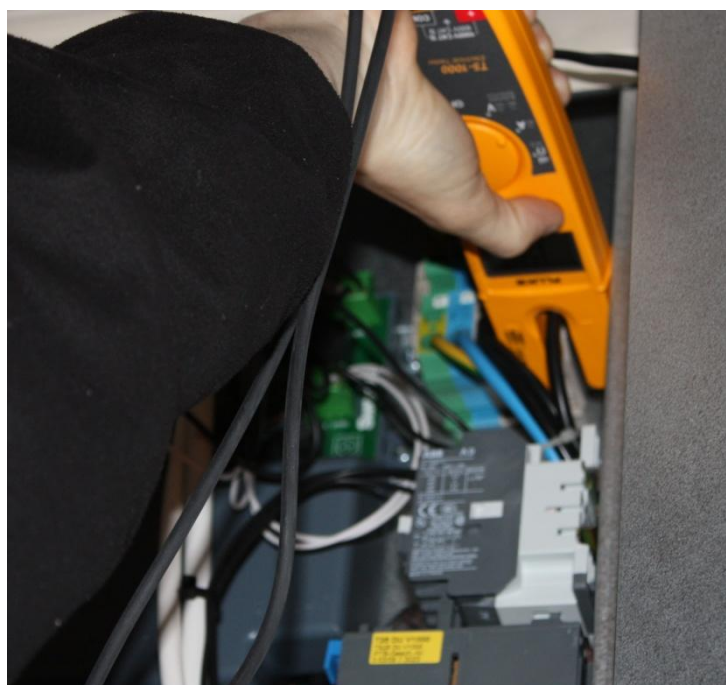




HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Studie av energieffektivitet i ventilasjonsanlegg



BachelorOppgave utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

Maskin, Energi- og Prosessteknikk

Av: Tor Olav Stava
Mohamed Ben Khemais Triki

Kand.nr. 99
Kand.nr. 84

Haugesund

Våren 2009

BACHELOROPPGAVE

Studenten(e)s navn: Tor Olav Stava
Mohamed Ben Khemais Triki

Linje & studieretning Maskin, Prosess- og Energiteknikk

Oppgavens tittel: Studie og målinger av energieffektivitet i ventilasjonsanlegg

Oppgavetekst:

Se på energiforbruket i forbindelse med ventilasjonsanlegg ved å

- hente inn litteratur om SFP (specific fan power), og sette seg inn i alle forhold som berøres av faktoren. Dette omfatter også en enkel studie av hvordan et ventilasjonsanlegg fungerer og hvilke krav som stilles til SFP i dag.
- utføre målinger på så mange ulike ventilasjonsanlegg som mulig, for å få et best mulig grunnlag i studien. Dersom det lar seg gjennomføre er det ønskelig at det blir gjort målinger med ulike luftmengder for eventuelt å se hvordan SFP varierer med disse.
- gjøre litteraturstudier på SFP-variasjon i forhold til luftmengde for å se hvordan litteraturen stemmer overens med resultatene av de utførte målingene.

Måledata skal presenteres og det skal utarbeides en oversikt over energieffektiviteten for de ulike anleggene. Det kan her beregnes årlig energiforbruk. Variasjonen i energiforbruk vil være interessant og ikke minst kostnadsbildet med hensyn på variasjonen i årskostnad mellom de enkelte anlegg som funksjon av spesifikk luftmengde.

Endelig oppgave gitt: 06.03.2008

Innleveringsfrist: Fredag 8.mai 2009 kl. 12.00

Intern veileder Gisle Kleppe

Ekstern veileder Svein Alsaker, Ferkingstad og Alsaker AS

**Godkjent av
studieansvarlig:
Dato:**

Forord

Denne rapporten er utført som avsluttende hovedoppgave på 3-årig studie for ingeniørfag; Maskin, Energi- og Prosessteknikk, ved Høgskolen Stord/Haugesund avdeling Haugesund. Oppgaven er gitt av Svein Alsaker, eier av firmaet Ferkingstad og Alsaker AS, et rådgivende ingeniørfirma innenfor faggruppen VVS.

Rapporten er ment å sette fokus på energibruken i ventilasjonsanlegg, og øke forståelsen for hvilke faktorer som påvirker dette. Det stilles i dag krav til SFP for ventilasjonsanlegg, og det er derfor viktig å forstå hvordan denne påvirkes av systemets komponenter, og hvordan den varierer med endringer i luftmengde, energibruk og driftskostnader.

For en fullstendig forståelse av innholdet i rapporten er det en fordel med grunnleggende kjennskap til emner som maskinlære, termodynamikk, strømningslære og statistikk. Her er det også verdt å nevne at vi har konsekvent brukt benevnelsen luftmengde når vi egentlig omtaler volumstrøm. Dette er for å holde oss i samsvar med det meste av litteratur vi har funnet om ventilasjonsanlegg.

Vi vil her benytte anledningen til å takke våre veiledere, Svein Alsaker i Ferkingstad og Alsaker AS og Gisle Kleppe ved Høgskolen Stord/Haugesund avdeling Haugesund, for gode råd og tilbakemeldinger under arbeidet med oppgaven. En spesiell takk går til Anders Clausen i Nord Rogaland Blikk & Ventilasjon AS som har brukt mye tid på å hjelpe oss med målinger og delt sine kunnskaper om ventilasjonsanlegg med oss. Vi vil også takke Ernst Børge Johansen i Swegon AS for å svare på alle våre tekniske spørsmål om GOLD ventilasjonsanlegg.

Sted og dato

Sted og dato

Mohamed Ben Khemais Triki

Tor Olav Stava

Innhold

Forord	i
Innhold.....	ii
Figurliste.....	v
Tabeller.....	vi
Sammendrag	vii
Innledning.....	1
Oppbygging og virkemåte til ventilasjonsanlegg	2
Inntaksrist og filtre ^[x]	2
Spjeld.....	3
Lyddemper.....	3
Varmeveksler ^[ii]	3
Varme- og kjølebatteri.....	4
Vifter ^[x]	5
Kraftoverføring og turtallsregulering ^[x]	6
Motorer ^[x]	7
Kanaler ^[x]	7
Styringsprinsipper ^[iii]	8
CAV (Constant Air Volume).....	8
VAV (Variable Air Volume).....	9
DCV (Demand Controlled Ventilation)	10
SFP (Specific Fan Power) ^[xiii]	11
Beregning av SFP	11
Måleusikkerhet	11
Forhold som påvirker SFP ^[x]	12
Trykkfall	12
Virkningsgrad	13
Tilført varme ^[viii]	13
Anbefalinger og krav til SFP	14
Bestemmelse av SFP for eksisterende anlegg	15
Måling av elektriske parametre	15
Beregning av elektrisk vifteeffekt	16
Bestemmelse av luftmengde.....	16
Metoder og måleinstrument brukt	17
Måling av strøm og spenning	17
Bestemmelse av luftmengde.....	18

Målinger ved variabel luftmengde.....	18
Beregning av systemkurve for effekt og SFP	18
Økonomiske beregninger.....	19
Anlegg 1: Karmsund videregående skole.....	20
Beskrivelse av anlegg	20
Målinger ved driftspunkt	21
Beregninger	21
Målerapport for bestemmelse av SFP.....	23
Anlegg 2: Kontorbygg Ferkingstad og Alsaker AS	24
Beskrivelse av anlegg	24
Målinger ved driftspunkt	24
Beregninger	25
Målerapport for bestemmelse av SFP.....	26
Målinger ved variabel luftmengde.....	27
Beregning av systemkurver	27
Anlegg 3: Rica Maritim.....	30
Beskrivelse av anlegg	30
Målinger ved driftspunkt	30
Beregninger	31
Målerapport for bestemmelse av SFP.....	32
Anlegg 4: Math Lande Kontorbygg.....	33
Beskrivelse av anlegg	33
Målinger ved driftspunkt	33
Beregninger	34
Målerapport for bestemmelse av SFP.....	35
Anlegg 5: NAV kontorbygg, system 1	36
Beskrivelse av anlegg	36
Målinger ved driftspunkt	36
Beregninger	37
Målerapport for bestemmelse av SFP.....	38
Målinger ved variabel luftmengde.....	39
Beregning av systemkurver	39
Systemkurver.....	41
Anlegg 6: NAV kontorbygg, system 2	42
Beskrivelse av anlegg	42
Målinger ved driftsnivå	42
Beregninger	43

Målerapport for bestemmelse av SFP.....	44
Målinger ved variabel luftmengde.....	45
Beregning av systemkurver	45
Systemkurver	47
Sammenligninger.....	48
Konklusjon	49
Forslag til videre arbeid.....	50
Referanseliste.....	51
Vedlegg.....	52
Vedlegg A1: IF85 Filter datablad.....	52
Vedlegg A2: VS 10-85 Filter datablad.....	53
Vedlegg B: E-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred	54

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av oppbygningen til et enkelt balansert ventilasjonsanlegg.....	2
Figur 2: Eksempel på et rammemontert posefilter. Kilde: www.interfil.no	2
Figur 3: Sammenligning mellom partikkelstørrelser og filtertyper ^[vi] . Kilde: www.slussen.biz	3
Figur 4: Automatisk stengespjeld. Kilde: www.exhausto.no	3
Figur 5: Lyddemper for kanalmontasje. Kilde: www.flaktwoods.com	3
Figur 6: Prinsipptegning for kryssvarmeveksler. Kilde: www.flexit.no	4
Figur 7: Varmtvannsbatteri. Kilde: www.systemair.com	4
Figur 8: Elektrisk varmebatteri. Kilde: www.systemair.com	5
Figur 9: Prinsipp og strømningsbilde for radial- og aksialvifte ^[x]	5
Figur 10: Viftekammeret på tilluftsiden av GOLD RX60. Dobbel kammervifte i aksi-radial utførelse med direktedrift. Frekvensomformer er montert direkte på motoren, og elektrisk varmebatteri kan skimtes til venstre i bildet.	5
Figur 11: Eksempler på kanalkomponenter. Kilde: www.spiro.ch	7
Figur 12: Illustrasjon av luftmengde over tid ved CAV-styringsprinsipp . Kilde: www.exhausto.no	8
Figur 13: Illustrasjon av layout og komponenter ved CAV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no	8
Figur 14: Illustrasjon av luftmengde over tid ved VAV-styringsprinsipp . Kilde: www.exhausto.no	9
Figur 15: Illustrasjon av layout og komponenter ved VAV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no	9
Figur 16: Illustrasjon av luftmengde over tid ved DCV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no	10
Figur 17: Illustrasjon av layout og komponenter ved DCV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no	10
Figur 18: Kurvetilpasning til måledata, anlegg 2.	29
Figur 19: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 2.	29
Figur 20: Kurvetilpasning til måledata, anlegg 5.	41
Figur 21: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 5.	41
Figur 22: Kurvetilpasning til måledata, anlegg 6.	47
Figur 23: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 6.	47
Figur 24: Sammenligning av luftmengde, SFP-faktor og årskostnad for målte anlegg ved driftspunkt, sortert etter stigende luftmengde.....	48
Figur 25: Sammenligning av estimerte systemkurver for alle tre anlegg målt ved variabel luftmengde.	48
Figur 26: Mottatt på e-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred 12. Mars 2009. Avleste verdier er markert i diagrammet.	52
Figur 27: Mottatt på e-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred 12. Mars 2009. Avleste verdier er markert i diagrammet.	53

Tabeller

Tabell 1: Dobbeltsugende radialvifte med foroverbøyde skovler. Direktedrevet viftehjul med ytterrotormotor. Kilde: www.novagg.no	6
Tabell 2: Enkelt Sugende radialvifte med bakoverbøyde skovler uten kapsling. Direktedrevet viftehjul med ytterrotormotor. Kilde: www.novagg.no.....	6
Tabell 3: Sammenhengen mellom virkningsgrad til motor og kraftoverføring med kilereimdrift i forhold til motorstørrelse ^[x]	7
Tabell 4: Tilfeldige målinger av spenning	17
Tabell 5: Hovedkomponenter, anlegg 1	20
Tabell 6: Nominelle motordata, anlegg 1	20
Tabell 7: Filterdata, anlegg 1	20
Tabell 8: Måledata, anlegg 1	21
Tabell 9: Hovedkomponenter, anlegg 2.	24
Tabell 10: Nominelle motordata av typeskilt på motor, anlegg 2.	24
Tabell 11: Avleste luftmengder ved driftspunkt, anlegg 2.	24
Tabell 12: Strømstyrke ved driftspunkt målt på hovedsikring, anlegg 2.....	24
Tabell 13: Målinger ved variabel luftmengde., anlegg 2.....	27
Tabell 14: Beregnede data ved variabel luftmengde, anlegg 2.....	27
Tabell 15: Kurvetilpasning til måledata ved bruk av Excel, anlegg 2.....	28
Tabell 16: Hovedkomponenter, anlegg 3.	30
Tabell 17: Nominelle motordata oppgitt av leverandør, anlegg 3.	30
Tabell 18: Verdier avlest fra display på kontrollenhet, anlegg 3.....	31
Tabell 19: Strømstyrke ved driftspunkt målt på hovedinntak, anlegg 3.....	31
Tabell 20: Hovedkomponenter, anlegg 4.	33
Tabell 21: Nominelle motordata oppgitt av leverandør (Swegon), anlegg 4.	33
Tabell 22: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 4.	34
Tabell 23: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 4.....	34
Tabell 24: Hovedkomponenter, anlegg 5.	36
Tabell 25: Nominelle motordata oppgitt av leverandør (Swegon), anlegg 5.	36
Tabell 26: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 5.	37
Tabell 27: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 5.....	37
Tabell 28: Avleste og målte verdier ved variabel luftmengde, anlegg 5.....	39
Tabell 29: Beregnede verdier ved variabel luftmengde, anlegg 5.....	39
Tabell 30: Kurvetilpasning ved bruk av Excel, anlegg 5.	40
Tabell 31: Hovedkomponenter, anlegg 6.	42
Tabell 32: Nominelle motordata, anlegg 6.	42
Tabell 33: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 6.	43
Tabell 34: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 6.....	43
Tabell 35: Avleste og målte verdier ved variabel luftmengde, anlegg 6.....	45
Tabell 36: Beregnede verdier ved variabel luftmengde, anlegg 6.....	45
Tabell 37: Kurvetilpasning ved bruk av Excel, anlegg 6.	46

Sammendrag

Det stilles i dag høye krav til luftkvalitet i bygninger i Norge, som fører til høyt energiforbruk til ventilasjon. Som et tiltak for å redusere dette energiforbruket er det innført krav til SFP (specific fan power) for ventilasjonsanlegg. SFP setter en tallverdi på hvor mye elektrisk vifteenergi som brukes til å transportere luft i ventilasjonsanlegg.

Målet med denne rapporten er å presentere teoretisk bakgrunn om ventilasjonsanlegg og SFP. Praktiske målinger på eksisterende ventilasjonsanlegg skal foretas og resultatene sammenlignes med hva som kan forventes ut fra teorien.

Energiforbruket i et vifteanlegg avhenger av trykkfall og virkningsgrad til komponentene i anlegget. Ved design av ventilasjonsanlegg er det derfor viktig å fokusere på dette. Komponenter med lavest mulig trykkfall og best mulig virkningsgrad bør alltid foretrekkes. Utforming av kanalnettet må også gjøres med fokus på lavest mulig trykkfall.

For å kunne beregne SFP må først elektrisk effekt til viftemotorene og luftmengden i ventilasjonsanlegget bestemmes. Ved å bruke en enkel strømtang og valgt målepunkt på inngangssiden av viftemotorenes frekvensomformere, har det vært mulig å bestemme den elektriske effekten med god nøyaktighet. Luftmengden har i de fleste tilfeller blitt avlest fra display på kontrollenheten til aggregatene, siden det ikke har vært mulig å finne gunstige målepunkt for luftmengden i kanalene.

Det er funnet store variasjoner i SFP-verdier for de målte anleggene, og det har ikke vært mulig å finne noen generell fellesnevner som kan beskrive en sammenheng mellom disse variasjonene. Alle anlegg er montert i forskjellige miljø, kanalnett, og driftes på varierende nivåer, som alt spiller inn på resulterende energibruk og SFP-faktor.

Resultatene viser at små endringer i luftmengde kan gi stort utslag på energi til viftedrift og driftskostnader. Ut fra et driftsøkonomisk perspektiv kan resultatene tyde på at det svarer seg å overdimensjonere ventilasjonsanlegg, slik at de kan driftes på lave nivåer. Ulempen med dette er større investeringskostnader, og en grundig økonomisk analyse må utføres for at overdimensjonering kan vises å være økonomisk lønnsom.

Innledning

Norge er i verdenstoppen når det gjelder krav til luftmengder i bygninger. Dette skal sikre tilfredsstillende inneklimate, men har også store følger for energiforbruket til bygninger. Det er derfor viktig at ventilasjonsanlegg prosjekteres og driftes, slik at man får et så energieffektivt anlegg som mulig. Ny teknisk forskrift til plan og bygningsloven (TEK 2007)^[v] har som hensikt å redusere energiforbruket til Norges bygningsmasse. SFP, eller specific fan power, er et av tiltakene som skal bidra til et lavere energiforbruk.

