

TEKNOLOGISK
INSTITUT



INTELLIGENT ENERGIEFFEKTIV PROCESVENTI- LATION DESIGN- OG OPTIMERING

Juli 2022

Indholdsfortegnelse

	Side
1 Sammenfatning	4
2 Konklusion	5
3 Summary	5
4 Baggrund	6
5 Potentiale vurdering	7
6 Industriel procesventilation og – udsugning	7
6.1 Opdeling i kildetyper	8
6.2 Kildekarakteristika	8
6.2.1 Spredning af forurening	8
6.2.2 Kildetyper	9
6.2.3 Partikler	9
6.2.4 Fugt	10
6.2.5 Gasser	10
6.3 Behovsanalyse i forskellige brancher	11
6.3.1 Træindustri	11
6.3.2 Jern- og metalindustri	13
6.3.3 Papir- og grafisk industri	19
6.3.4 Kemisk industri	21
7 Procesudsug	23
7.1 Generelt	23
7.2 Punktudsug	26
7.2.1 Udsugningseffektivitet	28
8 Procesudsug med automatisk styring af luftmængden	31
8.1 Prototype 1	32
8.1.1 Hardware	33
8.1.2 Software	35
8.1.3 Test af prototype 1	35
8.1.4 Delkonklusion	35
8.2 Prototype 2	35
8.2.1 Hardware	36
8.2.2 Signalbehandling	37
8.2.3 Flowregulering	43
8.2.4 Flowmåling	44

8.2.5	Styringsstrategi	44
8.2.6	Flowkurve	46
8.2.7	PID-regulator	46
8.2.8	Dynamisk Glidende gennemsnitsfilter	47
8.2.9	Styrelogik	47
8.2.10	Efterløb	48
8.2.11	Hall-effekt sensor	48
8.2.12	Indikationslamper	49
8.3	Forsøg i Teknologisk Instituts indeklimalaboratorium	50
8.3.1	Forsøg på Novenco	51
8.3.2	Modifikationer efter forsøg hos Novenco	53
8.4	Andre projekter	53
8.4.1	Energieffektiv adaptiv procesudsugning	53
8.4.2	Større udsug	54
9	Procesventilationsanlæg	55
9.1	Right sizing	55
9.1.1	Right sizing - case	55
9.2	Udvikling af måleudstyr til procesventilationsanlæg	58
9.2.1	Effektmåler	58
9.2.2	Trykdifferensmåler	58
9.2.3	Luftflowmålere	59
9.2.4	Målekoncept	60
9.2.5	Måling af effektforbrug	63
9.2.6	Montering af måleudstyret	64
9.2.7	Økonomi	66
9.3	Tests hos casevirksomhed	66
9.3.1	Indledende vurdering af måleudstyret	68
9.3.2	Måleresultater	68
9.3.3	Afprøvning af digital målebøjning	74
9.4	Recirkulering	76
9.4.1	Status i Danmark	76
9.4.2	Meromkostninger uden recirkulation	77
9.4.3	Koncept for recirkulering	77
9.4.4	Alternative koncepter for opbygning af filtersystem	81
9.4.5	Cases for recirkulering	82

10 Cases	85
10.1 Novenco Building & Industry A/S	85
10.2 Tvilum A/S	86
11 Formidling	93
11.1 Artikler	93
11.2 Temadag	93
Referencer	93
Bilag 1	94

1 Sammenfatning

Nærværende projekt har haft til formål at udvikle og demonstrere nye intelligente systemløsninger til procesventilation, hvor fokus flyttes fra enkeltkomponenter/leverandører til samlede systemløsninger, der er udviklet på tværs af branchens aktører med tilhørende løsning af barrierer hos slutbruger, beslutningstagere og lovgivere.

Projektet har bl.a. taget udgangspunkt i det tidligere EUDP projekt "Energieffektiv adaptiv procesudsugning", hvori der blev udviklet et procesudsug, der automatisk kunne følge forureningen fra en svejseproces.

Der er udviklet et nyt koncept og en prototype for adaptiv svejseudsugning, hvor den udsugede luftmængde justeres til det aktuelle behov under hensyntagen til arbejdsmiljøet. Konceptet kan modificeres til at kunne håndtere alle typer punktudsugning. Prototypen var været afprøvet hos projektpartneren Novenco Building for at teste om systemet kan fungere i praksis.

Der er ligeledes udviklet et koncept og en prototype for måleudstyr til samtidig registrering af tryk, flow, effektoptag etc. for procesventilationsanlæg. Formålet med måleudstyret er at opnå viden om den faktiske drift af procesventilationsanlæg med det formål at kunne identificere mulige effektiviseringsiltag for eksisterende installationer, og for at skabe det rette grundlag for rigt sizing af fremtidige ventilationsanlæg. Måleudstyret er afprøvet på et procesudsugningsanlæg hos møbelvirksomheden Tvilum.

