den önskade CFU-nivån att behålla och "q<sub>s</sub>" källstyrkan per person i operationssalen. I beräkningen antogs det att i operationssalen kommer det vistas fem till tio personer och beräkningen utfördes. Efter denna beräkning kan man då lägga till tilluftsflödet för att sedan minska CFU-nivån. Då används ekvationen  $c = \frac{q_s * n}{Q+l}$  och i denna ekvation läggs till "l" som är önskade tilluftsflödet [1]. Nuvarande värde för CFU togs fram med hjälp av Johan Nordenadler som var författarnas kontaktperson inom Karolinska universitetssjukhuset och jobbar deltid med ventilationen på sjukhuset.

Sedan samlades data från Locum AB, och då Locum AB är fastighetsägare står företaget för betalning av energiförbrukning. Data presenterades på ett möte mellan författarna, Erik Sahlin som är anställd på Locum AB och Anders Ivung som arbetar på företaget Fläkt Group som installerar ventilationen för Locum AB. Data från Locum innehöll mängd förbrukad energi i MWh/år för elförbrukning, energi för uppvärmning av luft samt nedkylning av luft. Dessa värden representerar energi för både förbehandlingsaggregatet och cirkulationsaggregatet. Sedan gjordes beräkningar på varje kategori, exempelvis kostnad i kr/år och priserna för kr/MWh togs fram ur LCC-mall som Locum använder sig av. Efter att dessa värden framställdes gjordes en jämförelse mellan nuvarande tilluft mängden och det önskade värdet, för att jämföra energibesparingen i kr per år. Detta gjordes genom denna formel:

$$\frac{\text{önskat friskluftvärde}}{\text{nuvarande friskluftvärde}} * \text{nuvarande kostnad} = \text{kr/år}$$

sedan presenteras resultat i form av tabeller och figurer med olika tilluftflöden (se avsnitt 4). Tabeller och figurer skapades genom att införa dessa formler i Microsoft Excel som sedan generade och beräknade resultat. Figurer skapades med hjälp av

Excel inbyggda diagramfunktion där det finns alla typer av diagram för att visualisera resultat.

Författarna valde metoden att använda Microsoft Excel för att visualisera resultat då Excel har alla inbyggda funktioner som författarna behövde för att utföra teoretiska beräkningarna.

## 4 Resultat

I detta kapitel presenteras de huvudsakliga fynden från vår studie om energibesparing i operationsmiljöer. Resultaten visar att det finns betydande möjligheter att minska energiförbrukningen genom optimerade ventilationssystem utan att äventyra luftkvaliteten i operationssalar.

Vi redovisar detaljerade tabeller som jämför kostnaderna för energiförbrukningen mellan olika ventilationslösningar, vilket tydligt visar de ekonomiska fördelarna med energieffektivisering. Dessutom visar våra mätningar av kolonibildande enheter (CFU) att luftkvaliteten och steriliteten kan upprätthållas även med reducerat luftflöde, vilket är avgörande för patientsäkerheten.

### 4.1 Energiförbrukning

Tabell 1: Totala energiförbrukningen för tilluftaggregatet per operationssal.

El MWh/år	Kyla MWh/år	Värme MWh/år	TA-Aggregat MWh/år	
7	7	12		26
7	7	12		26
7	7	12		26
7	7	12		26

Tilluftsfloede idag	Önskad Tilluftsfloede	Total Energi MWh/år	
	0,5	0,4	20
	0,5	0,3	15
	0,5	0,2	10
	0,5	0,1	5

Tabell 1 beräknar totala energiförbrukningen för olika nivåer av tilluftflöde, beräkningen visar att den totala energiförbrukningen minskar med ca. 5 MWh/år för varje 0,1 liter m<sup>3</sup>/s minskning av tilluftflödes nivån. Tilluftflödes nivån 0,5 liter m<sup>3</sup>/s förbrukar totalt ca. 26 MWh/år detta är även det nuvarande värdet.

Tabell 2: Totala energiförbrukningen för cirkulationsaggregatet per operationssal.