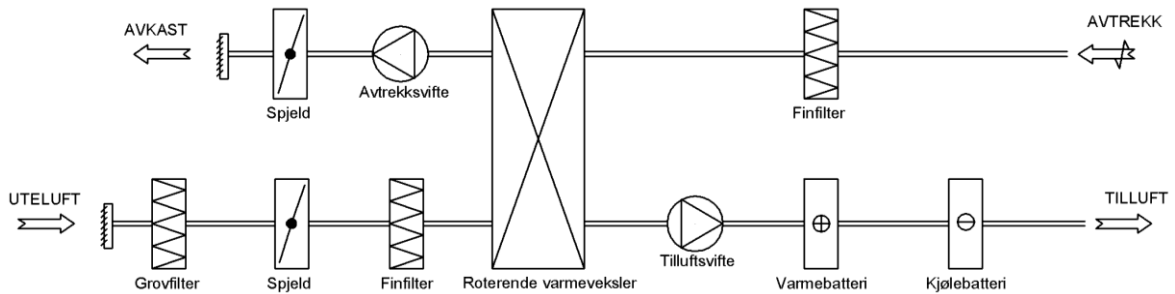
Målet med rapporten er å presentere grunnleggende teori om ventilasjonsanlegg og SFP, og bruke målinger på eksisterende anlegg for å se hvordan teorien stemmer i praksis. Ventilasjonsanlegg designes gjerne med en SFP-verdi som mål, men anleggene har sjelden eller aldri blitt målt for å verifisere om installasjonene lever opp til kravene som er satt. Dette gjelder spesielt litt eldre anlegg, som ble installert før de nye kravene i TEK 2007^[v] trådte i kraft.

Første del av rapporten gir et innblikk i hvordan et ventilasjonsanlegg er bygget opp, og de viktigste komponentenes funksjon, virkemåte og påvirkning på systemet beskrives. Her beskrives også definisjonen av SFP og hvilke systemparametre som påvirker den, samt metoder som kan brukes til å bestemme SFP til ventilasjonsanlegg. Ventilasjon er et omfattende emne, og gruppa har måttet sette begrensninger til hvor dypt inn i teorien rapporten skulle gå. Elektromotorer, viftetyper og varmevekslere kan alle kvalifisere til egne interessante studier, og denne rapporten klarer bare å trekke frem noen av de viktigste punktene som påvirker et ventilasjonssystem.

Andre del av rapporten tar for seg målinger av luftmengde og effekt på eksisterende anlegg. Måledata, beregninger og resultater for de aktuelle anleggene presenteres her. Resultatene for de forskjellige anleggene sammenlignes grafisk for, om mulig, å trekke noen slutninger ut fra måledataene.

Gruppa har valgt å bruke forenklete metoder for bestemmelse av nødvendige systemparametre, både med tanke på tilgjengelig måleutstyr for elektriske parametre og tilgang til gunstige målepunkt for luftmengder på anleggene. Metodene kan variere litt mellom ventilasjonsanleggene, men velges med hensyn på at best mulig måleresultat skulle oppnås med tilgjengelig utstyr og ressurser.

Oppbygging og virkemåte til ventilasjonsanlegg



Figur 1: Illustrasjon av oppbygningen til et enkelt balansert ventilasjonsanlegg.

Et enkelt balansert ventilasjonssystem består av to vifter der den ene tilfører filtrert og temperert frisk luft utenfra inn i det ventilerte lokalet, og den andre viften trekker dårlig luft ut av lokalet. Viftene kan kjøres med forskjellige luftmengder for å skape under- eller overtrykk i det ventilerte lokalet, etter ønske og behov. Differansen mellom luftmengdene vil da være i form av lekkasjer, for eksempel gjennom dører, vinduer og kanalnett. Ubalansert ventilasjon består i enkel form kun av en avtrekkvifte. Eksempel på ubalansert ventilasjon er avtrekkvifte som trekker røyk og matlukt ut av kjøkkenet, noe som er vanlig i privatboliger. Når luften strømmer gjennom ventilasjonsanlegget blir den behandlet for å kunne tilfredsstille krav til luftkvalitet og komfort. Hovedkomponentene i et ventilasjonsanlegg er kort beskrevet nedenfor.

Inntaksrist og filtre^[x]

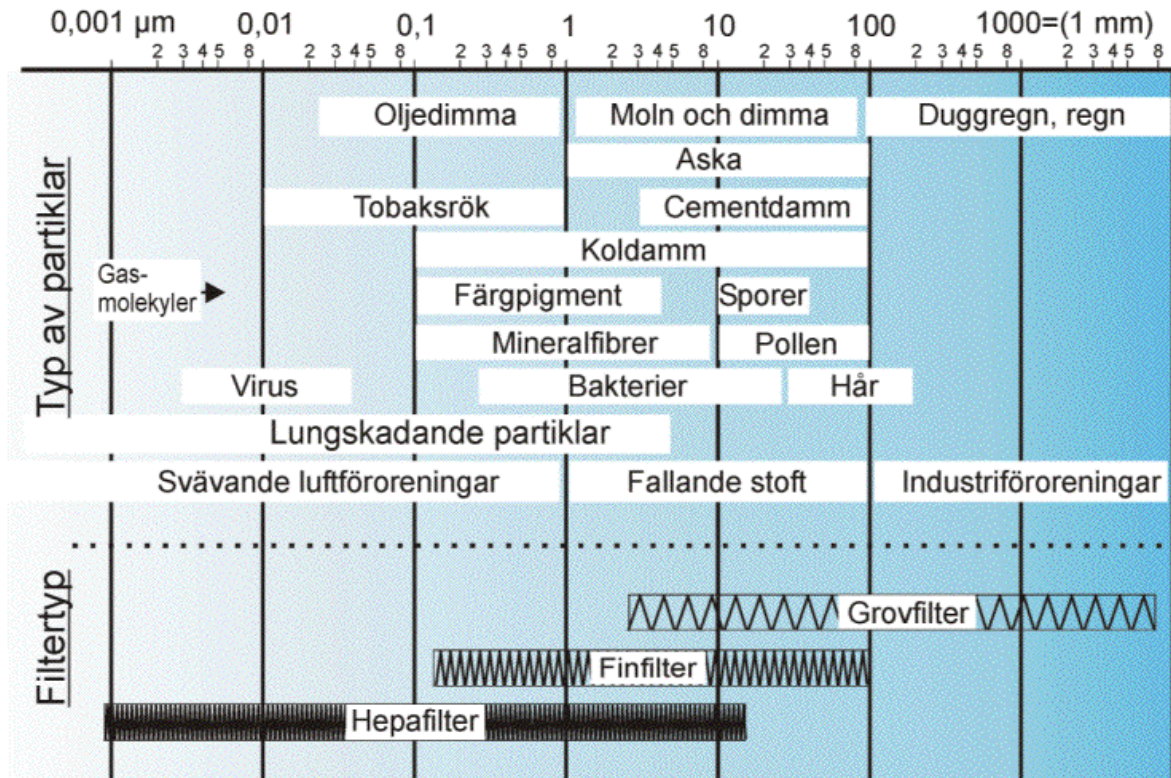
Inntaksrist er vanligvis den første komponenten på tilluftsiden, gjerne kombinert med grovfilter. Denne skal stoppe regn, snø og store partikler, som kan danne grobunn for sopp og bakterievekst, fra å komme inn i ventilasjonsanlegget.

Filtrene fjerner partikler fra luftstrømmen for å kunne opprettholde krav til luftkvalitet, men også for å beskytte ventilasjonsanlegget mot unødig slitasje og skader forårsaket av partiklene. Det vil alltid oppstå et visst trykkfall over filtrene, noe som er vanskelig å unngå, siden filtrene er en nødvendig del av anlegget. Valg av filtertype og dimensjonering må derfor gjøres grundig. Etter hvert som filtrene blir skitne øker trykkfallet, og viftene må jobbe hardere for å flytte samme luftmengde. Derfor er det viktig at filtrene kontrolleres jevnlig og skiftes ut, eller renses, ved behov.



Figur 2: Eksempel på et rammemontert posefilter. Kilde: www.interfil.no

Felles for inntaksrist og filter er at trykkfallet reduseres og utskillingsgraden øker ved redusert strømningshastighet. Dette medfører at gjennomstrømningsarealet bør være en del større enn tverrsnittsarealet til inntakskanalen.



Figur 3: Sammenligning mellom partikkelstørrelser og filtertyper^[vi]. Kilde: www.slussen.biz

Spjeld

Spjeld brukes til å regulere luftmengden som strømmer gjennom kanalene. Regulering kan være manuell eller automatisk ved bruk av for eksempel bevegelses- eller CO₂-sensor. Automatiske, trinnløse variable spjeld kalles modulerende, og blir mye brukt i DCV systemer i kombinasjon med temperatur- og CO₂-senser. Automatiske stengespjeld blir ofte brukt til å regulere soner i VAV systemer, og til å stenge hovedkanalene til ventilasjonsanlegget når det ikke er i drift for å stoppe uønsket trekk gjennom kanalnettet. DCV og VAV er nærmere beskrevet i kapitlet om Styringsprinsipper^[iii].



Figur 4: Automatisk stengespjeld. Kilde: www.exhausto.no

Lyddemper

Lyddemper brukes for å dempe lyd som genereres av luften som strømmer inn kanalen. Lyddemperen bør ha den samme innvendige dimensjon som kanalen for øvrig, slik at den medfører liten anleggsmotstand. Lyddemper blir montert etter spjeld for å dempe lyden som oppstår når luften endrer hastighet.



Figur 5: Lyddemper for kanalmontering. Kilde: www.flaktwoods.com

Varmeveksler^[ii]

Varmevekslere blir brukt for å utnytte noe av varmeenergien i den varme luften som ventileres ut av bygningen, og som ellers ville gått tapt. Varme fra utgående luft overføres til den kaldere inngående luften. Varmevekslere kan også brukes til å kjøle ned tilluften i varme perioder, men har da lav virkningsgrad. Det finnes mange forskjellige typer

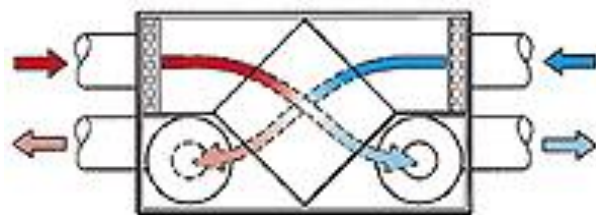
varmevekslere på markedet, men det er kun de to mest brukte konstruksjonene som er beskrevet her. Ulempe med varmevekslere er at de tilfører et trykktap i systemet slik at det kreves mer vifteenergi for å transportere luften. For å redusere dette trykktapet bør det vurderes muligheter for bypass-kanaler utenom varmeveksleren, som kan brukes i perioder der det ikke er behov for oppvarming eller avkjøling av tilluften.

Roterende varmeveksler består av rotorhjul med mange små kanaler, vanligvis av aluminium, hvor luft strømmer gjennom. Den ene halvparten av rotorhjulet varmes opp av den varme avtrekksluften, mens den andre halvparten avgir varme til den kaldere tilluften. Varmeoverføringen kan reguleres ved å endre hastigheten på rotoren. Fordeler er høy temperaturvirkningsgrad på ca 75 % -85 %, og i praksis ikke behov for avriming og drenering. Ulemper er fare for lekkasje av forurenset luft mellom avtrekk og tilluft, og tilsmussing i de små kanalene.

I kryssvarmeveksler strømmer varm og kald luft i separate kanaler som krysser hverandre i 90° vinkel. Varme overføres gjennom tynne skillevegger, ofte av aluminium. Denne typen varmeveksler har generelt større trykktap enn roterende varmevekslere på grunn av at luftstrømmen endrer retning.

Temperaturvirkningsgrad er ca 70 % -

75 % under ideelle forhold, men i kalde perioder er det behov for avriming og effektiv gjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad er ca 50 % - 65 %. Fordeler er at luftstrømmene her helt adskilt slik at det ikke er fare for lekkasje mellom avtrekk og tilluft, og konstruksjonen er enkel og lite plasskrevende. Ulemper er lav temperaturvirkningsgrad og behov for avriming i kalde perioder krever at det må legges opp til drenering.



Figur 6: Prinsipp tegning for kryssvarmeveksler.
Kilde: www.flexit.no

Varme- og kjølebatteri

Varmebatteri brukes når det er behov for å varme opp innkommende luftstrøm mer enn det som kan oppnås i varmeveksleren. Kjølebatteri brukes når det er behov for nedkjøling av innkommende luftstrøm. Batteriene plasseres i kanalen på tilluftsiden av vifteanlegget. Alle typer batterier fører til økning i systemets trykkfall og det bør vurderes muligheter for bypass-kanaler ved design av ventilasjonssystemet som leder luftstrømmen utenom aggregatet, noe som kan redusere trykkfallet når det ikke er behov for oppvarming eller nedkjøling av tilluften. I mange tilfeller er det ikke nødvendig med varmebatteri, siden varmevekslerne har god nok virkningsgrad til å holde temperaturen på tilluften på ønsket nivå.



Figur 7: Varmtvannsbatteri.
Kilde: www.systemair.com

I varmtvannsbatteri sirkulerer varmt vann i rør av kobber, som sammen med aluminiums lameller overfører varme til luften som strømmer gjennom batteriet. Prinsippet for kaldtvannsbatteri er tilsvarende, men her er det kaldt vann eller annet kjølemedium som sirkulerer i rørene, og kjøler ned luften.

Elektrisk varmebatteri har elektriske varmeelement som varmer opp luftstrømmen.

For å sikre at tilluften har riktig komforttemperatur er aggregatene vanligvis utstyrt med elektronikk som regulerer temperaturen på tilluften i henhold til en innstilt ønskeverdi.



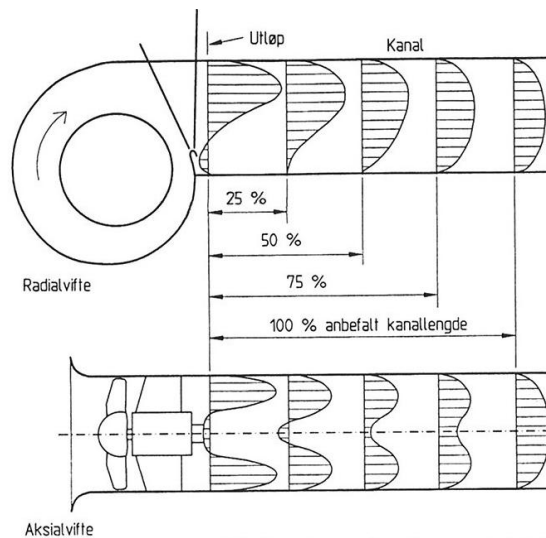
Figur 8: Elektrisk varmebatteri.
Kilde: www.systemair.com

Vifter^[x]

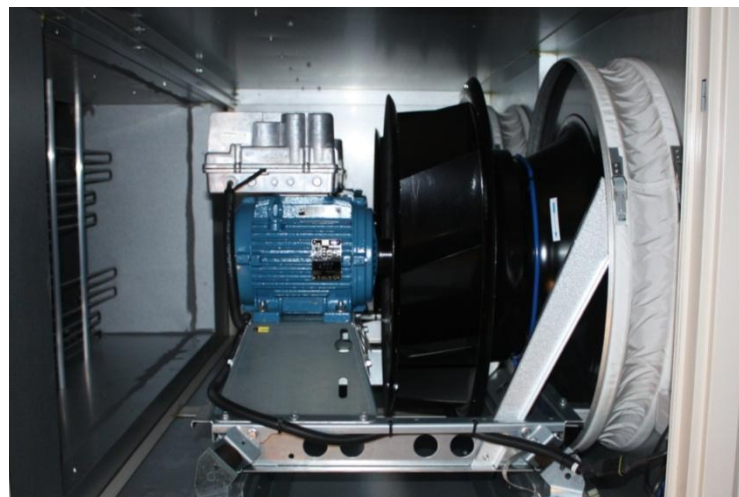
Det finnes to prinsipielt forskjellige viftetyper; radial- og aksialvifter, navngitt etter utløpsstrømmens retning i forhold til rotasjonsaksen. Radialvifter kan ha skovler som enten er bakoverbøyde (B-hjul), rette/radielle (T-hjul) eller fremoverbøyde (F-hjul), der B-hjul er mest benyttet pga. høyest virkningsgrad. Aksialvifter har god virkningsgrad ved lave trykkfall og store luftmengder.

Aksi-radielle (halv-aksial) vifter er en kombinasjon av radial- og aksialvifte. Denne typen vifter bygger opp statisk trykk og får minimalt med utløpstap. De er fleksible i forhold til plassering av vifteutløp og videre utforming av kanalanlegg.

Kammervifter er radial- eller aksi-radielle vifter som bygger opp statisk trykk direkte i viftekammeret og gir jevn utblåsning fra aggregatet. Kapasitetsregulering kan gjøres med spjeld i innsug, men frekvensomformer for turtallsregulering er å foretrekke pga. bedre virkningsgrad. Viftene har meget god virkningsgrad og den "bratte" karakteristikken gjør dem lite påvirkelige for endringer i trykkforhold.




Figur 9: Prinsipp og strømningsbilde for radial- og aksialvifte^[x].




Figur 10: Viftekammeret på tilluftsiden av GOLD RX60. Dobbelt kammervifte i aksi-radial utførelse med direkte drift. Frekvensomformer er montert direkte på motoren, og elektrisk varmebatteri kan skimtes til venstre i bildet.

Tabell 1: Dobbeltsugende radialvifte med foroverbøyde skovler. Direktedrevet viftehjul med ytterrotormotor. Kilde: www.novagg.no

Fordele	Ulemper	
<ul style="list-style-type: none"> • Høy virkningsgrad, da det ikke er noe transmisjonstap. • Lav vibrasjon nivå. • Lavt lydnivå. 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenset arbeidsområdet. • Turtall må reguleres ved varierende luftmengde. • Skovlene trenger tilgjengelighet for vaskbarhet og vaskefrekvens 	

Tabell 2: Enkeltsgugende radialvifte med bakoverbøyde skovler uten kapsling. Direktedrevet viftehjul med ytterrotormotor. Kilde: www.novagg.no

Fordele	Ulemper	
<ul style="list-style-type: none"> • Viftehjul av denne typen bygger opp trykk direkte i viftekammeret og gir dermed jevn utblåsing fra aggregatet. • Høy virkningsgrad med bakoverbøyde skovler og ingen transmisjonstap 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenset arbeidsområdet. • Turtall må reguleres ved varierende luftmengde 	

Kraftoverføring og turtallsregulering^[x]

Kraftoverføring mellom motor og vifte fører også til energitap hvis det ikke benyttes direktdrift. De fleste vifter i eldre anlegg er reimdrevet, men de aller fleste nyere ventilasjonsanlegg benytter direktdrift med frekvensomformer for turtallsregulering.