Der er desuden udviklet et designværktøj, der støtter virksomhederne, deres leverandører og rådgiverne, når der skal projekteres nye procesventilationssystemer eller når eksisterende procesventilationssystemer skal renoveres, så de er optimale i det enkelte tilfælde.

Der er foretaget undersøgelser af mulighederne for at øge anvendelsen af recirkulering af procesluft, - dels ved løbende drøftelser med Arbejdstilsynet og ved drøftelser med projektpartneren Camfil og andre interessenter i branchen.

Projektet er finansieret af ELFORSK programmet med projektnr. 352-033, og er udført af følgende projektdeltagere i perioden 1. april 2020 til medio maj 2022.

Christian Drivsholm	Teknologisk Institut
Søren Draborg	Teknologisk Institut
Frederik Rasmussen	Teknologisk Institut
Mikkel M. Prüser	Teknologisk Institut
John Boss	Novenco Building
Michael Mortensen	Camfil
Frank Grundholm	ABB
Lennart Østergaard	VELTEK
Kim Kronby	FAV

2 Konklusion

Det udviklede koncept for procesudsug, - baseret på et svejseudsug, har vist, at det er muligt at reducere den udsugede luftmængde i et punktudsug meget betydeligt samtidig med at arbejdsmiljøet sikres og i mange tilfælde forbedres. I mange tilfælde styres punktudsug manuelt med et spjæld, der enten er helt åbent eller lukket. I nogle tilfælde er afspærringsspjældet automatisk, så det f.eks. åbnes/lukkes samtidig med driften af den proces hvorfra der suges. Det gælder udsugning fra både enkeltstående processer som svejsning/lodning og for maskiner med tilkøbt punktudsug. Det vurderes, at luftmængderne i punktudsugning i gennemsnit kan reduceres med mindst 15% ved at anvende den udviklede teknologi, hvor de største potentialer findes ved uregulerede, manuelt betjente punktudsug, og de mindste potentialer ved automatisk styrede punktudsug tilkøbt maskineri.

Der er desuden udviklet et målekoncept der kan anvendes til identifikation af energieffektiviseringsmuligheder og right sizing af procesventilationsanlæg. Det vurderes, at luftmængderne i procesventilationsanlæg kan reduceres med 10-15% i gennemsnit ved at realisere de muligheder, der identificeres ved anvendelse af måleudstyret.

Det samlede el- og varmeforbrug til procesventilation udgør skønsmæssigt henholdsvis ca. 800 GWh/år og 10.000 GWh/år. Hvis der tages udgangspunkt i ovennævnte effektiviseringspotentialer kan det beregnes, at el- og varmeforbruget samlet set kan reduceres med henholdsvis op til ca. 50% og 30%. Det svarer årligt til ca. 400 GWh_{elektricitet} og 3.000 GWh_{varme} årligt.

Både konceptet for adaptiv styring af punktudsugning og for måleudstyret er bragt frem til prototypeniveau, og er klar til kommercialisering af en producent. På det Gå-hjem'møde der blev afholdt som afslutning på projektet var der især stor interesse for den adaptive styring af procesudsugning. Mødedeltagerne mente at det var oplagt for danske producenter af punktudsug at implementere konceptet i deres produkter, og opfordrede projektdeltagerne til at drøfte dette med Geovent og lignende producenter.

3 Summary

The project has aimed to develop and demonstrate new intelligent system solutions for process ventilation, where the focus is shifted from individual components / suppliers to total system solutions developed across industry players with associated solution of barriers for end users, decision makers and legislators.

A new concept and a prototype for adaptive welding extraction have been developed, where the extracted air volume is adjusted to the current needs, taking into account the working environment. The concept can be modified to handle all types of point extraction. The prototype had been tested at the project partner Novenco Building to test whether the system can work in practice.

A concept and a prototype have also been developed for measuring equipment for simultaneous registration of pressure, flow, power consumption, etc. for process ventilation systems. The purpose of the measuring equipment is to obtain knowledge about the actual operation of process ventilation systems with the aim of being able to identify possible efficiency measures for existing installations, and to create the right basis for right sizing of future ventilation systems. The measuring equipment has been tested at a process extraction plant at the furniture company Tvilum.

In addition, a design tool has been developed that supports the companies, their suppliers and consultants when new process ventilation systems are to be designed or when existing process ventilation systems are to be renovated so that they are optimal in the individual case.

Studies have been carried out on the possibilities of increasing the use of recirculation of process air, partly during ongoing discussions with the Danish Working Environment Authority and during discussions with the project partner Camfil and other stakeholders in the industry.