El MWh/år	Kyla MWh/år	Värme MWh/år	Cirkulations-aggregat MWh/år	Tilluftsfloede idag
37	116	0	153	0,5

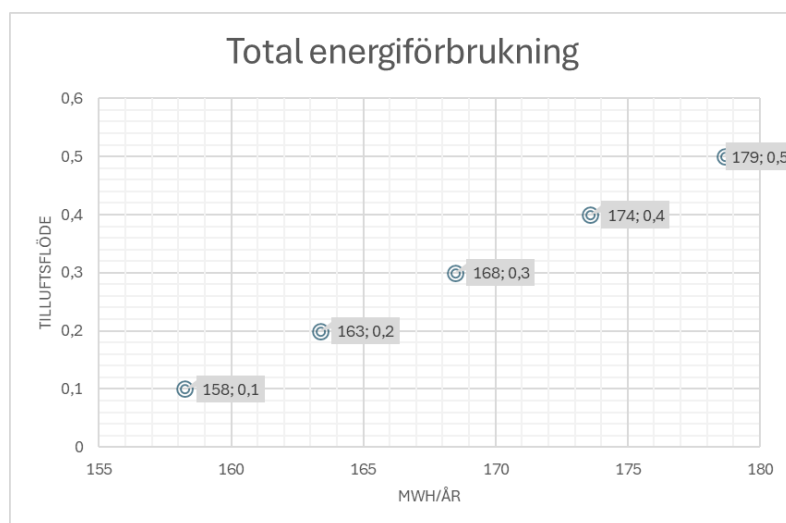
Tabell 2 visar energiförbrukningen för cirkulationsaggregatet. Cirkulationsaggregatet förbrukar ca. 153 MWh/år med tilluftflödet 0,5 liter m<sup>3</sup>/s.

Tabell 3: Totala energiförbrukningen för både TA och CA med önskat tilluftflöde. Värden presenteras i MWh/år per operationssal.

Total Energi för aggregaten	Tilluftflöde
179	0,5
174	0,4
168	0,3
163	0,2
158	0,1

Tabell 3 visar den totala förbrukningen med både cirkulationsaggregatet och tilluft-aggregatet med olika tilluftshastigheter. Även här kan man se att förbrukningen minskar med ca. 5,1 MWh/år och det är en självklarhet då enligt beräkningar har

cirkulationsaggregatet behållit sin nuvarande hastighet medan det som sänks är tillluftens hastighet och därför har totala energin och energin för bara tilluftsaggregatet samma minskning på ca. 5,1 MWh/år.



Figur 4: Förhållandet mellan tilluftflöde och energiförbrukning per operationssal.

Beräkningen av energiförbrukningen visar att totala energiförbrukningen per operationssal minskar linjärt med minskat tilluftflöde. Denna formel som används i dessa tabeller nämns i avsnitt 3.

## 4.2 Kostnad energiförbrukning

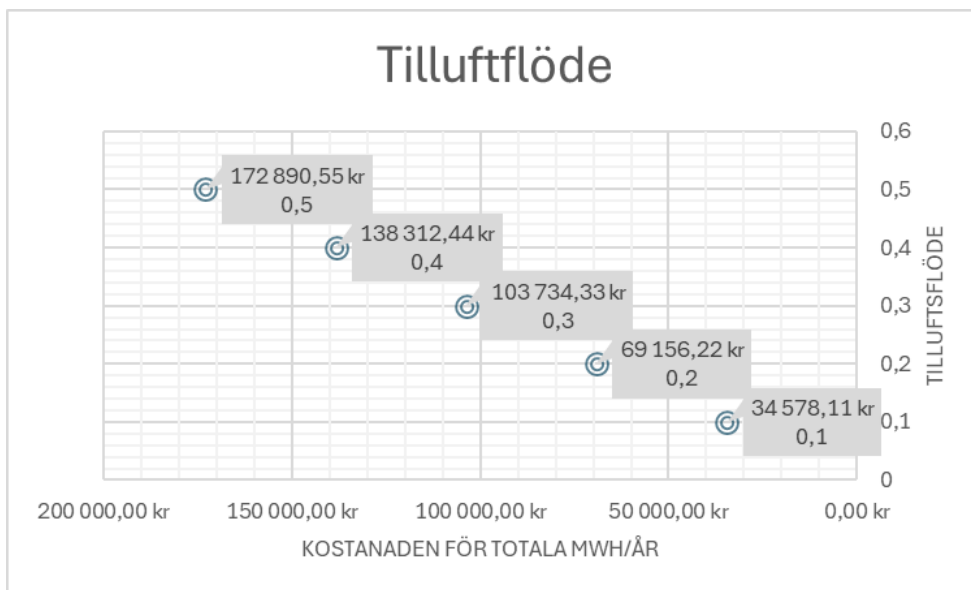
Tabell 4: Totala kostnaden för energiförbrukningen med olika tilluftflöden per operationssal.