Dårlig utført og vedlikeholdt reimoverføring kan gi et tilleggstep på mer enn 10 % i forhold til Tabell 3. Virkningsgraden til reimoverføring varierer i forhold til motorstørrelse, og har best virkningsgrad for store motorer. Ved bruk av reimdrift anbefales det å bruke flatreim som har høyere virkningsgrad enn kilereimdrift, siden denne reimtypen bøyes lettere rundt reimskivene.

Anlegg med variabel luftmengende bør benytte frekvensomformer for turtallsregulering, som sørger for at motoren får optimal drift under alle forhold. I slike tilfeller er det viktig å bruke frekvensomformer med høy virkningsgrad. Moderne frekvensomformere har en virkningsgrad på ca 95 %, men varierer litt mellom fabrikat og modeller.

Tabell 3: Sammenhengen mellom virkningsgrad til motor og kraftoverføring med kilereimdrift i forhold til motorstørrelse^[x].

Vifteeffekt[kW]	Motorens virkningsgrad	Kraftoverføringens virkningsgrad
0,25	60 %	
3	80 %	85 %
3-10	80-85 %	90 %
10-50	85-90 %	93 %
>50	>90 %	95 %

Motorer^[x]

Virkningsgraden til motorer i vifteanlegg er av stor betydning, og varierer avhengig av størrelse, type og tilpasning til belastning. En motor med merkeeffekt større enn behovet betegnes som overdimensjonert, og har generelt lavere virkningsgrad enn motorer som er tilpasset til belastningen. Mest brukt i dag er 3-fase motorer pga. bedre dreiemoment og virkningsgrad i forhold til 1-fase motor av tilsvarende størrelse. Moderne, høyeffektive motorer, klasse EFF2 eller bedre, kan oppnå en vesentlig bedre virkningsgrad enn hva som er oppgitt i Tabell 3^{[ix][xii]}. For litt større motorstørrelser er klasse EFF1 å anbefale, siden den ekstra investeringskostnaden kan dekkes inn i løpet av relativt kort tid som følge av sparte driftskostnader.

Kanaler^[x]

Utformingen av kanalnettet har stor innvirkning på ventilasjonsanleggets funksjon og energibehovet til viftedrift. Kanalføringen med det største trykkfallet fra aggregat til ventil kalles ”kritisk vei”, og det er den som bestemmer trykkfallet i kanalnettet. Tiltak langs kritisk vei for å redusere trykkfallet kan føre til at kritisk vei endrer seg til en annen kanaltrasé. Ved optimalisering av kanaltrykkfall bør man benytte dataprogrammer som beregner resulterende trykkfall etter hvert som man prøver ut forskjellige tiltak.

For å holde trykkfallet så lavt som mulig bør det brukes optimale komponenter langs kritisk vei. Det bør for eksempel brukes bender i stedet for påstikk og to 45° bender i stedet for et 90° bender, der det er mulig. Eventuelle 90° bender plasseres med innbyrdes avstand på minst tre kanaldiametre. Kanalnettet bør planlegges slik at kanalføringer blir kortest mulig og med så få bender som mulig. Ved å bruke store kanaldimensjoner reduseres trykkfallet i kanalnettet, men det krever mer plass til kanaltraséer, og øker investeringskostnadene. Sirkulære rør bør brukes fremfor firkantede pga. bedre strømningsbilde. Mye brukt til ventilasjonskanaler i dag er spiralrør, men glatte rør bør også vurderes brukt da de har lavere friksjon.



Figur 11: Eksempler på kanalkomponenter.
Kilde: www.spiro.ch

Styringsprinsipper^[iii]

Valg av styringsprinsipp for ventilasjonsanlegg har stor innvirkning på både installasjons- og driftskostnader, i tillegg til mulighetene for å kontrollere opplevd komfort og inneklima. De tre hovedprinsippene for ventilasjonsanlegg gis her en rask introduksjon.

CAV (*Constant Air Volume*)

Ved CAV styring går ventilasjonsanlegget med en konstant luftmengde i driftstiden, og temperaturen på tilluften reguleres etter behov. Den aktuelle luftmengden er beregnet ut fra gjennomsnittbehovet/personbelastningen for sonen i driftstiden, og anlegget er dimensjonert deretter. Ventilasjonsanlegget har normalt 2 faste trinn, full og redusert effekt. Tidsstyring slår anlegget av og på, gjerne med mulighet for manuell overstyring og bruk av bevegelsessensorer.

Egnet for soner der det er:

- Jevnt behov for ventilasjon
- Liten variasjon i personbelastningen
- Liten variasjon i varmebelastningen
- Eksempel: kopirom, gangarealer, toaletter, oppvarmingskjøkken



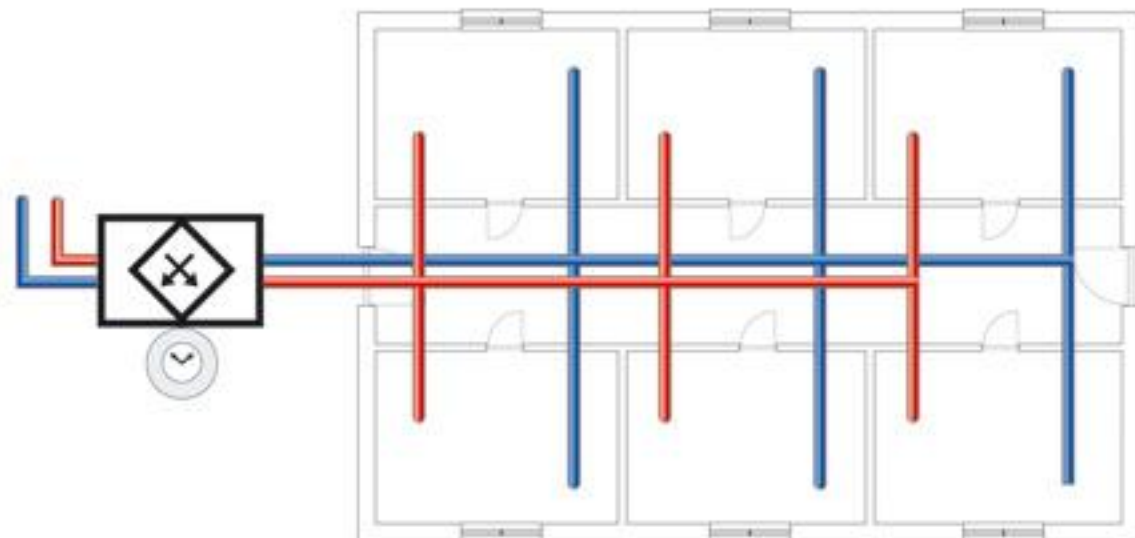
Figur 12: Illustrasjon av luftmengde over tid ved CAV-styringsprinsipp .
Kilde: www.exhausto.no

Fordeler med CAV styring:

- Enkel installasjon og styring
- Rimelige installasjonskostnader

Ulemper med CAV styring:

- Samme luftmengde i alle rom uansett belastning av rommene



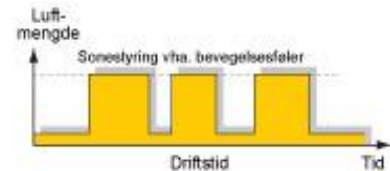
Figur 13: Illustrasjon av layout og komponenter ved CAV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no

VAV (*Variable Air Volume*)

Ved bruk av VAV styring betjener ventilasjonsanlegget flere soner som kan styres uavhengig av hverandre, slik at ventilasjonen i soner som ikke er i bruk kan stenges av ved bruk av spjeld i kanalene. Styring av spjeld kan være manuell eller ved bruk av bevegelsessensorer. Ventilasjonsanleggets effekt varieres for å opprettholde et forhåndsinnstilt trykk i hovedkanalene, mens temperaturen på tilluften holdes konstant. Tidsstyring blir brukt til å slå grunnventilasjon av og på.

Egnet for soner der det er:

- Rom som brukes periodevis
- Jevn personbelastning når rommet er i bruk
- Jevn varmebelastning når rommet er i bruk
- Eksempel: klasserom (østvendte), enkeltmannskontor med solinnfall



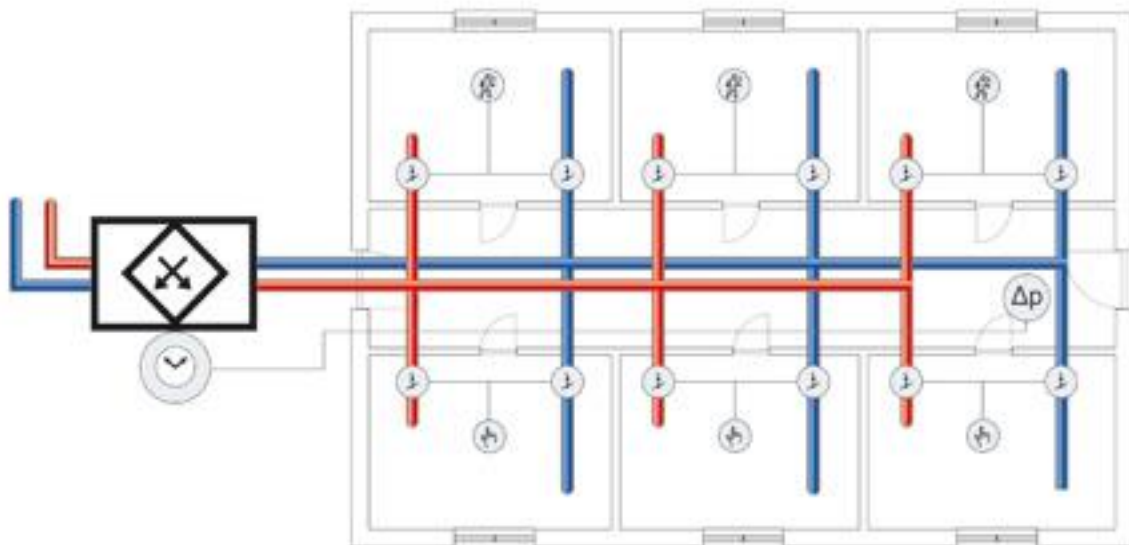
Figur 14: Illustrasjon av luftmengde over tid ved VAV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no

Fordeler med VAV styring:

- Ventilasjonen er avhengig av hvilke rom som er i bruk
- Ved bruk av kontakt eller bevegelsesføler økes ventilasjonen automatisk ved behov
- Mer driftsøkonomisk enn CAV

Ulemper med VAV styring:

- Luftmengde til rommet er konstant uansett personbelastning
- Litt dyrere installasjon enn CAV



Figur 15: Illustrasjon av layout og komponenter ved VAV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no

DCV (*Demand Controlled Ventilation*)

Ved bruk av DCV styring kan et ventilasjonsanlegg betjene flere soner der ventilasjonen til hver enkelt sone styres trinnløst avhengig av belastningen i rommet. Modulerende spjeld i hver sone åpnes og stenges gradvis etter behov ved bruk av temperatur- og/eller CO₂-sensorer. Ventilasjonsanleggets effekt er helt variabel og styres slik at et forhåndsinnstilt trykk opprettholdes i hovedkanalene, mens temperaturen på tilluften holdes konstant. Tidsstyring slår grunnventilasjonen av og på, men kan også overstyres ved bruk av bryter og/eller bevegelsessensor der slike er montert.

Egnet for soner der det er:

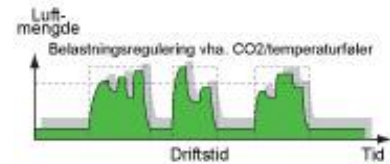
- Stor variasjon i personbelastningen
- Stor variasjon i varmebelastningen
- Eksempel: lærerværelse, klasserom, EDB-lokale, skolefritidsordning (SFO), gymnastikksal, dusj og garderøber, sørvendte møtelokaler

Fordeler med DCV styring:

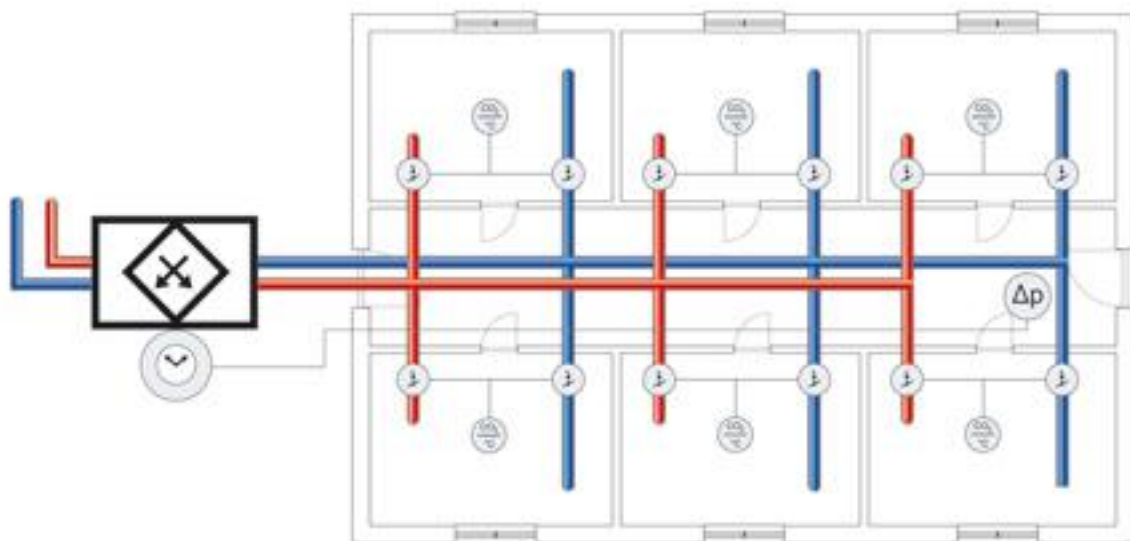
- Ventilasjonen er avhengig av den nøyaktige belastningen i rommene
- Helautomatisk regulering
- Mer driftsøkonomisk enn CAV og VAV

Ulemper med DCV styring:

- Dyrere installasjon enn CAV og VAV
- Større kompleksitet gir større mulighet for driftsproblemer



Figur 16: Illustrasjon av luftmengde over tid ved DCV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no



Figur 17: Illustrasjon av layout og komponenter ved DCV-styringsprinsipp. Kilde: www.exhausto.no

SFP (Specific Fan Power)^[xiii]

SFP-faktoren er et mål på energieffektiviteten til ventilasjonsanlegg. Den angir hvor mye elektrisk vifteenergi som brukes for å flytte luft gjennom ventilasjonsanlegget i forhold til mengden luft transportert. Faktoren er et tiltak for å redusere energiforbruket til ventilasjonsanlegg, og er nærmere beskrevet i EN 13779.

Beregning av SFP

SFP-verdien regnes ut etter formelen:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] \quad (1.1)$$

hvor:

$$\begin{aligned} \sum P &= \text{Summen av alle vifteeffekter [kW]} \\ \dot{V} &= \text{Totalluftmengde [m}^3/\text{s]} \end{aligned}$$

Totalluftmengden er her definert som den største av tillufts- og avtrekksluftmengdene i ventilasjonsanlegget. Det er netto luftmengde målt på romnivå som skal brukes ved bestemmelse av SFP. Netto luftmengde er alltid lavere enn brutto luftmengde i hovedkanalene på grunn av lekkasjer i kanalsystemet.

Måleusikkerhet

Måleusikkerheten beregnes ut fra formelen:

$$F_s = \sqrt{F_v^2 + F_I^2 + F_U^2} [\%] \quad (1.2)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} F_v &= \text{Måleusikkerhet for luftmengden [\%]} \\ &\quad (\text{Ved godt utførte målinger ca. 10\%}) \\ F_I &= \text{Måleusikkerheten for strømstyrke [\%]} \\ F_U &= \text{Måleusikkerheten for spenning [\%]} \end{aligned}$$

Måleusikkerheten er avhengig av målemetodene og måleinstrumentenes nøyaktighet. Det skal brukes metoder og måleutstyr som gir måleusikkerhet på maksimalt 12 %.

Forhold som påvirker SFP^[x]

Ved å bruke følgende sammenheng:

$$\sum P = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{\eta_{\text{tot}}} [\text{kW}] \quad (1.3)$$

kan formelen for SFP uttrykkes som:

$$\text{SFP} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{\dot{V} \cdot \eta_{\text{tot}}} = \frac{\Delta p_{\text{tot}}}{\eta_{\text{tot}}} [\text{kPa}] \quad (1.4)$$

Hvor:

Δp_{tot} = Totalt trykkfall i anlegget (sum tilluft og avtrekk) [kPa]

η_{tot} = Total virkningsgrad for anlegget [1]

Dette viser at SFP er direkte avhengig av det totale trykkfallet i systemet og den totale virkningsgraden.

Trykkfall

Trykkfallet i et vifteanlegg kan uttrykkes som:

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_{\text{vifter}} - \Delta p_{\text{tap}} \quad (1.5)$$

Hvor:

Δp_{vifter} = Total trykkendring over viftene [kPa]

Δp_{tap} = Totalt trykktap i systemet [kPa]

Viftene er de eneste komponentene i et ventilasjonsanlegg som øker trykket i luftstrømmen. Alle andre komponenter bidrar til å skape trykkfall i systemet. Dette trykkfallet kan være vanskelig å måle på et eksisterende anlegg, men er viktige faktorer i planleggings- og designfasen til et ventilasjonsanlegg, og blir vanligvis oppgitt av produsenter og leverandører.