The developed concept for process extraction, - based on a welding extraction, has shown that it is possible to reduce the amount of extracted air in a point extraction very significantly while at the same time ensuring the working environment and in many cases improving it. It is estimated that the air volumes in point extraction can be reduced by an average of at least 15% by using the developed technology, where the greatest potentials are found in unregulated, manually operated point extraction, and the smallest potentials in automatically controlled point extraction connected to machinery.

In addition, a measurement concept has been developed that can be used for identification of energy efficiency possibilities and right sizing of process ventilation systems. It is estimated that the air volumes in process ventilation systems can be reduced by 10-15% on average by realizing the possibilities identified by using the measuring equipment.

The total electricity and heat consumption for process ventilation is estimated at approx. 800 GWh/year and 10,000 GWh/year. It can be calculated that the electricity and heat consumption as a whole can be reduced by up to approx. 50% and 30% if the above-mentioned potentials are used. This corresponds to approx. 400 GWh electricity and 3,000 GWh heat annually.

Both the concept of adaptive control of point extraction and of the measuring equipment have been brought to the prototype level and are ready for commercialization by a manufacturer. At the meeting held at the end of the project, there was particular interest in the adaptive control of process extraction. The meeting participants thought that it was obvious for Danish manufacturers of extraction systems to implement the concept in their products, and encouraged the project participants to discuss this with Geovent and similar Danish manufacturers.

The project is financed by the ELFORSK program with project No. 352-033 and was carried out in the period 1 April 2020 to mid-May 2022.

4 Baggrund

I projektet har der været fokus på minimering af luftmængder, brug af recirkulation, samspil med ventilationen i øvrigt, og fastholdelse af et sikkert arbejdsmiljø. I det omfang det er muligt at reducere luftmængderne medfører det mindre anlæg, mindre energiforbrug til lufttransport og nye effektive muligheder for luftrensning, varmegenvinding og recirkulation. Derfor har et været ét af projektets primære fokusområder, at udvikle og demonstrere nye intelligente løsninger til procesventilation, der medfører minimering af luftmængder, brug af recirkulation, samspil med ventilationen i øvrigt, og fastholdelse af et sikkert arbejdsmiljø. Reducerede luftmængder medfører mindre anlæg, mindre energiforbrug til lufttransport og nye effektive muligheder for luftrensning, varmegenvinding og recirkulation. Recirkulation af ventilationsluften giver muligheder for energibesparelser, herunder på elforbrug til lufttransport, samt reduktion af supplerende opvarmning og rensning af tilluften.

Projektet har haft til formål at udvikle nye procesudsug til både stationære og bevægelige udsug. Et intelligent procesudsug skal sikre optimal placering og tilpasning af udsuget, samt optimal variabel udsugning til den givne proces. Procesudsuget skal ses i sammenhæng med mulighederne for luftrensning, recirkulation og varmegenvinding, og med den øvrige generelle ventilation af produktionslokalet. Fokus er på at sikre et bedre udsug og et sundt arbejdsmiljø med lavt energiforbrug, herunder synliggørelse af arbejdsmiljøet ved et procesudsug.

Målgruppen for projektet er primært til industrivirksomheder og disses rådgivere. Desuden er leverandører af procesudsugningsanlæg og procesventilationsanlæg samt filteranlæg en væsentlig del af målgruppen.

5 Potentiale vurdering

Det årlige elforbrug i Danmark til rumventilation og blæsere i industrien er opgjort til henholdsvis 1.514 GWh og 820 GWh, eller i alt 2.334 GWh/år /1/. Ud af det samlede elforbrug udgør procesventilation skønsmæssigt ca. 1/3 eller 800 GWh/år.

Det samlede varmeforbrug skønnes at udgøre 10.000 GWh/år.

De udviklede løsninger forventes som beskrevet i kapitel 2, at kunne reducere el- og varmeforbruget til procesventilation med henholdsvis ca. 50% og 30%, eller 400 GWh_{elektricitet} og 3.000 GWh_{varme} årligt.

6 Industriel procesventilation og – udsugning

Den korte definition på industriel procesventilation og –udsugning er ”luftudskiftning der styrer arbejdsmiljø og emissioner”. En længere og mere udtømmende definition er tredelt som følger.

- 1) Luftudskiftning for at sikre et sikkert, sundt, produktivt og behageligt indeklima både i forhold til mennesker, maskiner og produktionsprocesser
- 2) Procesluft som anvendes til tørring eller materialetransport
- 3) Luftudskiftning for at sikre mod ulykker som følge af brand, eksplosioner etc..