El kr MWh	Kyla kr MWh	Värme kr MWh	Kostnad El (kr/år)	Kostnad kyla (kr/år)
1011	971	778	44056	119405
1011	971	778	44056	119405
1011	971	778	44056	119405
1011	971	778	44056	119405
1011	971	778	44056	119405

Kostnad Värme (kr/år)	Totala kostnaden (kr/år)	Tilluftflöde
9429	172891	0,5
9429	138312	0,4
9429	103734	0,3
9429	69156	0,2
9429	34578	0,1

Tabell 4 visar kostnaderna för den förbrukade energi vid nuvarande tilluftflöde på 0,5 liter m<sup>3</sup>/s visar tabellen en kostnad på ca. 173 000 kr/år för en operationssal. Med ett sänkt tilluftflöde till den önskade nivån på 0,3 liter m<sup>3</sup>/s visar tabellen en besparing på ca. 70 000 kr/år per operationssal.



Figur 5: Förhållandet mellan tilluftflöde och energiförbrukningens kostnad per operationssal.

Beräkningarna visar att det även sparas en del pengar per operationssal då energiförbrukningen minskar och det man ser är att kostnaden och elförbrukningen minskar parallellt med varandra.

### 4.3 CFU-nivå i operationssal

Tabell 5: Beräkning av luftflödet för cirkulationsluft beroende på antal personer i salen.

Q = Luftflöde (m <sup>3</sup> /s)	qs = Källstyrkan (cfu/s)	c = koncentration (cfu/m <sup>3</sup> )	n = Antal personer
3	1,5	5	10
2,7	1,5	5	9
2,4	1,5	5	8
2,1	1,5	5	7
1,8	1,5	5	6
1,5	1,5	5	5

Tabell 5 beräknar luftflöde som teoretiskt behövs i en operationssal vid olika antal personer som vistas i operationssalen. Tabellen visar även att den påverkande faktorn på mängden luftflöde är antalet personer, då källstyrkan i teorin alltid är samma då den påverkas av sjukhusets klädsystem. Alla som vistas i operationssalen ska enligt sjukhuset följa dessa klädsystem.



Tabell 6: Beräkning av CFU-nivå i operationssal beroende på antal personer och nuvarande friskluftsflöde i operationssal.

Q = Luftflöde (m <sup>3</sup> /s)	n = Antal personer	Önskat friskluftsflöde (m <sup>3</sup> /s)
3	10	0,6
2,7	9	0,6
2,4	8	0,6
2,1	7	0,6
1,8	6	0,6
1,5	5	0,6

cfu utan cirkulationsluft	cfu med cirkulationsluft
25	4,17
22,5	4,09
20	4,0
17,5	3,89
15	3,75
12,5	3,57

Tabell 6 är en beräkning av CFU-nivå i en operationssal med cirkulationsluft och utan cirkulationsluft. Det beräkningen visar är att CFU-nivå i operationssalen påverkas inte enbart av antal personer som vistas. För att sänka CFU-nivån behövs även cirkulationsluften som kommer ifrån cirkulationsaggregatet det är anledningen till att den behövs. Tabellen visar att nuvarande tilluftsflödet utan cirkulationsluft hade visat en nivå på 25 CFU/m<sup>3</sup> i operationssalen hade det varit för högt och avviker från den tillåtna nivån enligt TS39-standard. Med cirkulationsluft får man dock en sänkning till 4,17 CFU/m<sup>3</sup>.

Tabell 7: Beräkning av CFU-nivå i operationssal beroende på antal personer och önskat friskluftsflöde i operationssal.