Hastigheten til luftstrømmen i et ventilasjonsanlegg er i de fleste tilfeller turbulent. Trykkfallet mellom to punkter kan da uttrykkes som:

$$\Delta p_{1-2} = kv^2 [\text{Pa}] \quad (1.6)$$

Hvor:

k = Konstant

v = Lufthastigheten [m/s]

Dette viser at strømningshastigheten til luften har stor innvirkning på trykkfallet i systemet. For å oppnå lavere strømningshastighet må enten volumstrømmen reduseres for et bestemt kanaltverrsnitt, eller kanaltverrsnittet økes for en bestemt volumstrøm.

Gjennom enkelte komponenter som roterende varmevekslere og filter kan man få laminær strømning. Trykkfallet blir i slike tilfeller:

$$\Delta p_{1-2} = kv \text{ [Pa]} \quad (1.7)$$

Her har strømningshastigheten mindre påvirkning på trykkfallet, men også her vil lavere strømningshastighet bidra til å redusere trykkfallet. Lavere strømningshastighet vil også bidra til å øke virkningsgraden i roterende varmegjenvinner.

Virkningsgrad

Den totale virkningsgraden kan uttrykkes som:

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_m \cdot \eta_k \cdot \eta_v \cdot \eta_t \quad (1.8)$$

Hvor:

η_m	= Motorens virkningsgrad
η_k	= Kraftoverføringens virkningsgrad
η_v	= Viftens virkningsgrad
η_t	= Turtallsstyringens virkningsgrad

Eventuell virkningsgrad til transformator i anlegget kan også legges inn som faktor i formelen over. Typisk virkningsgrad for transformatorer er ca 98 % - 99 %, og har derfor relativt liten påvirkning på den totale virkningsgraden.

Ved brukt av direkte kraftoverføring mellom motor og vifte blir kraftoverføringens virkningsgrad lik 1^[vii]. Typisk virkningsgrad for moderne frekvensomformere er rundt 95 %. Moderne, høyeffektive elektromotorer har typisk virkningsgrad 85 % - 95 %. Vifter med bakoverbøyde skovler, som er det mest brukte i ventilasjonsanlegg, har typisk virkningsgrad 80 % - 85 %. Det er verdt å merke seg at virkningsgradene antar at motor og vifte går på optimalt turtall. Virkningsgraden til både motor og vifte reduseres utenfor sitt optimale arbeidsområde.

Valg av viftetype og motor er de to faktorene som har størst innvirkning på virkningsgraden til et ventilasjonsanlegg. Dette må derfor ilegges særlig stor vekt ved planleggingen og dimensjonering av ventilasjonsanlegg.

Tilført varme^[viii]

Vifte, motor og evt. driftsoverføring og frekvensomformer tilfører varme til luften. I perioder hvor det er behov for oppvarming vil dette være positivt, siden det minker behovet for oppvarming i varmebatteri. I perioder hvor det er behov for å kjøle ned tilluften vil den ekstra varmen være negativ i den forstand at den fører til økt nedkjølingsbehov i kjølebatteri. En reduksjon av SFP vil også føre til en reduksjon i tilført varme, og i områder hvor det er stort behov for oppvarming vil en reduksjon i SFP føre til økt oppvarmingsbehov i varmebatteri. Dette bør tas i betraktning ved en total økonomisk analyse.

Anbefalinger og krav til SFP

Kravene gjelder for nyinstallasjoner, men kan også gjerne brukes som mål ved oppgraderinger og modernisering av eldre anlegg.

Krav i TEK 2007^[v]:

- SFP < 2/1 for næringsbygg (2 om dagen og 1 om natten, ved bruk av nattsinking)
- SFP < 2,5 for boliger (hele døgnet)

Anbefalinger fra Statsbygg^[x]:

- SFP < 2,0 for nye bygg med begrenset driftstid (under 4.000 timer/år)
- SFP < 1,5 for nye bygg med døgkontinuerlig drift
- For VAV-anlegg økes SFP med 1,0 ved maksimal luftmengde
- SFP < 2,5 ved nyinstallasjoner i eksisterende bygg
- SFP < 4,0 ved nyinstallasjoner i eksisterende bygg med spesielt trange tekniske rom og vanskelig føringer

Bestemmelse av SFP for eksisterende anlegg

Nøyaktig bestemmelse av SFP for eksisterende anlegg vil som regel kreve mer ressurser enn hva som kan forsvares ut fra resultatene som kan oppnås ved slike målinger. Spesielt nøyaktig bestemmelse av luftmengde vil være særlig ressurskrevende da det ofte vil være vanskelig å finne gunstige målepunkt.

Dokumentasjon kan være mangelfull og i noen tilfeller umulig å fremskaffe. Det vil derfor være nødvendig å foreta en del forenklinger for å begrense ressursbruken. Hvilke metoder som er best egnet må vurderes i forhold til det enkelte anlegg.

Anlegg av nyere dato har gjerne innebygde målere hvor det er mulig å lese av nødvendige verdier direkte på et display eller indikatorer. Eldre anlegg har ofte ingen av disse mulighetene, og alternative målemetoder må vurderes for det enkelte anlegget i forhold til målenøyaktighet og ressursbruk.

Måling av elektriske parametre

For nøyaktig å kunne bestemme vifteeffektene i et ventilasjonsanlegg kreves det spesialinstrument som kan måle den aktive effekten direkte. Slike instrument er forholdsvis kostbare, og er bare nødvendig der det stilles store krav til nøyaktighet. Ved gjennomtenkt valg av målepunkt kan effekten bestemmes ved bruk av enklere metoder og måleinstrumenter, dog med noe redusert nøyaktighet.

På anlegg der viftemotorene styres av frekvensomformere kan det brukes en vanlig strømtang til å måle spenning og strømstyrke på inntakssiden av frekvensomformereren. Frekvensomformereren vil i praksis isolere motoren fra strømforsyningen, slik at effektfaktoren blir tilnærmet lik 1. På grunnlag av de målte verdiene kan vifteeffekten beregnes ved bruk av formel 1.10.

Målinger på motorer som er direkte tilkoblet strømmettet uten frekvensomformer vil ikke direkte gi korrekte verdier. Det er på grunn av faseforskyvning mellom spenning og strøm i vekselstrømmotorer. Ved bruk av vanlig strømtang vil det være den tilsynelatende effekten som måles, og som alltid være større enn den aktive effekten. I slike tilfeller må effektfaktoren til motoren anslås, noe som kan være meget usikkert siden den vil variere i forhold til belastningen. På grunnlag av de målte verdier og anslått effektfaktor kan effekten beregnes ut fra formel 1.9.

Målinger på utgangssiden av frekvensomformer vil ikke gi noen brukbare verdier ved bruk av vanlig strømtang. I slike tilfeller vil det være nødvendig med spesielle måleinstrument som kan håndtere de høyfrekvente utgangsspenningene.

Beregning av elektrisk vifteeffekt

Effekt for trefase induksjonsmotorer beregnes etter formelen:

$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{1000} \text{ [kW]} \quad (1.9)$$

Hvor:

U = middelverdien av spenningen mellom fasene [V]

I = middelverdien av strømmen for hver enkelt fase [A]

$\cos \varphi$ = effektfaktor [1]

Ved bruk av frekvensomformer isoleres motoren i praksis fra strømforsyningen, og effektfaktoren, $\cos \varphi$, vil fra strømforsyningens side være tilnærmet lik 1^[vii].

Formel for effekten ved målinger tatt på inntakssiden til frekvensomformer forenkles da til:

$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} \text{ [kW]} \quad (1.10)$$

Bestemmelse av luftmengde

Ved bestemmelse av luftmengden i et ventilasjonsanlegg skilles det mellom netto luftmengde på romnivå og brutto luftmengde ved aggregatet. Netto luftmengde vil alltid være lavere enn luftmengden ved aggregatet grunnet lekkasjer og tap i kanalene og andre komponenter i systemet. Det er netto luftmengde som skal brukes ved bestemmelse av SFP. Nøyaktig måling av netto luftmengde i et eksisterende anlegg vil som regel kreve store ressurser, og kan sjelden forsvares ut fra nytteverdien som oppnås ved bestemmelse av SFP.

I mange tilfeller vil ikke luftmengden være lik for tilluft og avtrekk. Dette kan skyldes målefeil, men det kan også være at anlegget er innstilt til å holde over- eller undertrykk i sonen det betjener, ved å kjøre med forskjellig luftmengde på tilluft og avtrekk. Differansen i luftmengden vil da ta form som lekkasjer gjennom dører og vinduer, eller selve kanalnettet. Det er den største luftmengden som skal brukes ved beregning av SFP.

Mangel på gunstige målepunkt vil ofte være et problem på eksisterende anlegg. I de fleste tilfeller vil forenklete metoder være gode nok til å kunne bestemme luftmengden til ventilasjonsanlegget med tilstrekkelig nøyaktighet. Skulle resultatet avvike fra det som er forventet, og besparelsen potensielt store nok, kan grundigere målinger foretas. Ventilasjonsanlegg av litt nyere dato har gjerne innebygde luftmengdemålere, slik at brutto volumstrøm kan leses av direkte på displayenhet på anlegget. Anlegg uten denne muligheten krever alternative metoder.

Hvis det finnes gunstige målepunkt, kan det monteres luftmengdemålere i hovedkanalene. Et annet alternativ kan være å måle trykkfall over filtrene, og ved hjelp av trykkfallsdiagram bestemme luftmengden gjennom dem. Dette krever rene filter, ettersom trykkfallet stiger etter hvert som filtrene blir skitne. Det kan også være vanskelig å framskaffe trykkfallsdiagram for filtre av eldre dato.

Metoder og måleinstrument brukt

Måling av strøm og spenning

Måleinstrument brukt til elektriske målinger i denne rapporten er en vanlig strømtang av type Fluke T5-1000. Målepunktene er valgt med tanke på tilgjengelighet og størst mulig nøyaktighet ved bruk av tilgjengelig måleinstrument. Målinger mellom frekvensomformer og motor vil ikke gi korrekte verdier med det aktuelle måleinstrumentet, og målepunktene er derfor valgt på inntakssiden til frekvensomformerne.

Måleusikkerhet for strømstyrke^[iv]: $\pm(3\% + 3 \text{ siffer}) \Rightarrow F_1 = 3\%$

Antar her at måleusikkerheten for avlest strømstyrke er uniformfordelt med standardavvik $\sigma_x = F_1 = 3\%$, og at standardavviket er det samme for alle enkeltmålinger.

Ved beregning av middelværdi for strømstyrken ut fra måling på tre faser blir standardavviket for middelværdien:

$$F_1 = \sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\text{Var}\left(\frac{1}{3}x_1 + \frac{1}{3}x_2 + \frac{1}{3}x_3\right)} = \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot 3\sigma_x^2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 3\% = \sqrt{3}\% \approx \pm 2\%$$

På grunnlag av et tilfeldig utvalg målinger av spenning beregnes måleusikkerheten til spenningen:

Tabell 4: Tilfeldige målinger av spenning.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
410 V	404 V	405 V	395 V	400 V	401 V	396 V

Middelværdi for spenning:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{7} (410 + 404 + 405 + 395 + 400 + 401 + 396) \text{ [V]} = 401,6 \text{ V}$$

Standardavvik for spenningen:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 2811 \text{ V}, \quad \sum_{i=1}^n x_i^2 = 1128983 \text{ V}^2$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)} = \sqrt{\frac{1}{7-1} \left(1128983 \text{ V}^2 - \frac{1}{7} (2811 \text{ V})^2 \right)} = 5,26 \text{ V}$$

Standardavviket i % av middelverdi:

$$F_U = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{5,26 \text{ V}}{401,6 \text{ V}} \cdot 100\% = 1,31\%$$

Med valgt verdi for spenning lik 400 V, rundes måleusikkerheten for spenningen opp til nærmeste hele prosent, slik at $F_U = 2\%$

Total måleusikkerhet for effekt, rundet opp til nærmeste hele prosent, blir da:

$$F_E = \sqrt{F_I^2 + F_U^2} = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = \pm 3\%$$

Bestemmelse av luftmengde

I utgangspunktet skulle luftmengder måles i hovedkanalene til anleggene. På grunn av mangel på gunstige målepunkt er luftmengdene blitt bestemt på alternative måter. De fleste anlegg i rapporten er GOLD aggregat av nyere dato der luftmengden kan avleses fra display på kontrollenhet, og den muligheten er benyttet der det var mulig. Anlegg 1 hadde ikke den muligheten og luftmengden er bestemt ut fra trykkfallsdiagram for filtrene.

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat¹: $F_V = \pm 5\%$

Usikkerhet for avlest luftmengde, Interfil trykkfallsdiagram^[1]: $F_V = \pm 10\%$

Målinger ved variabel luftmengde

For å få et tydelig bilde av hvordan effekt og SFP varierer med hensyn på luftmengden, er det foretatt målinger ved variabel luftmengde på noen av aggregatene. Målingene er videre brukt til å konstruere systemkurver for SFP, effekt og årskostnad til elektrisk viftedrift for de aktuelle anleggene.

Beregning av systemkurve for effekt og SFP

Ved å bruke affinitetslovene kan effektbruken i forhold til luftmengden uttrykkes som:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right)^3 \quad (1.11)$$

En generell formel for effektbruk i forhold til luftmengde kan da uttrykkes som:

$$P(\dot{V}) = k\dot{V}^3 + c \text{ [kW]} \quad (1.12)$$

Hvor:

$$\dot{V} = \text{Luftmengde [m}^3/\text{s]}$$

$$P(\dot{V}) = \text{Elektrisk effekt ved luftmengde } \dot{V} \text{ [kW]}$$

¹ Fra e-post korrespondanse med Ernst Børge Johansen, Swegon AS, <http://www.swegon.com>.

NB! Bruk av affinitetslovene forutsetter at virkningsgraden er konstant, noe den i praksis ikke er. Ved lave turtall reduseres virkningsgraden til både motor og vifte. Modellen gir likevel gode resultater ved tilpasning til målepunkter, men må brukes med særdeles stor forsiktighet ved ekstrapolering utover målte verdier.

For beste tilpasning av kurve til måldata brukes minste kvadraters metode (SSE) ved å tilpasse koeffisientene k og c i formel (1.12). Den resulterende formelen beskriver estimert effektkurve for systemet i forhold til luftmengden.

Systemkurven for SFP beregnes ved bruk av formel 1.1, der $\sum P$ erstattes med $P(\dot{V})$:

$$\text{SFP} = \frac{P(\dot{V})}{\dot{V}} = \frac{k\dot{V}^3 + c}{\dot{V}} = k\dot{V}^2 + \frac{c}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] \quad (1.13)$$

Økonomiske beregninger

Kostnader til elektrisk viftedrift har lineær sammenheng med effektbruken, og kan uttrykkes ved formelen:

$$\text{Årskostnad til viftedrift} = K \cdot P(\dot{V}) = K(k\dot{V}^3 + c) \text{ [kr/år]} \quad (1.14)$$

Hvor:

$$K = \text{Driftstimer/år multiplisert med kr/kWh} \left[\frac{\text{kr}}{\text{kW} \cdot \text{år}} \right]$$

Som grunnlag for beregning av årskostnad for viftedrift er det i denne oppgaven brukt følgende verdier:

Driftstid for anlegget	
Timer pr dag	11
Dager pr uke	5
Uker pr år	52
= Driftstimer pr år	2860

Strømpris er basert på data fra Statistisk Sentralbyrå for første kvartal 2009^[xi], og satt til 90 øre/kWh inkludert nettleie og avgifter.

Verdien for koeffisienten K blir med de oppgitte verdiene:

$$K = 2860 \text{ h/år} \cdot 0,90 \text{ kr/kWh} = 2574 \frac{\text{kr}}{\text{kW} \cdot \text{år}}$$

Anlegg 1: Karmsund videregående skole

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert CAV anlegg av fabrikat Covent som betjener klasserom etc. Aggregatet er bygget opp av flere moduler som er satt sammen til et komplett system. Anlegget har to vifter som er direktdrevet av hver sin 7,5 kW trefase motor med frekvensstyring.

Tabell 5: Hovedkomponenter, anlegg 1

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte	Halvaksial kammervifte
Varmebatteri (varmtvann)	
Kjølebatteri (kaldtvann)	

Tabell 6: Nominelle motordata, anlegg 1

Antall	2
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	7,5 kW
Total motoreffekt, P_{tot}	15 kW
Effektfaktor, $\cos \varphi$	0,78

Tabell 7: Filterdata, anlegg 1

Filter	Dimensjon	Ant. på tilluftside	Ant. på avtrekksside
IF85	592*742*535/10	4	4
VS 10-85	592*287*535/10	4	4

Målinger ved driftspunkt

Verdier for trykkfall over filter ble avlest på eksisterende filtervakt manometer, og verdier på frekvensomformerne ble lest av. Det ble opplyst om at filtrene nylig var skiftet. Elektrisk strømstyrke for viftemotorene ble målt i sikringsskap, som i praksis er på inntakssiden til frekvensomformerne. Verdi for spenning ble ikke målt, men bestemt på grunnlag av nominell spenning.