Det er desuden almindelig for industriel procesventilation og –udsugning at der i samme område (f.eks. ved en maskine) er behov for ventilation/afsug flere steder og med vidt forskelligt behov. Behovet for procesventilation bestemmes ud fra et område eller efter de forskellige lokale kilder. Ofte vil der være en række zoner med særlige (høje) behov for procesventilation og et større område der udelukkende har behov for luftudskiftning for at sikre tilfredsstillende arbejdsmiljø. I forbindelse med procesventilation kan der være krav til renheden af både den tilførte luft samt den udsugede luft.

Procesventilation og –udsugning bliver i mange tilfælde udført med rensningsforanstaltninger som cykloner, filtre, skrubbere, incineratorer etc. for at beskytte omgivelserne mod afkast, der indeholder støv eller dampe.

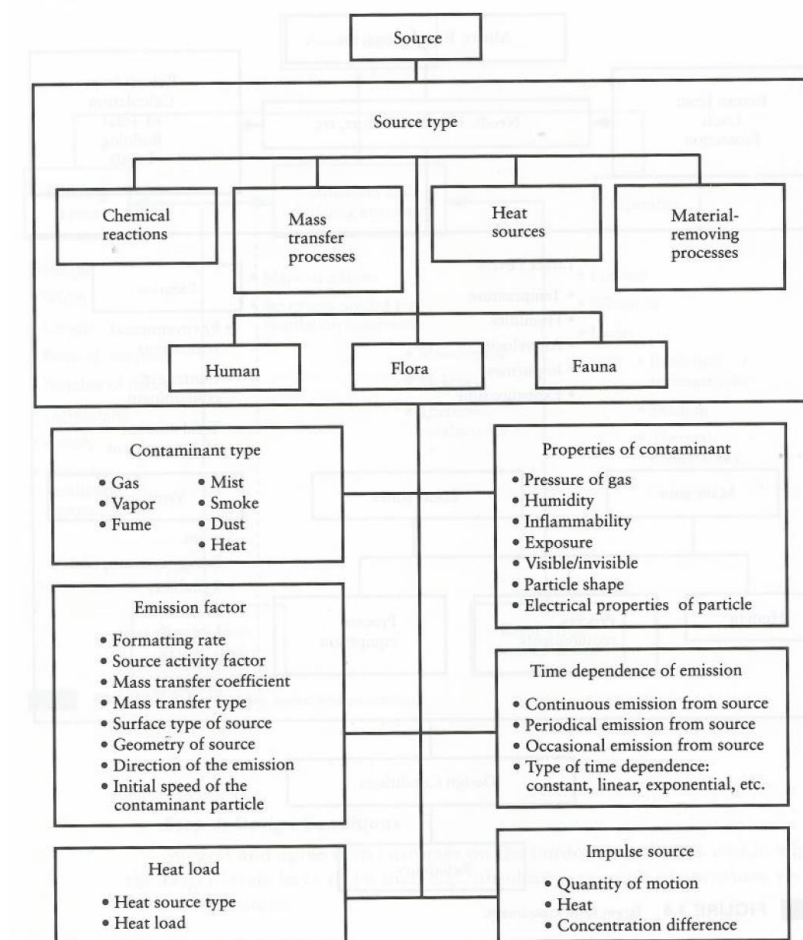
Kravene til procesventilation og udsugning er ofte fastsat af Arbejdstilsynet, Miljøstyrelsen og andre offentlige myndigheder, der har til opgave af sikre internt og eksternt miljø samt sikkerhed.

6.1 Opdeling i kildetyper

Procesventilation og -udsugning kan overordnet set inddeles i nedenstående fire kategorier efter den forureningskilde, som ventilationen kan behandle.

- 1) Kemiske reaktioner
- 2) Masseoverførende processer
- 3) Varmekilder
- 4) Materialefjernelse

Indenfor hver kategori kan der foretages en underopdeling som vist med nedenstående figur.



Figur 6.1.1 Opdeling af procesventilation/-udsugning efter kildetype.

6.2 Kildekarakteristika

6.2.1 Spredning af forurening

I det følgende ses der nærmere på hvordan forskellige kilder til forurening spredes. Overordnet set kan spredning af forurening i luft inddeles i følgende:

1. Ikke-buoyante kilder (diffusionskilder)
2. Buoyante kilder (varmekilder)
3. Dynamiske kilder

Ikke-buoyante kilder er karakteriseret ved at forureningen spredes ved diffusion i den omgivende luft i alle retninger som følge gradienten i luftforurening, f.eks. dampe fra en maleproces. Spredningen af forureningen afhænger i meget betydelig grad af hastigheden og turbulensen af den omgivende luft. Spredningen af forureningen fra buoyante kilder, dvs. varme fra varme overflader, sker primært som følge af den termiske opdrift der skabes af temperaturforskelle mellem den opvarmede og den omgivende luft. Den sidste om tredje kilde til forurening er karakteriseret ved at forureningen indeholder en betydelig dynamisk energi, f.eks. spåner fra et roterende værktøj. I nogle tilfælde kan en kilde til forurening være en kombination af ovennævnte.