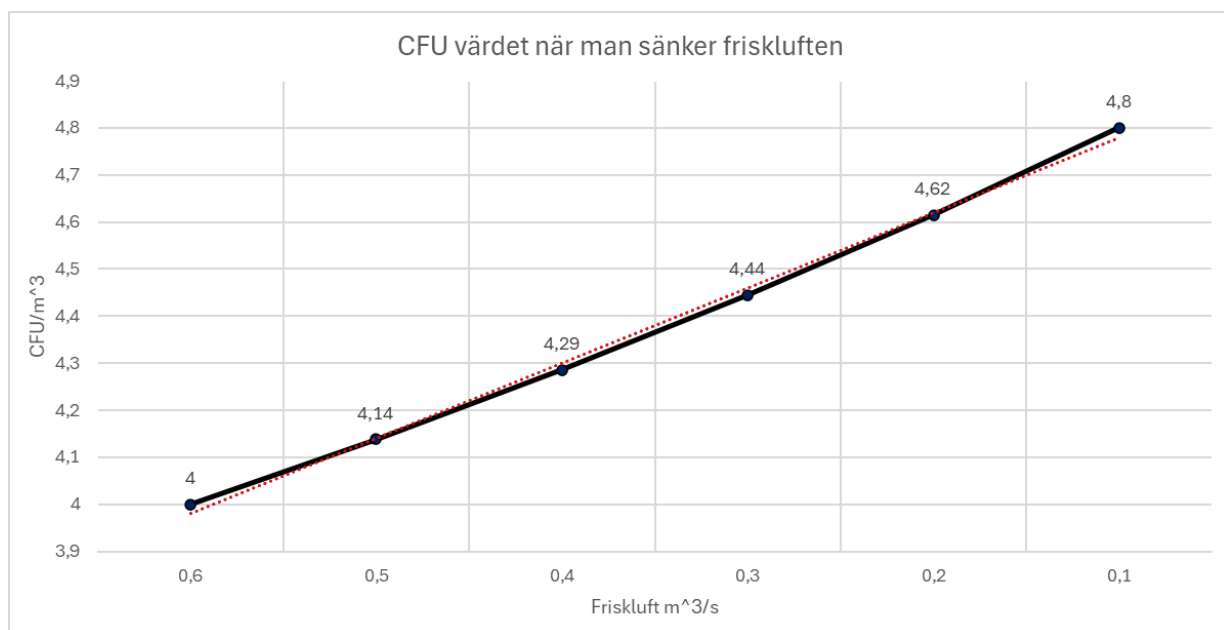
Q = Luftflöde (m <sup>3</sup> /s)	n = Antal personer	Önskat friskluftsflöde (m <sup>3</sup> /s)
3,0	10	0,3
2,7	9	0,3
2,4	8	0,3
2,1	7	0,3
1,8	6	0,3
1,5	5	0,3

cfu utan cirkulationsluft	cfu med cirkulationsluft
50	4,55
45	4,5
40	4,44
35	4,38
30	4,29
25	4,17

Tabell 7 fastställer teorin från tabell 6. Det man kan se är att utan cirkulationsluften med den önskade tilluftshastigheten på 0,3 CFU/m<sup>3</sup> hade man fått en alldeles för hög CFU-nivå. Tabellen visar en CFU-nivå på 50 CFU/m<sup>3</sup> utan cirkulationsluft men

med cirkulationsluft får man ett minskat CFU-värde på 4,55 CFU/m<sup>3</sup>. Detta värde förhåller sig till gränsen på  $\leq 5$  CFU/m<sup>3</sup> satt av TS39-standarden.



Figur 6: Förhållandet mellan CFU nivå och friskluft

Figur 6 visar förhållandet mellan CFU-nivån och friskluften det man ser i grafen är att det inte blir en linjär ökning. Ökningen av CFU-nivån varierar olika beroende på minskningen av mängden friskluft.

## 5 Analys och diskussion

Beräkningar visar att mängd tilluft inte är en avgörande faktor för att bibehålla låg CFU-nivå i operationssal, utan att det är både källstyrkan och antal personer som är avgörande. Dock kan vi inte offra mängden tilluft då den påverkar temperatur och lukt i salen, vilket i sin tur påverkar patient och personalens välmående. Det går inte heller att kompromissa nivån på cirkulationsluften då ifall CFU beräknas utan cirkulationsluftsflöde kommer vara mycket över gränsen på  $\leq 5$  CFU/m<sup>3</sup>.