Tabell 8: Måledata, anlegg 1

	Tilluft (3.2F3)	Avtrekk (3.2F5)
Trykkfall over filter, Δp	50 Pa	70 Pa
Frekvensomformer, f	43.8 Hz	46.9 Hz
Spenning, U	400 V	400 V
Strøm fase 1, I_1	7,1 A	5,3 A
Strøm fase 2, I_2	6,3 A	4,7 A
Strøm fase 3, I_3	6,5 A	5,9 A

Beregninger

Middelverdi av strømstyrke for tilluftvifte:

$$I_{TV} = \frac{I_{1,TV} + I_{2,TV} + I_{3,TV}}{3} = \frac{7,1 + 6,3 + 6,5}{3} [\text{A}] = 6,63 \text{ A}$$

Middelverdi av strømstyrke for avtrekkvifte:

$$I_{AV} = \frac{I_{1,AV} + I_{2,AV} + I_{3,AV}}{3} = \frac{5,3 + 4,7 + 5,9}{3} [\text{A}] = 5,3 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt:

$$\begin{aligned} \sum P &= P_{TV} + P_{AV} \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot (I_{TV} + I_{AV})}{1000} [\text{kW}] \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot (6,63 \text{ A} + 5,3 \text{ A})}{1000} [\text{kW}] = 8,26 \text{ kW} \end{aligned}$$

Bestemmelse av luftmengde

Luftmengden bestemmes ut fra trykkfallsdiagram for filtrene (Vedlegg A1: IF85 Filter datablad og Vedlegg A2: VS 10-85 Filter datablad). Den største luftmengden av tilluft og avtrekk brukes videre til beregning av SFP.

Filtrene på tilluftssiden og avtrekkssiden har samme dimensjoner, og er bygd opp av flere mindre filter. På tilluftssiden er det fire helfilter (IF85) og fire halvfilter (VS 10-85) satt sammen til ett stort filtersystem. Identisk på avtrekkssiden.

Ifølge databladene til filterne finnes den største luftmengden der det er størst trykkfall over filterne.

Avlesning fra filterdiagram ved 70 Pa trykkfall:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{\text{IF85}} &= 2800 \text{ m}^3/\text{h} \\ \dot{V}_{\text{VS 10-85}} &= 1270 \text{ m}^3/\text{h}\end{aligned}$$

Total luftmengde:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= 4 \cdot (\dot{V}_{\text{IF85}} + \dot{V}_{\text{VS 10-85}}) = 4 \cdot (2800 + 1270) [\text{m}^3/\text{h}] \\ &= 16280 \text{ m}^3/\text{h} = 4,52 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, Interfil trykkfallsdiagram: $F_V = \pm 10\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

(Rundet opp til nærmeste hele prosent)

$$\begin{aligned}F_S &= \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} [\%] \\ &= \sqrt{10^2 + 2^2 + 2^2} [\%] = \pm 11 \%\end{aligned}$$

SFP:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{8,26 \text{ kW}}{4,52 \text{ m}^3/\text{s}} = 1,83 \pm 0,20 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: Karmsund videregående skole, Bygg H	Prosjekt:	Dato: 12. februar 2009
Anleggsnavn: Covent		Kode:
Anlegget betjener sone:	Sonens areal:	Sonens bruk: Undervisningslokaler
Netto luftmengde, prosjektert: 18 200 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 16 280 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 2
Netto luftmengde, \dot{V} : 4,52 m ³ /s	Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 8,26 kW	
Måleusikkerhet luftmengde: $\pm 10 \%$	Måleusikkerhet effekt: $\pm 3 \%$	Måleusikkerhet SFP: $\pm 11 \%$
SFP-verdi: 1,83 \pm 0,20 kW/m ³ /s	Rapporten utført av (firma):	
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki	Rapporten kontrollert av (navn):	
Underskrift (1):	Underskrift (2):	
Kommentarer: <ol style="list-style-type: none"> CAV anlegg Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk bestemt ut fra trykkfallsdiagram for filtrene. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer i kanalene og andre komponenter. Avvik mellom prosjektert og målt luftmengde. Kan skyldes metode brukt til å bestemme luftmengde. Se også Vedlegg B: E-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred. 		

Anlegg 2: Kontorbygg Ferkingstad og Alsaker AS

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert CAV anlegg av type GOLD RX11, som betjener et mindre kontorbygg. Det er et kompakt luftbehandlingssystem levert som en komplett enhet. Anlegget har to vifter som er direkte drevet av hver sin 0,55 kW trefase motor med frekvensomformer for hastighetsregulering.

Tabell 9: Hovedkomponenter, anlegg 2.

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte	Halvaksial kammervifte

Tabell 10: Nominelle motordata av typeskilt på motor, anlegg 2.

Antall	2
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	0,55 kW
Total motoreffekt, P_{tot}	1,1 kW
Effektfaktor, $\cos \varphi$	0,85

Målinger ved driftspunkt

Verdiene for luftmengde ble avlest fra display på kontrollenheten til aggregatet. Spenningen er fastsatt ved avlesning fra typeskilt på transformator. Strømstyrken ble målt på hovedsikringen, som var montert mellom transformatoren og anlegget. Målepunktet er da i praksis på inntakssiden til frekvensomformerne.

Tabell 11: Avleste luftmengder ved driftspunkt, anlegg 2.

	Tilluft	Avtrekk
Luftmengde, \dot{V}	1100 m ³ /h	1190 m ³ /h

Tabell 12: Strømstyrke ved driftspunkt målt på hovedsikring, anlegg 2.

Strøm fase 1, I_1	0,9 A
Strøm fase 2, I_2	1,0 A
Strøm fase 3, I_3	1,5 A

Beregninger

Middelverdi av strømstyrke:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{0,9 + 1,0 + 1,5}{3} [\text{A}] = 1,13 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt (formel 1.10):

$$\sum P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} [\text{kW}] = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,13 \text{ A}}{1000} [\text{kW}] = 0,78 \text{ kW}$$

Luftmengde:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{maks}} = 1190 \text{ m}^3/\text{h} = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat: $F_V = \pm 5\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

$$\begin{aligned} F_S &= \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} [\%] \\ &= \sqrt{5^2 + 2^2 + 2^2} [\%] = \pm 6 \% \end{aligned}$$

SFP-faktor:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{0,78 \text{ kW}}{0,33 \text{ m}^3/\text{s}} = 2,36 \pm 0,14 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: Ferkingstad og Alsaker AS Kontorbygg, Haugesund	Prosjekt:	Dato: 12. februar 2009
Anleggsnavn: GOLD	Kode: RX 11	
Anlegget betjener sone:	Sonens areal:	Sonens bruk: Kontorlokaler
Netto luftmengde, prosjektert: 1190 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 1190 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 2
Netto luftmengde, \dot{V} : 0,33 m ³ /s	Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 0,78 kW	
Måleusikkerhet luftmengde: ± 5 %	Måleusikkerhet effekt: ± 3 %	Måleusikkerhet SFP: ± 6 %
SFP-verdi: 2,36 ± 0,14 kW/m ³ /s	Rapporten utført av (firma):	
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki	Rapporten kontrollert av (navn):	
Underskrift (1):	Underskrift (2):	
Kommentarer: 1. CAV-anlegg 2. Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk avlest på aggregatets display. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer kanalene og andre komponenter.		

Målinger ved variabel luftmengde

Luftmengden ble justert trinnvis mellom minste og største mulige luftmengde for anlegget, og strømstyrke ble målt på hvert trinn etter at anlegget hadde stabilisert seg.

Tabell 13: Målinger ved variabel luftmengde., anlegg 2.

Luftmengde [m ³ /h]		Spenning [V]	Strøm, hovedinntak [A]		
TV	AV		F1	F2	F3
180	180	400	0,5	0,4	0,5
400	400	400	0,6	0,4	0,6
600	600	400	0,7	0,5	0,7
800	800	400	0,8	0,6	0,9
1000	1000	400	1,1	0,8	1,2
1200	1200	400	1,5	1,1	1,5
1400	1400	400	1,9	1,6	2,1

Beregning av systemkurver

Effekt og SFP for målingene er beregnet i Excel ved bruk av formel 1.1 og 1.10:

Tabell 14: Beregnede data ved variabel luftmengde, anlegg 2.

Luftmengde, V [m ³ /s]	Middelverdi strøm, I [A]	RX11, P [kW]	RX11, SFP [kW/m ³ /s]
0,050	0,47	0,3233	6,47
0,111	0,53	0,3695	3,33
0,167	0,63	0,4388	2,63
0,222	0,77	0,5312	2,39
0,278	1,03	0,7159	2,58
0,333	1,37	0,9469	2,84
0,389	1,87	1,2933	3,33

Koeffisientene k og c ble funnet ved bruk av *Solver* funksjonen i Excel til å minimere feilkvadratsummen (SSE), med følgende resultat:

Tabell 15: Kurvetilpasning til måledata ved bruk av Excel, anlegg 2.

Luftmengde, \dot{V} [m ³ /s]	RX11, P [kW]	$P^* = k \cdot \dot{V}^3 + c$	$(P - P^*)^2$
0,05	0,3233	0,347511567	0,00058620
0,111	0,3695	0,368133344	0,00000187
0,167	0,4388	0,422728942	0,00025828
0,222	0,5312	0,52700663	0,00001758
0,278	0,7159	0,701985395	0,00019362
0,333	0,9469	0,958234122	0,00012846
0,389	1,2933	1,322298014	0,00084088
		SSE=	0,00118601
k	16,59525394		
c	0,345437161		

Effektkurven for dette anlegget kan da uttrykkes ved formel (1.12):

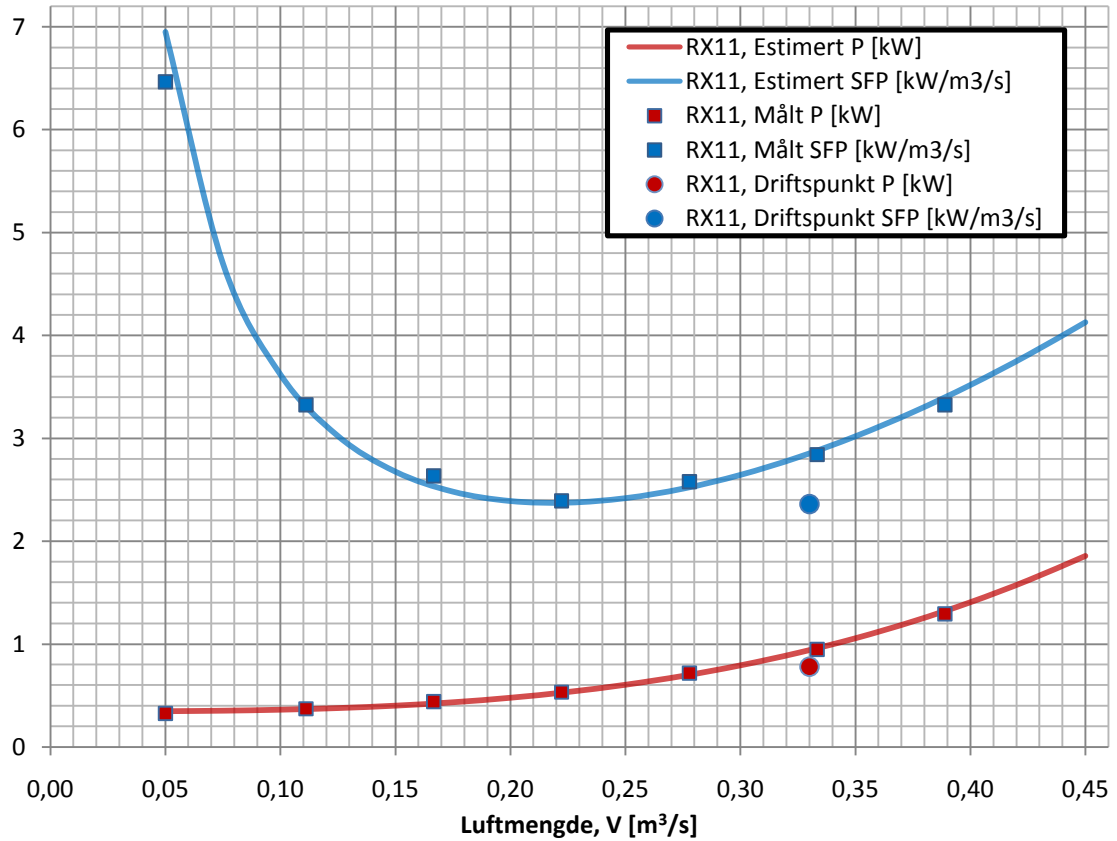
$$P(\dot{V}) = k\dot{V}^3 + c \text{ [kW]} = 16,5953 \cdot \dot{V}^3 + 0,3454 \text{ [kW]}$$

Kurven for SFP kan så uttrykkes ved formel (1.13):

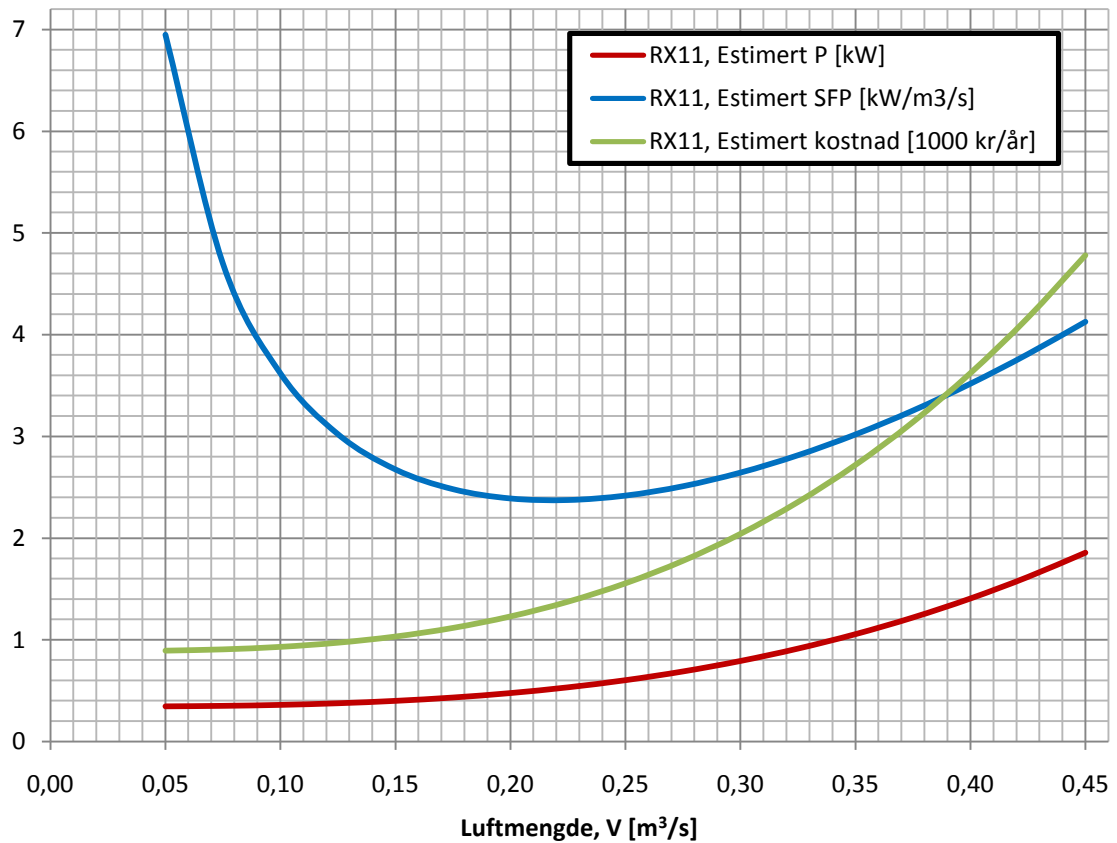
$$SFP = k\dot{V}^2 + \frac{c}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] = 16,5953 \cdot \dot{V}^2 + \frac{0,3454}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Kurven for årlig kostnad til viftedrift finnes av formel (1.14):

$$\text{Elektrisk driftskostnad} = K \cdot P(\dot{V}) = 2574 \cdot (16,5953 \cdot \dot{V}^3 + 0,3454) \text{ [kr/år]}$$



Figur 18: Kurvetilpasning til måledata, anlegg 2.



Figur 19: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 2.

Anlegg 3: Rica Maritim

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert CAV anlegg av type GOLD RX40, som betjener et kjøkkenlokale. Det er et kompakt luftbehandlingssystem i tre deler som er montert sammen til en enhet. Anlegget har to vifter som er direkte drevet av hver sin 6,5 kW trefase motor med frekvensomformer for hastighetsregulering.

Tabell 16: Hovedkomponenter, anlegg 3.

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte	Halvaksial kammervifte
Kjølebatteri	

Tabell 17: Nominelle motordata oppgitt av leverandør², anlegg 3.

Type	WEG 132S-04
Totalt antall i systemet	2
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	6,5 kW
Total motoreffekt, P_{tot}	13 kW
Effektfaktor, $\cos \varphi$	0,86

Målinger ved driftspunkt

Dette er et anlegg av nyere dato der det meste av nødvendige verdier kan leses av direkte på en håndholdt kontrollenhet. For å sikre sporbarhet og mulighet for senere sammenlikninger ble det lest av flere verdier enn hva som var nødvendig for beregning av SFP. Målingene for elektrisk strømstyrke er tatt på hovedinntaket på aggregatet, noe som i praksis er på inntakssiden til frekvensomformerne.

² Fra e-post korrespondanse med Ernst Børge Johansen, Swegon AS, <http://www.swegon.com>.

Tabell 18: Verdier avlest fra display på kontrollenhet, anlegg 3.

	Tilluft	Avtrekk
Luftmengde, \dot{V}	12 000 m ³ /h	12 000 m ³ /h
Trykkdifferanse, Δp	990 Pa	1000 Pa
Frekvens	55,2 Hz	51,4 Hz
Spenning	531 V	527 V
Strømstyrke	10,13 A	8,48 A
Effekt	5425 W	4067 W
SFP	2,8	

Tabell 19: Strømstyrke ved driftspunkt målt på hovedinntak, anlegg 3.