6.2.2 Kildetyper

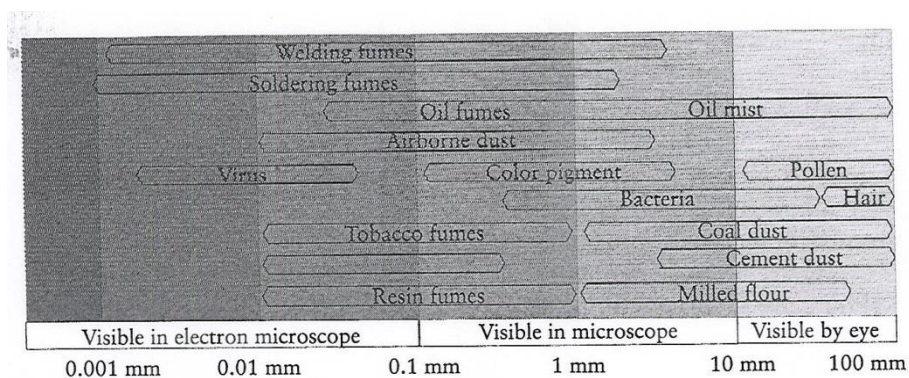
Kilderne til forurening kan opdeles i følgende typer: partikler, fugt og gasser. I det følgende er der beskrevet en række karakteristika for hver af de nævnte kildetyper.

6.2.3 Partikler

Industrier i mange brancher har produktionsprocesser der genererer partikler. Det gælder f.eks. i kemisk industri, metalindustri, grafisk industri og andre brancher, der benytter knusning, materialetransport ved blæsning, svejsning, slibning og andre processer der medfører dannelse af partikler. Desuden afgives der partikler fra bygningskonstruktioner, fra personer, i forbindelse med rengøring etc. og der tilføres partikler fra det fri gennem ventilationsanlæg, vinduer og andre åbninger. Partiklerne er meget forskellige både i størrelse, form, vægt og ikke mindst i farlighed for omgivelserne og de personer der måtte opholde sig i støvfyldte omgivelser. Partiklernes karakteristika er bestemmende for hvordan de spredes og dermed også for hvordan spredning undgås gennem opsamling.

Partikler der er mindre end ca. $0,1 \mu\text{m}$ opfører sig fuldstændig som gaspartikler, og partikler op til $1 \mu\text{m}$ har i praksis ingen faldhastighed og vil bevæge sig med luftstrømningerne i lokalet. Partikler mellem $1\text{-}10 \mu\text{m}$ vil sedimentere hvis der ikke er luftbevægelse, men blot en mindre lufthastighed vil kunne holde partiklerne svævende. I praksis kan partikler på op til ca. $10 \mu\text{m}$ regnes for at opføre sig som gasser. Større partikler over ca. $10 \mu\text{m}$ normalt sedimentere med mindre der er betydelig luftbevægelse.

Respirable partikler har en størrelse på mindre end $1 \mu\text{m}$ og op til $10 \mu\text{m}$. Det betyder, at de lungeskadelige partikler har en størrelse der kan holdes svævende ved ingen eller let luftbevægelse, som f.eks. svejserøg, olietåge og farvepigmenter.



Figur 6.2.1 Størrelsesfordeling af forskellige partikelkilder.

Partikler, der stammer fra polering, slibning, fræsning og andre bearbejdningsprocesser, er i bevægelse og kan betragtes som dynamiske kilder. En partikel der emitteres ud i den omgivende luft vil bevæge sig et vist stykke før den er bremset ned som følge af luftmodstanden (stop-længde). Luftmodstanden har meget stor effekt, - på især små partikler. Partikler i størrelser der er lungeskadelige er så små at de standses hurtigt i den omgivende luft, og kan let opsuges uanset partiklernes bevægelsesretning fra kilden. Større, tungere partikler kan bevæge sig op til ca. 1 meter fra kilden som følge af starthastigheden, og afsug for disse partikler skal derfor indrettes så der tages hensyn til partiklernes bevægelsesretning.

Visse typer materialer afgiver partikler som i større koncentrationer kan være eksplosive. Der er tale om både organisk støv (f.eks. kul, koks, tjære, mel og træ) og uorganisk støv (f.eks. aluminium, magnesium og kaliumnitrat). Det stilles helt særlige krav til procesventilation og udsugningssystemer i industrivirksomheder der håndterer eksplosionsfarligt støv.

6.2.4 Fugt

I mange industrivirksomheder er der emission af fugt (vanddamp) i sådant omfang at det er nødvendigt med procesventilation eller -udsugning for at holde luften fugtindhold på et passende niveau af hensyn til personer og/eller processer.