### 5.1 För – och nackdelar med de olika ventilationssystem

Omblandad ventilation har ingen specifik riktning utan ren och filtrerad luft cirkulerar runt hela rummet, vilket kan leda till att luftburna partiklar kan sväva länge i rummet och ökar risken för infektion hos patienten. [6]

Till skillnad från LAF där ren och filtrerad luft tillförs från taket och riktas neråt mot operationsbordet, vilket ger högre renhetsgrad. Denna teknik har länge ansetts som det bästa alternativet dock är nackdelen att luftflödet kan blockeras av personal och teknisk utrustning. [6]

Både TMA och LAF använder sig av HEPA-filtrer som luftfördelare vilket gör att energianvändningen ökar. Det relativt nya systemet TAF använder sig inte av ett HEPA-filtrer som luftfördelare och har då visat sig vara mer energieffektivt. Tekniken som används i TAF gör det möjligt att ha lågt luftflöde vilket i sin tur minskar drag och buller bidrar till en bättre arbetsmiljö för personalen. [14]

### 5.2 Kostnad och energidiskussion

Enligt beräkningar som gjordes i kapitel 4.1 och 4.2 innebär ett minskat tilluftflöde från dagens 0,5 m<sup>3</sup>/s till 0,3 m<sup>3</sup>/s en minskning på 10,22 MWh/år vilket motsvarar ca. 70 000 kr per år för en operationssal. I sin tur är det ett sparande på ca. 700 000 kr på 10 år vilket kan utnyttjas till andra resurser, som till exempel nya tekniska utrustningar eller ökade personalresurser till sjukhuset. Huvudsyftet med examensarbetet är att hitta möjliga sätt att spara energi för att bevara miljön men parallellt med detta minskas även kostnader för ventilationssystemet för verksamheten.

Att sänka tilluften medför sänkt energiförbrukning vilket minskar kostnader för ventilationssystemet. Med ökning av antal operationssalar och operationer kan dessa lösningar spara stora mängder energi och kostnader som kan utnyttjas till andra resurser, till exempel personal, sjukhusmaterial, renovering av gamla avdelningar, flera patientsängar och/eller eventuellt utbyggnad av sjukhus. Nedan presenteras förslag för framtida förbättringar och möjligheter för energibesparing inom operationssalar.

### 5.3 Integration av smarta funktioner

I en evig-utvecklande värld blir teknologi billigare och billigare för varje år som kommer. I en snar framtid då det finns CFU-sensorer som kan mäta CFU-nivån i till exempel operationssalar, skulle man kunna utveckla ett system som integreras med nuvarande operationsbokningsprogram med hjälp av AI. Där information om operationen skrivs in och med hjälp av det nya systemet kunna anpassa ventilation etc. till typen av operation som skall utföras. Då alla operationer inte behöver vara ultrarena så används CFU-sensorn och AI-programmet för att bibehålla den optimala CFU-nivån i operationssalen för specifika operationer.

I detta program skall man kunna skriva in antalet personer i salen, typen av operation och när operation startar eventuellt slutar, för att AI-systemet ska kunna förbereda inför operation och även hålla en optimal ventilationsnivå för kommande operationer. Sedan ska systemet kunna sänka ventilationen automatiskt vid dagens slut. Med en sensor och AI skulle systemet kunna öka ventilationen under operation ifall det behövs och även sänka ventilationen för att spara energi om sensorerna känner att nivån inte behöver vara låg med ett tröskelvärde baserat på standarder så att CFU-nivån inte överstiger accepterad nivå.

AI-programmet kan med hjälp av sensorn beräkna när, mängd, och vilken typ av ventilation som kan behövas för optimal renhet. Detta kan göras i bakgrunden automatiskt med hjälp av AI.

### 5.4 AI-kontrollerad ventilation

Rapporten "Artificial Intelligence (AI)-Based Occupant-Centric Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Control System for Multi-Zone Commercial Buildings" undersöker energiförbrukningen i byggnader, som står för nästan hälften av världens energikonsumtion, där HVAC-system ansvarar för cirka 40% av denna förbrukning. Traditionella HVAC-kontroller är ofta ineffektiva eftersom de inte kan anpassa sig till plötsliga förändringar i beläggning och miljöförhållanden. Syftet med studien är att utveckla en AI-baserad, användarcentrerad HVAC-kontrollmekanism som ökar energieffektiviteten i flerzonskommersiella byggnader genom att kontinuerligt förbättra sin kunskap om beläggning och miljöförhållanden.