Strøm fase 1, I_1	14,0 A
Strøm fase 2, I_2	13,7 A
Strøm fase 3, I_3	14,8 A

Beregninger

Middelverdi av strømstyrke:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \text{ [A]} = \frac{14,0 + 13,7 + 14,8}{3} \text{ [A]} = 14,17 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt (formel 1.10):

$$\sum P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 14,17 \text{ A}}{1000} \text{ [kW]} = 9,82 \text{ kW}$$

Luftmengde:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{maks}} = 12000 \text{ m}^3/\text{h} = 3,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat: $F_V = \pm 5\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

$$F_s = \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} \text{ [%]} \\ = \sqrt{5^2 + 2^2 + 2^2} \text{ [%]} = \pm 6 \text{ %}$$

SFP-faktor:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{9,82 \text{ kW}}{3,33 \text{ m}^3/\text{s}} = 2,95 \pm 0,18 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: Rica Maritim Haugesund	Prosjekt:	Dato: 23. februar 2009
Anleggsnavn GOLD	Kode: RX 40	
Anlegget betjener sone:	Sonens areal:	Sonens bruk: Kjøkken
Netto luftmengde, prosjektert: 12 000 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 12 000 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 2
Netto luftmengde, \dot{V} : 3,33 m ³ /s	Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 9,84 kW	
Måleusikkerhet luftmengde: ± 5 %	Måleusikkerhet effekt: ± 3 %	Måleusikkerhet SFP: ± 6 %
SFP-verdi: 2,95 ± 0,18 kW/m ³ /s	Rapporten utført av (firma):	
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki	Rapporten kontrollert av (navn):	
Underskrift (1):	Underskrift (2):	
Kommentarer: 1. CAV-system 2. Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk avlest på aggregatets display. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer kanalene og andre komponenter.		

Anlegg 4: Math Lande Kontorbygg

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert VAV-anlegg av type GOLD™ RX 40, som betjener et kontorbygg, med reservekapasitet for senere utvidelser. Aggregatet er et kompakt luftbehandlingssystem i tre deler som er montert sammen til en enhet. Anlegget har to vifter som er direkte drevet av hver sin 5,5 kW trefase motor med frekvensomformer for hastighetsregulering.

Tabell 20: Hovedkomponenter, anlegg 4.

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte	Halvaksial kammervifte
Varmebatteri (elektrisk)	
Kjølebatteri (vannbårent)	

Tabell 21: Nominelle motordata oppgitt av leverandør (Swegon), anlegg 4.

Type	WEG 132S-04
Totalt antall i systemet	2
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	6,5 kW
Total motoreffekt, P_{tot}	13 kW
Effektfaktor, $\cos \varphi$	0,86

Målinger ved driftspunkt

Anlegget var av nyere dato og det meste av nødvendige verdier kunne avleses direkte fra håndholdt kontrollenhet. For å sikre sporbarhet og mulighet for senere sammenlikninger ble det avlest flere nøkkelverdier enn hva som var nødvendig for å beregne SFP. Elektrisk strømstyrke ble målt på hovedinntaket til aggregatet, noe som i praksis er på inntakssiden til frekvensomformerne.

Tabell 22: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 4.

	Tilluft	Avtrekk
Luftmengde, \dot{V}	7050 m ³ /h	7050 m ³ /h
Trykkdifferanse	190 Pa	190 Pa
Frekvens	36,3 Hz	33,3 Hz
Spenning	562 V	570 V
Strøm	5,25 A	4,87 A
Effekt	1588 W	1330 W
SFP	1,4	

Tabell 23: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 4.

Strøm fase 1, I_1	3,8 A
Strøm fase 2, I_2	4,0 A
Strøm fase 3, I_3	4,4 A

Beregninger

Middelverdi av strømstyrke:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \text{ [A]} = \frac{3,8 + 4,0 + 4,4}{3} \text{ [A]} = 4,07 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt:

$$\sum P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 4,07 \text{ A}}{1000} \text{ [kW]} = 2,82 \text{ kW}$$

Luftmengde:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{maks}} = 7050 \text{ m}^3/\text{h} = 1,96 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat: $F_V = \pm 5\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

$$F_s = \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} \text{ [%]} \\ = \sqrt{5^2 + 2^2 + 2^2} \text{ [%]} = \pm 6 \text{ %}$$

SFP-faktor:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{2,82 \text{ kW}}{1,96 \text{ m}^3/\text{s}} = 1,44 \pm 0,09 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: Math Lande kontorbygg Risøy, Haugesund	Prosjekt:	Dato: 23. februar 2009
Anleggsnavn GOLD		Kode: RX 40
Anlegget betjener sone:	Sonens areal:	Sonens bruk: Kontorlokaler
Netto luftmengde, prosjektert: 7050 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 7050 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 2
Netto luftmengde, \dot{V} : 1,96 m ³ /s		Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 2,82 kW
Måleusikkerhet luftmengde: ± 5 %	Måleusikkerhet effekt: ± 3 %	Måleusikkerhet SFP: ± 6 %
SFP-verdi: 1,44 ± 0,09 kW/m ³ /s		Rapporten utført av (firma):
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki		Rapporten kontrollert av (navn):
Underskrift (1):		Underskrift (2):
Kommentarer: 1. VAV-system 2. Anlegget har reservekapasitet for fremtidige utvidelser, og gikk på ca 50% av maksimal luftmengde når målinger ble tatt. 3. Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk avlest på aggregatets display. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer kanalene og andre komponenter.		

Anlegg 5: NAV kontorbygg, system 1

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert VAV anlegg av type GOLD RX80, som betjener første til tredje etasje i et kontorbygg. Det er et kompakt luftbehandlingssystem i tre deler og montert sammen til en enhet. Anlegget har 4 vifter som er direkte drevet av hver sin 6,5 kW trefase motor med frekvensomformer for hastighetsregulering.

Tabell 24: Hovedkomponenter, anlegg 5.

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte, 2 stk	Halvaksial kammervifte, 2 stk
Varmebatteri (elektrisk)	
Kjølebatteri (vannbårent)	

Tabell 25: Nominelle motordata oppgitt av leverandør (Swegon), anlegg 5.

Type	WEG
Totalt antall i systemet	4
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	6,5 kW
Total effekt, P_{tot}	26 kW
Effektfaktor, $\cos \varphi$	0,86

Målinger ved driftspunkt

Det var ikke mulig å finne brukbare målepunkter for luftmengden i kanalene. Uten gode målepunkt vil usikkerheten bli så stor at målingene blir ubrukelige. Luftmengden ble derfor avlest fra display på kontrollenheten til aggregatet.

Elektrisk strømstyrke ble målt på hovedinntaket til aggregatet, som i praksis er på inntakssiden til frekvensomformerne.

Tabell 26: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 5.

	Tilluft	Avtrekk
Luftmengde, \dot{V}	4600 (4800) l/s	4600 (4600) l/s
Trykkdifferanse	580 (340) Pa	580 (300) Pa
SFP	2,7	

På dette anlegget var mulig å lese av verdier for luftmengde og trykkfall to forskjellige plasser i menyen på kontrollenheten. Det ble bestemt å bruke det laveste tallparet for luftmengde videre i utregningene.

Tabell 27: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 5.

Strøm fase 1, I_1	19,7 A
Strøm fase 2, I_2	18,9 A
Strøm fase 3, I_3	21,1 A

Beregninger

Middelverdi av strømstyrke:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \text{ [A]} = \frac{19,7 + 18,9 + 21,1}{3} \text{ [A]} = 19,9 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt:

$$\sum P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 19,9 \text{ A}}{1000} \text{ [kW]} = 13,8 \text{ kW}$$

Luftmengde:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{maks}} = 4600 \text{ l/s} = 4,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat: $F_V = \pm 5\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

$$F_S = \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} \text{ [%]} \\ = \sqrt{5^2 + 2^2 + 2^2} \text{ [%]} = \pm 6 \text{ %}$$

SFP-faktor:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{13,8 \text{ kW}}{4,6 \text{ m}^3/\text{s}} = 3,0 \pm 0,18 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: NAV kontorbygg, system 1 Haugesund	Prosjekt:	Dato: 27. april 2009
Anleggsnavn: GOLD	Kode: RX 80	
Anlegget betjener sone: 1. – 3. etasje	Sonens areal:	Sonens bruk: Kontorlokaler
Netto luftmengde, prosjektert: 27 720 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 16 560 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 4
Netto luftmengde, \dot{V} : 4,6 m ³ /s	Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 13,8 kW	
Måleusikkerhet luftmengde: $\pm 5 \%$	Måleusikkerhet effekt: $\pm 3 \%$	Måleusikkerhet SFP: $\pm 6 \%$
SFP-verdi: 3,0 \pm 0,18 kW/m ³ /s	Rapporten utført av (firma):	
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki	Rapporten kontrollert av (navn):	
Underskrift (1):	Underskrift (2):	
Kommentarer: 1. VAV-system 2. Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk avlest på aggregatets display. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer kanalene og andre komponenter. 3. Avvik mellom prosjektert og målt luftmengde, antas å skyldes stengte spjeld i kanalnettet, men ble ikke undersøkt videre.		

Målinger ved variabel luftmengde

Luftmengden ble justert trinnvis mellom minste og største mulige luftmengde for anlegget, og strømstyrke ble målt på hvert trinn etter at anlegget hadde stabilisert seg.

Tabell 28: Avleste og målte verdier ved variabel luftmengde, anlegg 5.

Luftmengde [m^3/h]		Spenning [V]	Strøm, hovedinntak [A]		
TV	AV		F1	F2	F3
12240	12100	400	7,1	6,9	7,3
13320	13320	400	9,7	9,4	10
14760	14720	400	13,5	13,2	14,2
15550	15660	400	17,1	17,4	17,7
16200	16130	400	19	18,8	19,9
16920	16560	400	22,3	21,7	22,8

Beregning av systemkurver

Beregnet effekt og SFP for målingene over ved bruk av formel 1.1 og 1.10:

Tabell 29: Beregnede verdier ved variabel luftmengde, anlegg 5.

Luftmengde, V [m^3/s]	Middelverdi strøm, I [A]	RX80, P [kW]	RX80, SFP [kW/ m^3/s]
3,400	7,10	4,9	1,45
3,700	9,70	6,7	1,82
4,100	13,63	9,4	2,30
4,350	17,40	12,1	2,79
4,500	19,23	13,3	2,96
4,700	22,27	15,4	3,28

Koeffisientene k og c ble funnet ved bruk av *Solver* funksjonen i Excel til å minimere feilkvadratsummen (SSE), med følgende resultat:

Tabell 30: Kurvetilpasning ved bruk av Excel, anlegg 5.

Luftmengde, V [m ³ /s]	RX11, P [kW]	$P^* = k \cdot V^3 + c$	$(P - P^*)^2$
3,4	4,9	4,82735908	0,005
3,7	6,7	6,687698311	0,000
4,1	9,4	9,682206819	0,080
4,35	12,1	11,87741613	0,050
4,5	13,3	13,32190831	0,000
4,7	15,4	15,40337695	0,000
		SSE=	0,135
k	0,163920983		
c	-1,615391216		

Effektkurven for dette anlegget kan da uttrykkes ved formel (1.12):

$$P(\dot{V}) = k\dot{V}^3 + c \text{ [kW]} = 0,1639 \cdot \dot{V}^3 - 1,6154 \text{ [kW]}$$

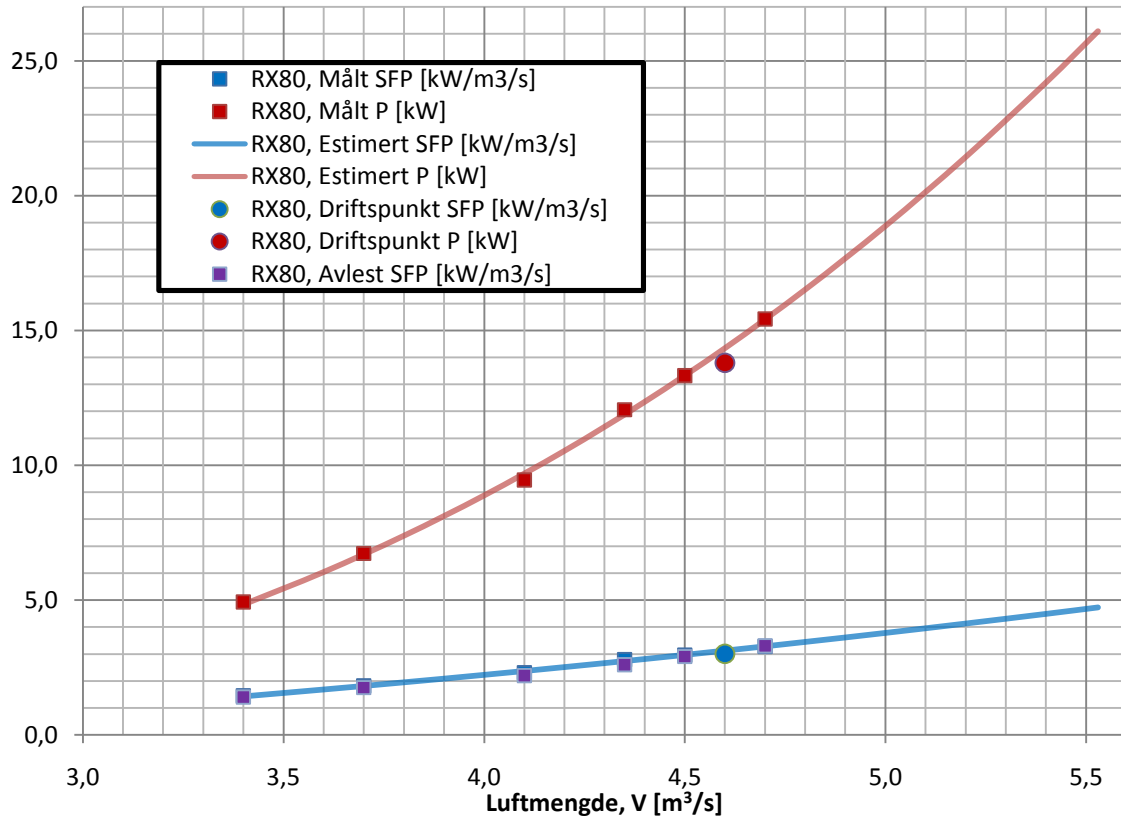
Kurven for SFP kan så uttrykkes ved formel (1.13):

$$\text{SFP} = k\dot{V}^2 + \frac{c}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] = 0,1639 \cdot \dot{V}^2 - \frac{1,6154}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

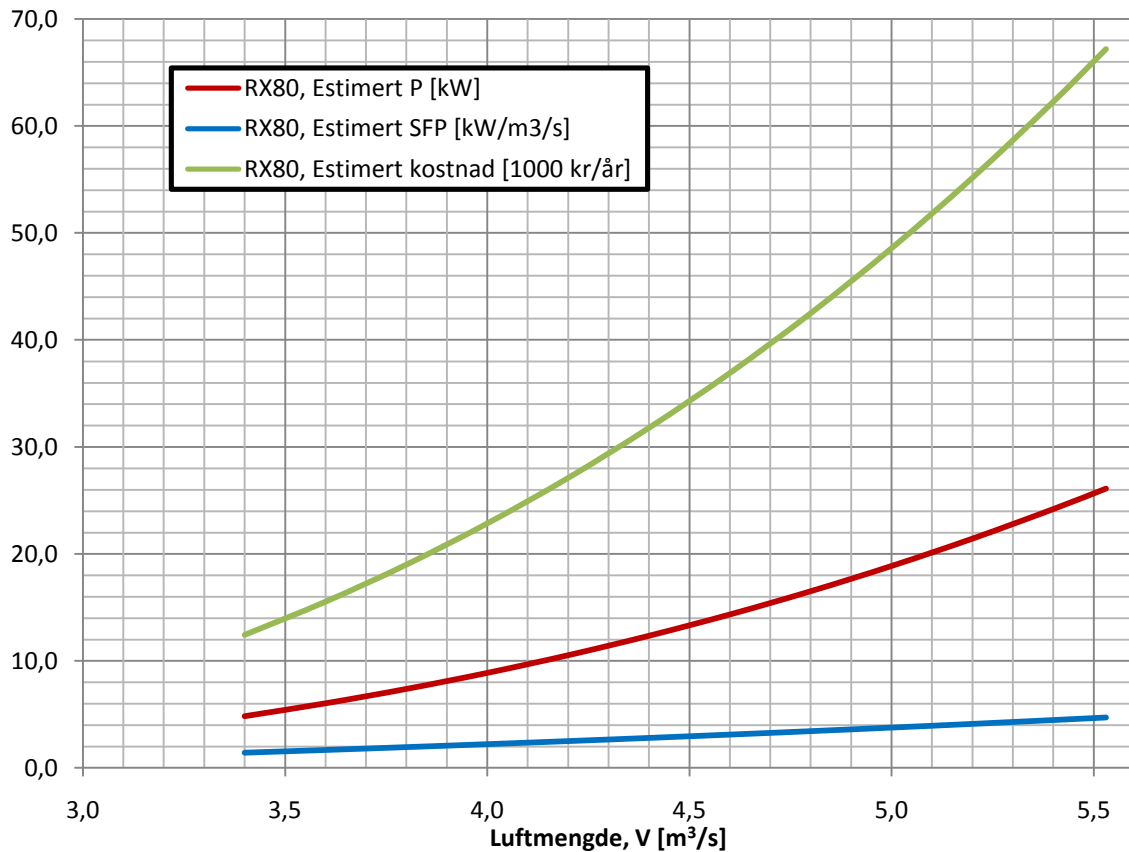
Kurven for årlig kostnad til viftedrift finnes av formel (1.14):

$$\text{Elektrisk driftskostnad} = K \cdot P(\dot{V}) = 2574 \cdot (0,1639 \cdot \dot{V}^3 - 1,6154) \text{ [kr/år]}$$

Systemkurver



Figur 20: Kurvetilpasning til måledata, anlegg 5.



Figur 21: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 5.