Typiske fugtkilder er f.eks.:

- Fordampning fra våde overflader og åbne tanke
- Damp fra dampsystemer
- Fugtafgivelse fra fugtige produkter
- Personer

Fugtkontrol er vigtig for at undgå problemer med arbejdsmiljøet som følge af f.eks. skimmelvækst forårsaget af høj fugtighed. For høj fugtighed kan desuden bevirke at bygningskonstruktionerne vil nedbrydes. Endelig stiller flere produktionsprocesser krav til luftens fugtindhold holdes i et bestemt interval (f.eks. farmaceutisk industri) eller holdes helt præcis som f.eks. i trykkeribranchen.

Fugtemissioner er relativt nemme og uproblematisk at fjerne. Vanddamp har en meget ringe partikelstørrelse, normalt ingen starthastighed og er lettere end luft og stiger dermed til vejrs. Og med mindre fugtkoncentrationen er meget stor sker der normalt ikke påvirkning af systemerne til procesventilation og udsugning.

6.2.5 Gasser

Gasser opstår typisk i forbindelse med industrielle processer, hvor der anvendes eller håndteres produkter der indeholder opløsningsmidler. Det sker f.eks. ved lakering, maling og trykning, hvor der anvendes produkter der indeholder opløsningsmidler som fjernes som led i produktionsprocessen. I dele af industrien, f.eks. i farve-/lakindustrien og spritfabrikkerne, håndteres produkter der indeholder opløsningsmidler. Endelig håndterer olieindustrien produkter der afgiver gasser.

Mange gasarter udgør et sundhedsmæssigt problem og visse af dem udgør tillige sammen med luft eksplosionsfare. Der er f.eks. tale om metanol, etanol, acetone, ammoniak, benzen, butan og en lang række andre gasser.

Gasser blander sig med den omgivende luft og skal derfor fjernes så tæt på kilden som muligt for at undgå spredning og for at minimere den udsugede luftmængde. Til gengæld er gasser lette at bortsuge da de uden videre bevæger med udsugningsluften. Ved etablering af procesventilation/-udsugning kan der for mange gasser ske antændelse, hvis udsugningsluften udsættes for en lysbue, gnist eller en varm overflade. Derfor stilles der helt særlige krav til komponenter der anvendes ifm. anlæg, hvor der kan forekomme eksplosive gasser.

6.3 Behovsanalyse i forskellige brancher

I dette kapitel er der en introduktion til en række brancher, hvor der er et væsentligt behov for procesventilation og/eller – udsugning af hensyn til arbejdsmiljøet eller af proceshensyn. Gennemgangen er opdelt på brancher og for hver branche skitseres de væsentligste problemstillinger i forbindelse med den procesventilation der foretages, idet både de sundhedsmæssige og ventilationstekniske udfordringer beskrives.

I forbindelse med projektet "Energioptimering af sugehove – udvikling af dimensioneringsregler samt flage- reflektorløsninger" er der beskrevet en række brancher, hvor der anvendes procesafsug. Der henvises til dette projekt for brancher hvor der som regel anvendes mindre procesafsug og punktudsug, f.eks. gummi- og plastindustrien, metalvareindustrien og elektronikindustrien. Dette projekt fokuserer på brancher hvor der er behov for afsug fra større og ofte irregulære emner og processer/maskiner med flere kilder.

De beskrevne brancher repræsenterer kun et mindre udsnit af den del af dansk industri, hvor der anvendes procesventilation og –udsugning. Der kunne være valgt flere, som f.eks. fremstilling af fødevarer og fremstilling af mineralske produkter.

6.3.1 Træindustri

De mest anvendte processer i træindustrien er:

- 1) Spåntagning, f.eks. fræsning og savning
- 2) Slibning og pudning
- 3) Overfladebehandling, f.eks. maling og lakering
- 4) Limning

I det følgende beskrives en række af ovenstående processer og de ventilationsmæssige problemstillinger de giver anledning til.

6.3.1.1 Fræsning

Fræsning er en spåntagende proces, hvor træbearbejdningen foretages med forskellige roterende værktøjer afpasset til de enkelte opgaver. Skærehastighederne ligger mellem 35–80 m/s, og spånerne vil dermed forlade skæret ved denne hastighed. Retningen af spånerne vil primært svare til, at de forlader det roterende værktøj på den første fjerdedel af rundingen, efter fræsningen har bearbejdet træet. Spåntykkelsen afhænger af fræsersens periferihastighed og fremførehastighed, hvilket bestemmes ud fra træets hårdhed (hårdt træ-små spåner, blødt træ-større spåner). Træspånerne vil normalt være op til ca. 4 mm., når der fræses i massivt træ.