Resultaten visar att den AI-baserade HVAC-driftmekanismen minskar energiförbrukningen med minst 10% samtidigt som den erbjuder bättre termisk komfort för användarna. Studien visar att en AI-baserad, användarcentrerad HVAC-kontrollmekanism kan leda till betydande energibesparingar och förbättrad komfort i flerzons kommersiella byggnader. [9]

Tidigare studier visar att AI-kontrollerad ventilation minskar energiförbrukning och bidrar till miljön. Studien är dock inte utförd och testad inom sjukhusmiljö men ventilation funkar i princip på samma sätt.

## **5.5 Utveckling av ventilationssystem**

Med den ständiga utvecklingen och ökat behov av renovering och nybyggnation av sjukhus och operationssalar blir det av största vikt att ha en förståelse för och studera ventilationssystemen som finns och möjligheten för utveckling. Valet av ventilationssystem är en påverkande faktor för energiförbrukningen då varje system har en viss teknik att föra bort oönskade partiklar vid operation. Till exempel TAF-ventilationssystemet som beskrivs tidigare i detta arbete, där denna teknik anses vara 30% energieffekt jämfört med andra ventilationstekniker. [6]

## **5.6 Implementering av Nya skandinaviska standarden**

De teoretiska resultaten visar att det finns potential att sänka tilluftflödet samtidigt har jämförelsen med andra länder som följer den nordiska standarden som till exempel Danmark, visat att det används 0,3 m<sup>3</sup>/s och det har funkat praktiskt [15] även om det har funkat i ett annat land behöver det testa praktiskt då antal operationer varierar beroende på land och befolkningsantalet. Ett förslag för framtida studier är att testa att minska tilluftflödet och observera hur det påverkar CFU-värdet samt andra parametrar såsom temperatur och lukt. Som tidigare nämnts är CFU-värdet inte det enda som ska observeras utan även patient och personals välmående och en optimal miljö.

## **5.7 Förbättring av operationskläder**

Val av kläder tillsammans med ventilationssystemet har stor betydelse för renhetsgraden i operationssalen. Klädsystemets källstyrka, alltså hur mycket partiklar de släpper igenom och tätheten på kläderna har en direkt inverkan på CFU-värdet (se formel, avsnitt 3). Idag finns det som kallas för specialarbetskläder som avger 1,5 CFU/s per person utveckling av tätare material kan minska på källstyrkan och i sin tur ge möjlighet att experimentera mer med luftflödet och minska på energiförbrukningen, då inte lika mycket luft behövs för rummet. Även här måste hänsyn tas till personalens bekvämlighet med kläderna, då tätare kläder kan vara mindre praktiska och bekväma för personalen.

## 6 Slutsats

Slutsatsen av denna förstudie pekar på betydande möjligheter för energibesparingar inom operationssalar genom strategisk justering av tilluftsflödet och användning av tätare operationskläder. Genom att minska tilluftsflödet kan operationssalarnas energiförbrukning reduceras, vilket i sin tur kan resultera i betydande kostnadsbesparingar över tid. Detta är särskilt relevant med tanke på den höga energikonsumtionen inom sjukvården och behovet av att optimera resursanvändningen.

Det är också viktigt att notera att denna energibesparingsåtgärd inte kompromissar med den hygieniska standarden inom operationssalar. Studien visar att minskat tilluftsflöde inte har en signifikant negativ effekt på nivåerna av luftburet bakteriellt material (CFU), vilket betyder att luftkvaliteten fortfarande kan hållas på en acceptabel nivå för att säkerställa patient- och personalssäkerhet.

För att maximera de potentiella energibesparingarna rekommenderas även användningen av tätare operationskläder. Dessa kläder kan effektivt minska spridningen av partiklar från personalens hud och kläder till luften i operationssalen, vilket minskar behovet av höga luftflöden för att upprätthålla renheten i miljön.

För att ytterligare förbättra energieffektiviteten och optimera driftsförhållandena i operationssalar på lång sikt föreslås även integration av avancerade teknologier såsom artificiell intelligens (AI). Genom att använda AI-baserade system kan klimatkontrollen och luftflödet anpassas dynamiskt baserat på realtidsdata om antalet personer, miljöförhållanden och andra relevanta faktorer. Detta kan bidra till en ännu mer effektiv resursanvändning och kostnadsminimering över tid.