Anlegg 6: NAV kontorbygg, system 2

Beskrivelse av anlegg

Ventilasjonsanlegget er et balansert VAV anlegg av type GOLD RX60, som betjener fjerde til sjetten etasje i et kontorbygg. Det er et kompakt luftbehandlingssystem i tre deler som er montert sammen til en enhet. Anlegget har 4 vifter som er direkte drevet av hver sin 4,6 kW trefase motor med frekvensomformer for hastighetsregulering. Viftene er montert parvist parallelt på henholdsvis tilluft- og avtrekkside.

Tabell 31: Hovedkomponenter, anlegg 6.

Tilluft	Avtrekk
Inntaksrist	
Finfilter	Finfilter
Roterende varmeveksler	Roterende varmeveksler
Halvaksial kammervifte, 2 stk	Halvaksial kammervifte, 2 stk
Varmebatteri (elektrisk)	
Kjølebatteri (vannbårent)	

Tabell 32: Nominelle motordata, anlegg 6.

Type	WEG
Totalt antall i systemet	4
Spenning, U	400 V
Effekt, P_{nominell}	4,6 kW
Total effekt, P_{tot}	18,4 kW

Målinger ved driftsnivå

Det var ikke mulig å finne gunstige målepunkter for luftmengden i kanalene. Uten gode målepunkt vil usikkerheten bli så stor at målingene blir ubrukelige. Luftmengden ble derfor avlest fra display på kontrollenheten til aggregatet.

Elektrisk strømstyrke ble målt på hovedinntaket til aggregatet, som i praksis er på inntakssiden til frekvensomformerne.

Tabell 33: Verdier avlest fra display på kontrollenhet ved driftspunkt, anlegg 6.

	Tilluft	Avtrekk
Luftmengde, \dot{V}	13 000 m ³ /h	13 100 m ³ /h
Trykkdifferanse	385 Pa	440 Pa
SFP	3,3	

Tabell 34: Strømstyrke målt på hovedinntak ved driftspunkt, anlegg 6.

Strøm fase 1, I_1	19,3 A
Strøm fase 2, I_2	18,9 A
Strøm fase 3, I_3	19,6 A

Beregninger

Middelverdi strømstyrke:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \text{ [A]} = \frac{19,3 + 18,9 + 19,6}{3} \text{ [A]} = 19,27 \text{ A}$$

Total elektrisk vifteeffekt:

$$\sum P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000} \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 19,27 \text{ A}}{1000} = 13,35 \text{ kW}$$

Luftmengde:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{maks}} = 13100 \text{ m}^3/\text{h} = 3,64 \text{ m}^3/\text{s}$$

Usikkerhet for avlest luftmengde, GOLD aggregat: $F_V = \pm 5\%$

Måleusikkerhet for strømstyrke: $F_I = \pm 2\%$

Måleusikkerhet for spenning: $F_U = \pm 2\%$

Total måleusikkerhet:

$$\begin{aligned} F_S &= \sqrt{F_V^2 + F_I^2 + F_U^2} \text{ [%]} \\ &= \sqrt{5^2 + 2^2 + 2^2} \text{ [%]} = \pm 6 \text{ \%} \end{aligned}$$

SFP-faktor:

$$\text{SFP} = \frac{\sum P}{\dot{V}} = \frac{13,35 \text{ kW}}{3,64 \text{ m}^3/\text{s}} = 3,67 \pm 0,22 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

Målerapport for bestemmelse av SFP		
Bygg: NAV kontorbygg, system 2 Haugesund	Prosjekt:	Dato: 27. april 2009
Anleggsnavn GOLD	Kode: RX 60	
Anlegget betjener sone: 4. – 5. etasje	Sonens areal:	Sonens bruk: Kontorlokaler
Netto luftmengde, prosjektert: 14 600 m ³ /h	Netto luftmengde, målt: 13 100 m ³ /h	Antall vifter i systemet: 4
Netto luftmengde, \dot{V} : 3,64 m ³ /s	Summen av målte vifteeffekter, $\sum P$: 13,35 kW	
Måleusikkerhet luftmengde: ± 5 %	Måleusikkerhet effekt: ± 3 %	Måleusikkerhet SFP: ± 6 %
SFP-verdi: 3,67 ± 0,22 kW/m ³ /s	Rapporten utført av (firma):	
Rapporten utført av (navn): Tor Olav Stava Mohamed Khemais Ben Triki	Rapporten kontrollert av (navn):	
Underskrift (1):	Underskrift (2):	
Kommentarer: <ol style="list-style-type: none"> VAV-system Luftmengden er den største av tilluft og avtrekk avlest på aggregatets display. Det er derfor brutto luftmengde som er oppgitt. Denne verdien vil være større enn netto luftmengde på romnivå, pga. tap og lekkasjer kanalene og andre komponenter. Differanse mellom prosjektert og målt luftmengde antas å skyldes stengte ventiler i kanalnettet. Dette ble ikke undersøkt videre. 		

Målinger ved variabel luftmengde

Luftmengden ble justert trinnvis mellom minste og største mulige luftmengde for anlegget, og strømstyrke ble målt på hvert trinn etter at anlegget hadde stabilisert seg.

Tabell 35: Avleste og målte verdier ved variabel luftmengde, anlegg 6.

Luftmengde [m^3/h]		Spenning [V]	Strøm, hovedinntak [A]		
TV	AV		F1	F2	F3
7100	7100	400	4,6	4,6	4,7
8900	8800	400	7,3	7,1	7,5
10400	10400	400	10,4	10,1	10,7
11400	11500	400	13,6	13,5	14,3
12600	12500	400	17,6	17,4	18
14100	14100	400	25,1	24,3	25,3

Beregning av systemkurver

Beregnet effekt og SFP for målinger ved bruk av formel 1.1 og 1.10:

Tabell 36: Beregnede verdier ved variabel luftmengde, anlegg 6.

Luftmengde, V [m^3/s]	Middelverdi strøm, I [A]	RX60, P [kW]	RX60, SFP [kW/ m^3/s]
1,972	4,63	3,210	1,63
2,472	7,30	5,058	2,05
2,889	10,40	7,205	2,49
3,194	13,80	9,561	2,99
3,500	17,67	12,240	3,50
3,917	24,90	17,251	4,40

Koeffisientene k og c ble funnet ved bruk av *Solver* funksjonen i Excel til å minimere feilkvadratsummen (SSE), med følgende resultat:

Tabell 37: Kurvetilpasning ved bruk av Excel, anlegg 6.

Luftmengde, \dot{V} [m ³ /s]	RX11, P [kW]	$P^* = k \cdot \dot{V}^3 + c$	$(P - P^*)^2$
1,972	3,2101	3,007814611	0,041
2,472	5,0576	4,996895685	0,004
2,889	7,2053	7,403424847	0,039
3,194	9,5609	9,673068495	0,013
3,500	12,2398	12,42121539	0,033
3,917	17,2512	17,02253216	0,052
		SSE=	0,182
k	0,26739786		
c	0,956532126		

Effektkurven for dette anlegget kan da uttrykkes ved formel (1.12):

$$P(\dot{V}) = k\dot{V}^3 + c \text{ [kW]} = 0,2674 \cdot \dot{V}^3 + 0,9565 \text{ [kW]}$$

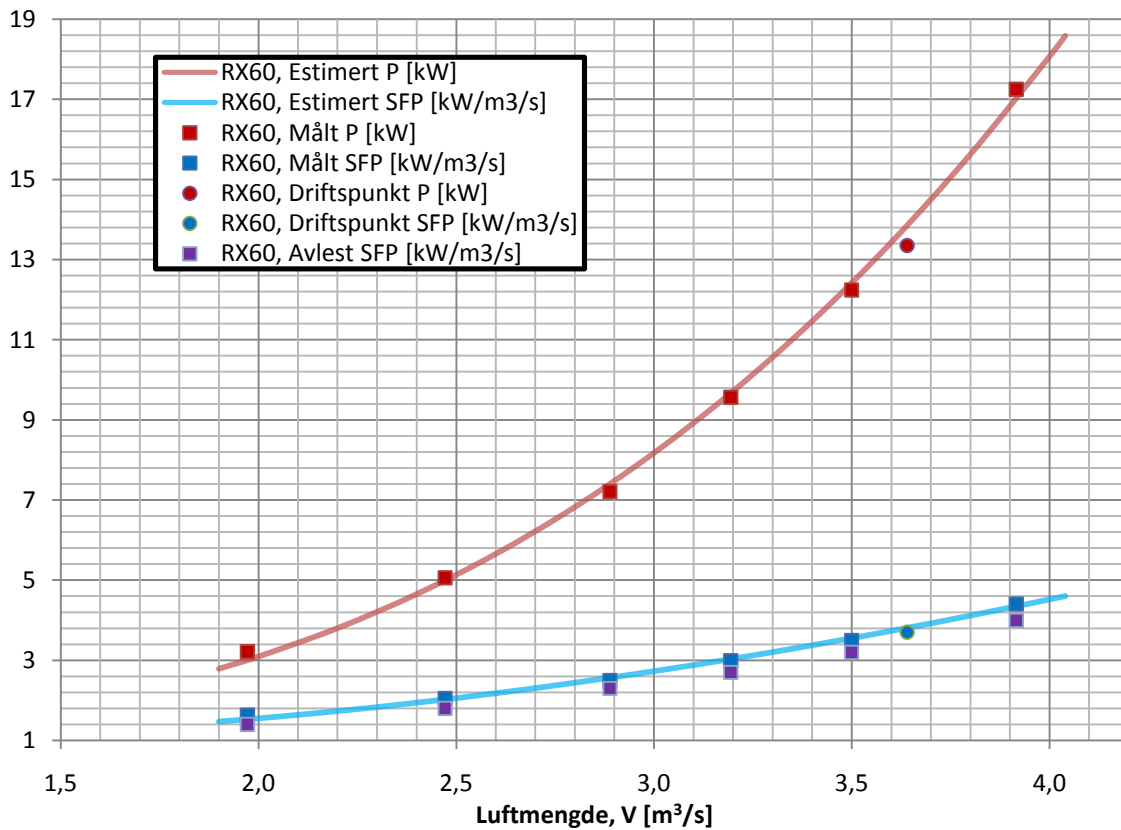
Kurven for SFP kan så uttrykkes ved formel (1.13):

$$SFP = k\dot{V}^2 + \frac{c}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right] = 0,2674 \cdot \dot{V}^2 + \frac{0,9565}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$$

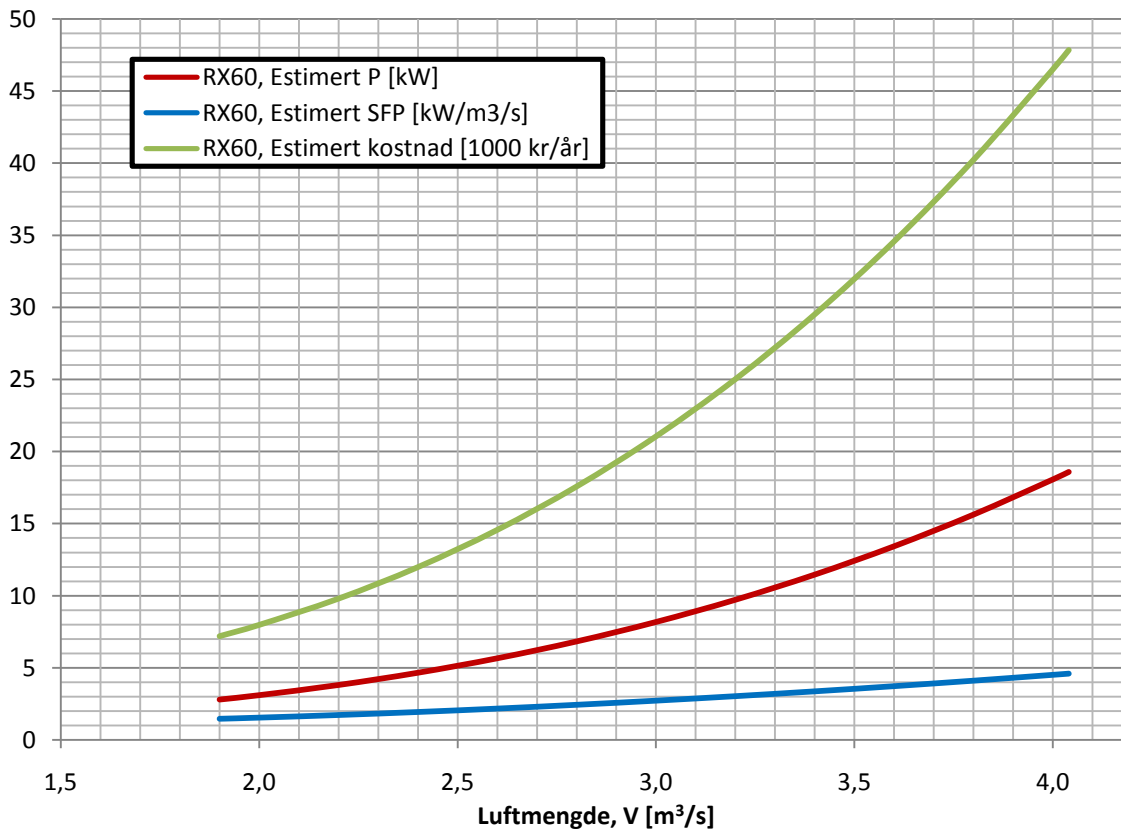
Kurven for årlig kostnad til viftedrift finnes av formel (1.14):

$$\text{Elektrisk driftskostnad} = K \cdot P(\dot{V}) = 2574 \cdot (0,2674 \cdot \dot{V}^3 + 0,9565) \text{ [kr/år]}$$

Systemkurver

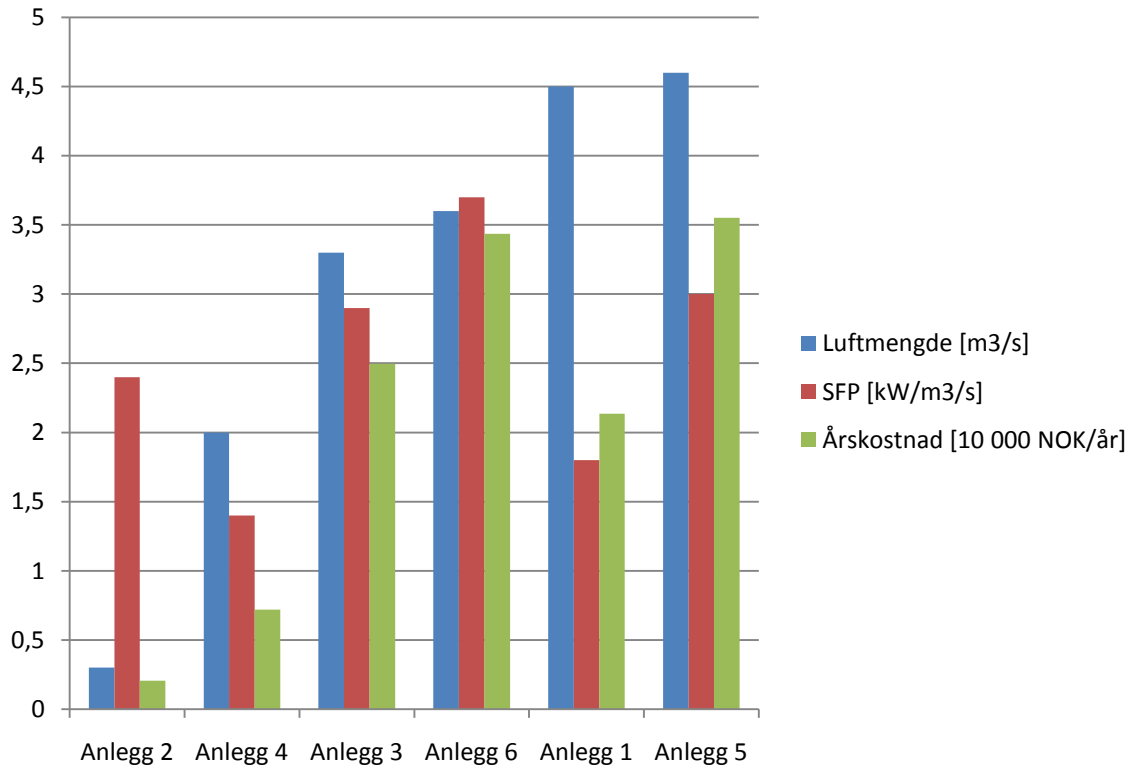


Figur 22: Kurvetilpasning til måldata, anlegg 6.