Følgende maskiner anvendes til de enkelte opgaver:

- Kehler-maskine, benyttes eksempelvis til høvle- og profilmaskinering af massivt træ
- Dobbelttapper anvendes eksempelvis til udfræsning for tappe og formatbearbejdning

- CNC-overfræsere, anvendes eksempelvis til udfræsning og profilering af kanter, eventuelt til dekorationer, hængsler og beslag

Fræsningen kan foregå i forskellige materialer såsom:

- Massivt træ, hvor der er hårde og bløde sorter. Bearbejdningen af disse træsorter udvikler store partikler (spåner)
- Pladematerialer består eksempelvis af spånplade, krydsfiner og MDF-plade. Bearbejdning i plader danner partikelstørrelser, der ofte er under 10 μm .

I forbindelse med fræsning udvikles der støv og dampe/gasser. Hvad der udvikles er afhængigt af de materialer der bearbejdes. Ved massivt træ udvikles der støv og småspåner, mens der ved fræsning af plader også kan udvikles formaldehyd- og ammoniakdampe, som stammer fra de limstoffer der er anvendt.

De fleste fræsemaskiner i træindustrien er bemanded konstant. En arbejdsopgave kan være fremføring af træet til fræsehovedet. Der findes dog hel- eller fuldautomatiske CNC-fræsere. Nogle fræsemaskiner kan være indkapslede, hvilket medfører at emissioner optages af punktudsug eller lægger sig i umiddelbar nærhed af denne.

6.3.1.2 Pudsning

Pudsning er en proces, der skal fjerne den komprimerede overflade som eksempelvis kutterslag samt andre bearbejdningsriller. Desuden pudses overfladen på spån- og MDF-plader så de kan males. Overfladen pudses ned til det niveau, som overfladebehandlingen kræver. Båndet der typisk benyttes i forbindelse med pudsning har normalt en hastighed mellem 20 og 30 m/s. Kornstørrelsen på slibebåndene er normalt 40–400 og efterlader oftest partiler under 10 μm .

Følgende maskiner anvendes i forbindelse med pudsning:

- Bredbåndspudser, der dels kan benyttes i forbindelse med en pudseproces, hvor der foretages en grov-, mellem- og finpudsning i samme proces, eller som en enkelt pudseproces
- Båndpudseren er den ældste type af pudsemaskiner. Her bevæges pudsebåndet mellem to hjul, og pudseprocessen foretages ved at trykke båndet med en klods ned mod pudsestedet. Bordet, hvor materialet ligger, kan bevæges i en tværgående retning. Pudsepartiklerne vil oftest lægge sig i en kort afstand fra pudsestedet, og må derfor oftest fjernes med udsug eller trykluft. De partikler der rives med af båndet, udsuges med punktudsug ved rullerne
- Tallerkenskivepudser benyttes i forbindelse med kantpudsning
- Luftpudepudseren er cirkulær og pudsebåndet er lagt uden på en pude. Denne type anvendes, hvor man blandt andet ønsker at pudse afrundede kanter
- Børstepudseren er cirkulær og består af en række pudsebånd, hvilket gør den anvendelig til eksempelvis pudsning af profilerede kanter. Pudsepartiklerne vil dels falde mod gulv og dels medrives af båndet til punktudsug.

Pudsemaskinerne som benyttes i træindustrien er, ved drift, bemanded konstant.

6.3.1.3 Lakering

Lakering er en proces hvor træet påføres en beskyttende overflade. Ved valseakering påføres lakken af én eller flere overliggende påføringsvalser, som emnet passerer i et automatisk gennemløb. Valseakermaskinen kan påføre relativt små mængder lak/m² (fra ca. 5 til ca. 80 g/m²). Valseakering kan kun anvendes til næsten plane og plane emner. Processen udmærker sig ved høj udnyttelse af lak/maling, normalt udgør spildet under 5%. Normalt er der opløsningsmidler i under 50% af lakforbruget. Ved enkelte UV-lakker helt ned til 0%.

Ved rengøring af en lakvalse dannes flydende affald i form af brugt rensesvæske/opløsningsmiddel.

Valseakering er en af de arbejdsmiljømæssigt mindst belastende metoder, da denne metode ikke udvikler sprøjtetøv, og samtidig anvendes til påføring af opløsningsmiddelfattige lakker. God afskærmning og indkapsling er en forudsætning for effektivt at kunne bortsuge opløsningsmiddeldampe.

Sprøjtelering er en proces med stor udbredelse. Under højt tryk - mere end 100 bar - presses lak/maling gennem en dyse. Dysen/pistolen rettes mod et emne, hvorved forstøvet lak rammer dette. Forbisprøjt udgør normalt mere end 30% af det samlede lakforbrug. Metoden kræver et tørstofindhold under 50% i malingen/lakken. Arbejdsmiljømæssigt belastes processen væsentligst af opløsningsmiddeldampe og sprøjtetøv. Opløsningsmidlerne udgør normalt mere end 50% af lakforbruget, og sprøjtetøv udgør normalt mere end 30% af lakkens tørstofindhold.