Sammanfattningsvis indikerar denna förstudie att genom att kombinera strategisk justering av tilluftsflöde, användning av tätare operationskläder och införande av avancerade teknologier som AI kan betydande energibesparingar uppnås inom operationssalar utan att kompromissa med patient- och personalssäkerhet samt hygieniska standarder. Detta förslag kan ligga till grund för framtida forskning och implementering av hållbara energilösningar inom sjukvårdsanläggningar.



## 7 Källförteckning

- [1] "Standard - Mikrobiologisk renhet i operationsrum - Förebyggande av luftburen smitta - Vägledning och grundläggande krav SIS-TS 39:2015", Svenska institutet för standarder, SIS. Åtkomstdatum: 24 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www-sis-se.focus.lib.kth.se/produkter/halso-och-sjukvard/medicin-allmant/sists3920152/>
- [2] A. K. Solem *m.fl.*, "R3 Nordic Guideline for Hospital Ventilation".
- [3] "riktlinje\_vardhygieniska\_aspekter\_2021-05-06.pdf". Åtkomstdatum: 08 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: [https://www.locum.se/globalassets/global/3.-verktygen/styrdokument-fastigheter/overgripande-anvisningar/vardhygieniska-aspekter/riktlinje\\_vardhygieniska\\_aspekter\\_2021-05-06.pdf](https://www.locum.se/globalassets/global/3.-verktygen/styrdokument-fastigheter/overgripande-anvisningar/vardhygieniska-aspekter/riktlinje_vardhygieniska_aspekter_2021-05-06.pdf)
- [4] O. US EPA, "What is a HEPA filter?" Åtkomstdatum: 22 maj 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter>
- [5] I. Ujváry, "Chapter 3 - Pest Control Agents from Natural Products", i *Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology (Third Edition)*, R. Krieger, Red., New York: Academic Press, 2010, s. 119–229. doi: 10.1016/B978-0-12-374367-1.00003-3.
- [6] "Operationsavdelning - Vårdhandboken". Åtkomstdatum: 29 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.vardhandboken.se/vardhygien-infektioner-och-smittspridning/operationssjukvard/operationsavdelning/>
- [7] M. Alsved *m.fl.*, "Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow", *J. Hosp. Infect.*, vol. 98, nr 2, s. 181–190, feb. 2018, doi: 10.1016/j.jhin.2017.10.013.
- [8] "techmag\_DINA4\_01\_23\_EN.pdf". Åtkomstdatum: 08 juni 2024. [Online]. Tillgänglig vid: [https://ebmpapst.se/sv/dat/site\\_common/upload/techmag\\_DINA4\\_01\\_23\\_EN.pdf](https://ebmpapst.se/sv/dat/site_common/upload/techmag_DINA4_01_23_EN.pdf)
- [9] A. Yayla *m.fl.*, "Artificial Intelligence (AI)-Based Occupant-Centric Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Control System for Multi-Zone Commercial Buildings", *Sustainability*, vol. 14, nr 23, Art. nr 23, jan. 2022, doi: 10.3390/su142316107.
- [10] "What Is HVAC and How Does it Work? (2024 Guide)", Architectural Digest. Åtkomstdatum: 08 juni 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.architecturaldigest.com/reviews/hvac/what-is-hvac>
- [11] "Personalföreskrifter på operationsavdelning - Vårdhandboken". Åtkomstdatum: 22 maj 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.vardhandboken.se/vardhygien-infektioner-och-smittspridning/operationssjukvard/personalforeskrifter-pa-operationsavdelning/>
- [12] "PubMed", PubMed. Åtkomstdatum: 08 juni 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [13] "ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books." Åtkomstdatum: 08 juni 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.sciencedirect-com.focus.lib.kth.se/>
- [14] "Energieffektiv ventilation för sjukhus". Åtkomstdatum: 29 april 2024. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.energimyndigheten.se/arkiv-for-resultat/Resultat/energieffektiv-ventilation-for-sjukhus/>
- [15] "NotatTilstrækkeligtFlowAfUdeluftRecirkulation (3).pdf".