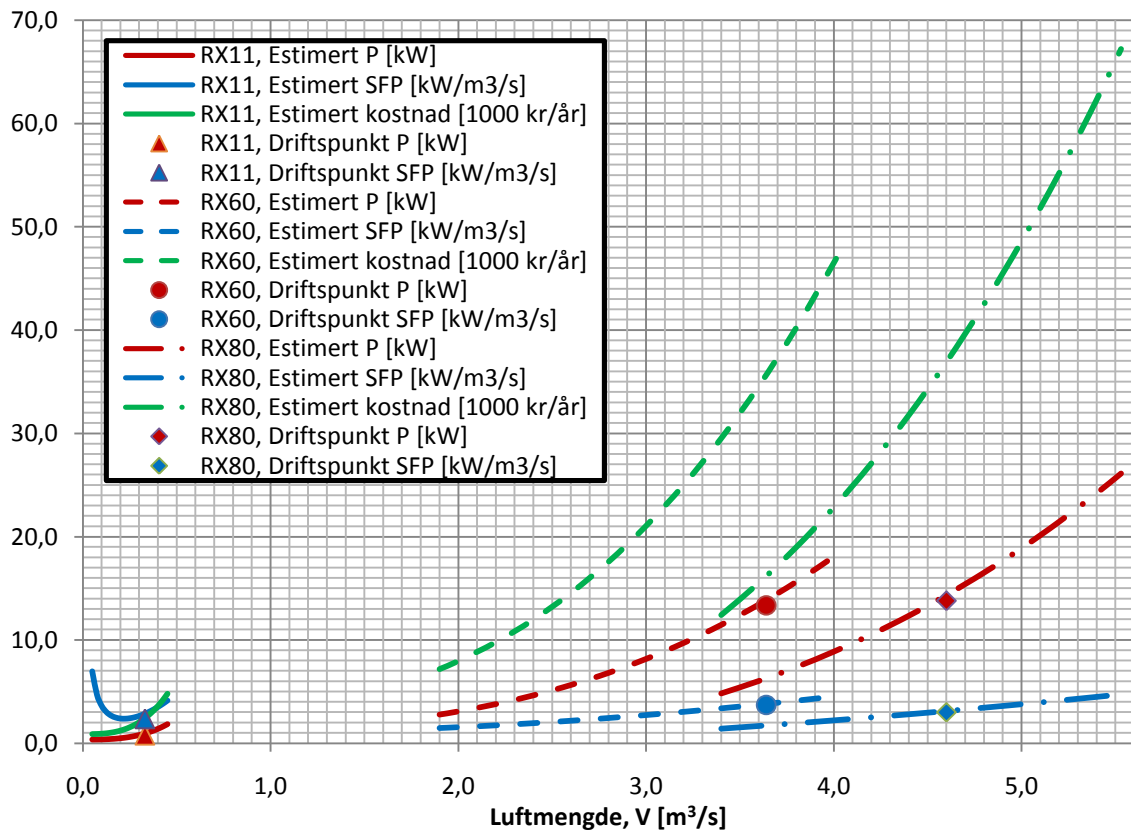


Figur 23: Estimerte kurver for SFP, effekt og årskostnad som funksjon av luftmengde, anlegg 6.

Sammenligninger



Figur 24: Sammenligning av luftmengde, SFP-faktor og årskostnad for målte anlegg ved driftspunkt, sortert etter stigende luftmengde.



Figur 25: Sammenligning av estimerte systemkurver for alle tre anlegg målt ved variabel luftmengde.

Konklusjon

Resultatene av målingene presentert i Figur 24 viser forholdsvis store variasjoner mellom de forskjellige anleggene, og det er ikke funnet noen generell fellesnevner som kan beskrive SFP og energibruk som funksjon av luftmengde.

Med utgangspunkt i Figur 25 er effektkurven omtrent som forventet, og følger en tredjegradskurve i forhold til luftmengden. Kostnader til elektrisk viftedrift er direkte avhengig av effekten, driftstimer og strømpris, og har følgelig en enda brattere stigningskurve enn effektkurven. Dette viser tydelig at en liten endring i luftmengden har stor påvirkning på energibruk og driftskostnader.

På kurvene for RX11 (Anlegg 2: Kontorbygg Ferkingstad og Alsaker AS) ser vi et tydelig minimumspunkt for SFP på $2,37 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ved en luftmengde lik $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette punktet er der hvor anlegget ventilerer mest mulig luft i forhold til strømforbruket. Verdt å merke seg er at aggregatet har ved driftspunktet en luftmengde på $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ og en beregnet SFP-verdi på $2,36 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Forklaringen til det er at aggregatet er innstilt med større luftmengde for avtrekk enn tilluft ved driftspunkt, mens kurvene er basert på målinger med lik avtrekks- og tilluftsmengde. Dette antyder at det har en positiv effekt på SFP-faktoren, og driftskostnadene, å kjøre anlegget med forskjellige luftmengder på tilluft og avtrekk.

Vi hadde også forventet å finne et minimumspunkt på SFP-kurven til de to andre anleggene. Årsaken til at det ikke er tilfellet er mest sannsynlig at vi ikke fikk tatt målinger på lave nok luftmengder. På disse anleggene var det innprogrammerte begrensninger i kontrollenheten som vi ikke ville endre på. De estimerte systemkurvene for disse to anleggene egner seg ikke å ekstrapolere til lavere luftmengder enn hva vi har måledata av.

Grunnen til økningen i SFP-verdi ved lave luftmengder er at virkningsgraden til motor og vifte reduseres i dette området, og det meste av den elektriske energien går med til å overvinne friksjonskrefter og systemtrykk. Virkningsgraden i det øvre arbeidssjiktet kan antas å være noenlunde konstant, og ekstrapolering av de estimerte systemkurvene til større luftmengder forventes derfor å sammenfalle rimelig bra med reelle verdier.

Med hensyn på driftsøkonomi viser måleresultatene at det kan svare seg å overdimensjonere ventilasjonsanlegg. Ved for eksempel å sammenligne Anlegg 3: Rica Maritim og Anlegg 4: Math Lande Kontorbygg, som er tilnærmet identiske aggregat av type GOLD RX40 men med forskjellige kanalnett og driftsnivå, ser vi at differansen i årskostnad til viftedrift er mellom kr 17 000 og kr 18 000. I dette tilfellet er Anlegg 4: Math Lande Kontorbygg overdimensjonert med tanke på fremtidige utvidelser og gikk ved driftsnivå på ca 25 % av maksimal motoreffekt, mens Anlegg 3: Rica Maritim er dimensjonert etter forventet ventilasjonsbehov og gikk på ca 83 % av maksimal motoreffekt ved driftsnivå. Ved eventuell overdimensjonering må det tas i betraktning økte investeringskostnader, og en nøye økonomisk vurdering må gjennomføres i hvert enkelt tilfelle før en eventuell overdimensjonering kan forsvares økonomisk.

Målemetodene som har blitt brukt ansees som gode forenklede metoder for å få inntrykk av energieffektiviteten til ventilasjonsanlegg. Verdt å merke seg er at luftmengdene benyttet i denne rapporten er brutto luftmengder i aggregatet, og ikke netto luftmengder på romnivå som i definisjonen av SFP. Den reelle SFP-verdien vil derfor være høyere enn det som er kommet frem til her.

Forslag til videre arbeid


- Foreta målinger på forskjell i friksjonstap mellom glatte rør og spiralrør i ventilasjonsanlegg, samt økonomiske beregninger for forskjeller i investerings- og driftskostnader for de ulike typene.
- Foreta målinger av luftmengder, effekt og beregne SFP på identiske ventilasjonsanlegg i forskjellige installasjoner og sammenligne måledata med fabrikkmålinger. Data kan videre brukes til å beregne systemeffektens påvirkning på aggregatene i de forskjellige installasjonene.
- Sette seg grundig inn i ett enkelt anlegg med høy SFP, for å identifisere årsak og foreslå tiltak for reduksjon i effektbruk. Her kan det gjerne tas trykkfallsmålinger over komponentene i aggregatet og kanalnettet for å finne muligheter til forbedringer.
- Foreta målinger av ett eller flere anlegg med VAV eller CAV styring over lengre tid, og se hvordan driftsparametrene endrer seg med tiden. Forskjellige tidsperspektiv kan her være interessant, for eksempel i løpet av en arbeidsdag, en uke, eller over et helt år for å få med sesongvariasjoner.

Referanseliste

- [i] *Datablad Posefilter : SuperFlow alu : Glassfiber F7.* (u.d.). Hentet mai 5, 2009 fra Interfil AS: <http://interfil.no/datablad/F7.PDF>
- [ii] Dokka, T. H., & Hermstad, K. (2006). *Energieffektive boliger for fremtiden : En håndbok for planlegging av passivhus og lavenergiboliger.* SINTEF Byggforsk, avdeling Arkitektur og byggteknikk.
- [iii] *Exhausto Learning : Styringsprinsipper.* (u.d.). Hentet mai 5, 2009 fra Exhausto Norge A/S: <http://www.exhausto.no/composite-3149.htm>
- [iv] *Fluke T5-600/T5-1000 : Electrical Tester : Service Information.* (1998). Hentet mai 5, 2009 fra Fluke Norge AS:
http://assets.fluke.com/manuals/t5_xxxx_sieng0100.pdf
- [v] *FOR 1997-01-22 nr 33: Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK).* (2007). Hentet mai 5, 2009 fra Lovdata: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-19970122-0033.html>
- [vi] *Framtidens filter med folkehälsa, ekonomi och miljö i fokus.* (u.d.). Hentet mai 5, 2009 fra Slussen Building Services:
http://www.slussen.biz/kurser/KursEnDagPaJobbet_Nufilter081113.pdf
- [vii] Honeywell. (u.d.). *Variable Frequency Drive (VFD) : Application Guide.* Hentet mai 5, 2009 fra Honeywell International Inc.:
<http://customer.honeywell.com/techlit/pdf/63-0000s/63-7062.pdf>
- [viii] Jensen, B., & Sørensen, B. R. (2001). Hvorfor lav SFP-faktor? Vifteenergi er også energi! *Norsk VVS nr.4-2001* .
- [ix] *Motor efficiency labelling scheme.* (u.d.). Hentet Mai 6, 2009 fra Brook Crompton:
http://www.brookcrompton.com/pdf-files/2219e_efflabelling_v1.pdf
- [x] Mysen, M., & Polak, K. (2001). *Energieffektiv viftedrift : prosjekteringsveiledning.* Norges byggforskningsinstitutt.
- [xi] *Priser på elektrisk kraft, 1. kvartal 2009.* (2009, april 6). Hentet mai 5, 2009 fra Statistisk Sentralbyrå: <http://www.ssb.no/elkraftpris/>
- [xii] Selnæs, A. G. (2007, November 19). *Energimerking av elektriske motorer.* Hentet Mai 6, 2009 fra Enova Næring:
<http://naring.enova.no/sitepageview.aspx?articleID=253>
- [xiii] Skarland Press A/S. (1998). Ventøk: VVS-bransjens håndbok i ventilasjon. *Ventøk 7.4: Praktisk anvendelse av SFP* .

Vedlegg

Vedlegg A1: IF85 Filter datablad



Test-sertifikat

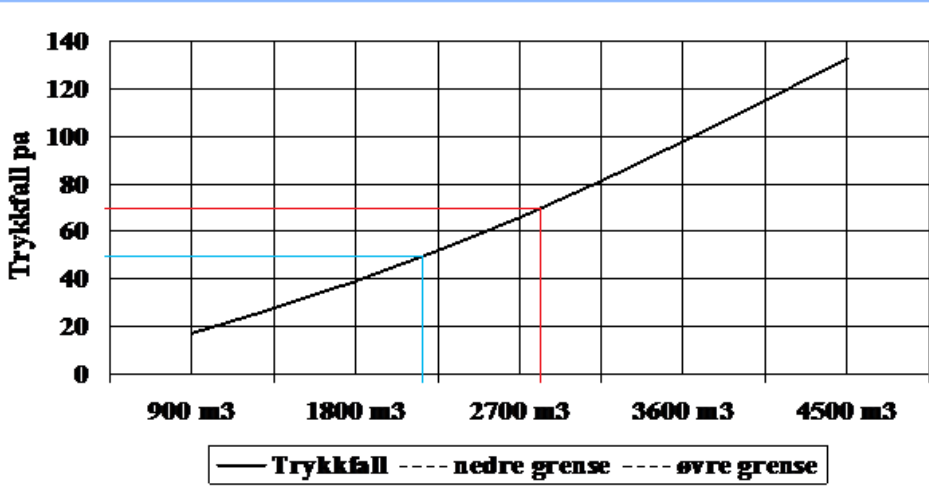
Denne testen er utført ved Interfils testlaboratorium i Skjåk.
Sertifikatets dokumentasjon er gjort i samsvar med EUROVENT 4/9

Filtertype: IF85 592x742x535/10		Test nr:
Data for medium	Data for filter	Data for test
Fabrikkat: UPF	EU-klasse: F-7	Temperatur: 22°C
Type: F7	B x H x D: 592 x 742 x 535	Fuktighet: 25%
Duk-kode: 04.152	Poseantall: 10	Luftmengde: 3400 m³/t
Medie: Glassfiber	Areal: 7,8m²	Partikkeltype: Inneluft
Farge: Rosa	Ramme: Aluminium	Antall test-sykluser:

Oppdragsgiver: Interfil AS	Dato, utført av: Beregnet mars09 A. Sperstad
-----------------------------------	---

MÅLERESULTATER

Verdier utskillingsgrad							Start-trykkfall					
µm	0,3-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	10 >	900m ³ /t	1800m ³ /t	2700m ³ /t	3400m³/t	3600m ³ /t	4500m ³ /t
%							18 Pa	39 Pa	66 Pa	90 Pa	98 Pa	133 Pa



— Trykkfall ---- nedre grense ---- øvre grense

Interfil AS, Bismo Industripark, 2690 Skjåk Telefon: 61 21 36 00 Telefax: 61 21 36 01

Figur 26: Mottatt på e-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred 12. Mars 2009. Avleste verdier er markert i diagrammet.

Vedlegg A2: VS 10-85 Filter datablad



Test-sertifikat

Denne dimensjonen for gjeldende filter er ikke fysisk testet.
Verdiene er teoretisk beregnet, og bygger på data fra LS 10-85.

Filtertype: VS 10-85 Test nr: 1-200401

Data for medium		Data for filter		Data for test	
Fabrikkat:	Interfil AS	EU-klasse:	EU-7	Temperatur:	14,6°C
Type:	Posefilter	B x H x D:	592 x 287 x 535	Fuktighet:	15,6%
Duk-kode:	XLG	Poseantall:	10	Luftmengde:	1700m ³
Medie:	Glassfiber	Areal:	3,4 m ²	Partikkeltype:	Inneluft
Farge:	Rosa	Ramme:	Aluminium	Antall test-sykluser:	6

Oppdragsgiver: Interfil AS Dato, utført av: Mars 09 A.Sperstad

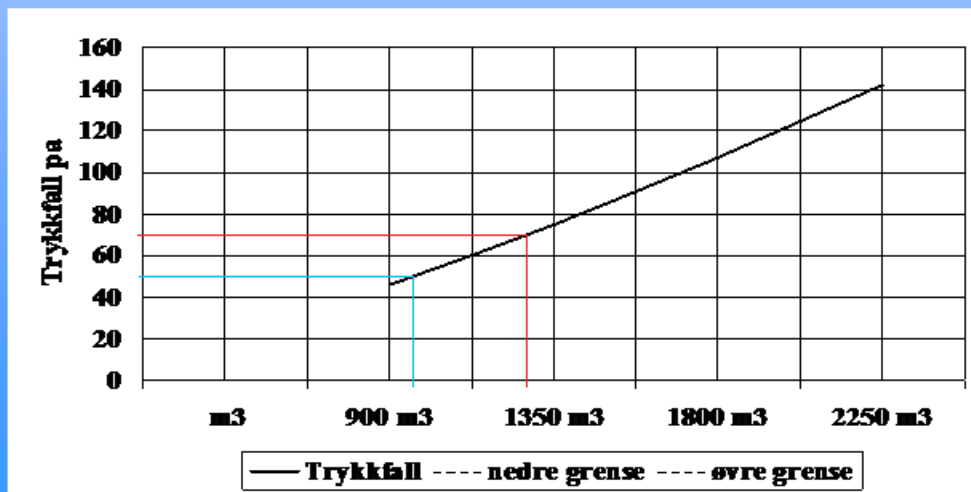
MÅLERESULTATER

Verdier utskillingsgrad

µm	0,3-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	10 >
%	61,63	80,21	94,26	99,19	99,99	

Start-trykkfall

m ³ /t	900m ³ /t	1350m ³ /t	1700m ³ /t	1800m ³ /t	2250m ³ /t
Pa	46 Pa	75 Pa	99 Pa	107 Pa	142 Pa



Interfil AS, Bismo Industripark, 2690 Skjåk Telefon: 61 21 36 00 Telefax: 61 21 36 01

Figur 27: Mottatt på e-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred 12. Mars 2009. Avleste verdier er markert i diagrammet.

Vedlegg B: E-post fra Interfil AS v/Sperstad, Alfred

From: Alfred Sperstad <alfred.sperstad@interfil.no>,
Sent: 2009-03-12 11:55
To: 126027@studpost.hsh.no,
Cc: Tormod Sperstad <tormod.sperstad@interfil.no>,
Subject: SV: Forespørsel om trykkfallsdiagram
Vedlagt trykkfallkurver for LS10-85 592x592x535/10p og IF85:592x742x535/10p
Kurvene for IF-filteret er beregnet siden testriggen ikke tar filter over 592x592.

Vær oppmerksom på at trykkfallet kan variere ganske mye fordi duken varierer en god del ifra de forskjellige leveransene.

Vi oppgir trykkfallet ved nominell luftmengde +-10%

Mvh
Interfil AS
Alfred Sperstad

-----Opprinnelig melding-----

Fra: Tor Olav Stava [mailto:126027@studpost.hsh.no]
Sendt: 11. mars 2009 18:30
Til: Post - Sentralbord
Emne: Forespørsel om trykkfallsdiagram

Hei,

Vi er to studenter ved ingeniørlinjen for Prosess- og Energiteknikk ved Høgskolen Stord/Haugesund avd. Haugesund.

Vi jobber for tiden med vår Bacheloroppgave som går ut på måling og bestemmelse av SFP på en del eksisterende ventilasjonsanlegg.

For å bestemme luftmengden gjennom aggregatet har vi målt trykkfall over filtrene, men vi kan ikke finne trykkfallsdiagram for de aktuelle filtrene på hjemmesiden Deres.

De aktuelle filtrene er av type SuperFlow Alu F7:

Varenr: 117395, IF85 - 592 x 742 x 535 / 10

Varenr: 111019, VS-10-85, 592 x 287 x 535 / 10

De aktuelle trykkfallene er 50 Pa og 70 Pa.

Vi hadde satt veldig stor pris på om Dere kunne sendt oss de nødvendige trykkfallsdiagram.

På forhånd tusen takk!

MVH
Tor Olav Stava, og
Mohamed Ben Khemais Triki