6.3.1.4 Limning

Limning er en proces hvor træet sammenføjes. Nedenfor gives et eksempel på en limningsproces og det dertil hørende udstyr. Fremstilling af limtræ foregår ved, at massive træstave sammenlimes kant mod kant. Denne proces kaldes kantvis laminering. Kantvis laminering kan foretages enten som kold- eller varmspænd eller ved hjælp af højfrekvens. Ved varmspænd forekommer der dampe fra limen. Ved anlæg der anvender varmspænd kan udsugning af dampe og overskydende varme give problemer.

Støv synes at være en væsentlig eksponeringskilde indenfor branchen. De mest støvende processer vurderes at være pudning og fræsning. Støv kan også omfatte aerosoler, der forekommer ved blandt andet sprøjtemaling. Formaldehyd er en naturlig forekommende bestanddel af træ og anvendes ligeledes ved overfladebehandling. Formaldehyd indgår desuden blandt andet i lim og i syrehærdende lakker hvorfra det frigives ved hærdning. Organiske opløsningsmidler, såsom xylener, butylacetat samt aromatiske og alifatiske kulbrinter, indgår i både lakker og hærdere, lime, malinger, træbekyttelses- og træimprægneringsmidler.

6.3.2 Jern- og metalindustri

De mest anvendte processer i forbindelse med fremstilling og bearbejdning af metal er:

- 1) Smeltning
- 2) Støbning
- 3) Udglødning og hærdning
- 4) Slibning, f.eks. båndslibning
- 5) Spåntagning, f.eks. drejning, fræsning, savning, gnistning og kemisk materialefjernelse
- 6) Svejsning (smeltesvejsning)
- 7) Grafisk tryk på emner
- 8) Montage, lodning og afrensning

- 9) Overfladebehandling
- 10) Tørring

I det følgende beskrives en række af ovenstående processer og de ventilationsmæssige problemstillinger de giver anledning til, idet processerne der er nævnt som pkt. 4-8 normalt betjenes af punktafsug eller mindre sugehove.

6.3.2.1 Smeltning

I Danmark anvendes der udelukkende lysbue- og induktionsovne i industriel sammenhæng, idet lysbueovne anvendes til jern- og stålproduktion, og induktionsovne anvendes til smeltning af alle typer metaller i små og mellemstore volumener.

Lysbueovne

Lysbueovne anvendes i forbindelse med stålproduktionen i store volumener. I en lysbueovn (elektroovn) nedsmeltes metallet af lysbuer skabt med grafit elektroder, der eventuelt er suppleret med enten naturgas- eller olietilsatsfyring. Ovnene er udført som et stålchassis der er udmuret. Udmuringen dækker enten kun den nederste del af ovnen op til lige over slagelinien eller hele ovnvæggen. Ved delvist udmurede ovne er den øverste del er udført som rørvæg (paneler) med vandfyldte rør for køling. Ovnlåget er helt eller delvist udmuret, og låget er vandkølet hvis det kun er delvist udmuret. Naturgas- og oliefyringen anvendes ved nedsmeltningen til at eliminere "cold spots", hvilket vil sige de områder, elektroderne har svært ved at dække. Når der foretages nedsmeltning smelter elektroderne først et hul ned gennem materialelaget i ovnen, hvorefter elektroderne bevæges langsomt op efter efterhånden som metallet smelter. Råmaterialet til en lysbueovn kan være skrotjern (det tidl. Det Danske Stålvalseværk) eller jernmalm (Haldor Topsøe). Lysbueovne findes fra helt små størrelser til få tons af gangen op til store ovne der kan håndtere over hundrede tons. Emissionerne fra ovnene er varme, metallurgisk røg og støv (og støj) der opstår under charging og tømning af ovnen. Som følge af de legeringsmaterialer der anvendes kan støvet fra ovnen være problematisk, f.eks. kan mangan medføre hjerneskader. Der er normalt etableret afsug fra ovnlåget og omkring ovnen. Desuden kan det være nødvendigt at operatørerne anvender åndedrætsværn.

Induktionsovne

En induktionsovn består af en ildfast digle, der er omviklet med en vandkølet kobberspiral. Når der sendes en højfrekvent vekselstrøm gennem kobberspiralen opstår der en hvirvelstrøm i det stål der er i diglen og den elektriske modstand i stålet vil opvarme og smelte stålet. Der kan opnås meget høje temperaturer i en induktionsovn, og det er holdbarheden af den ildfaste digle der sætter grænsen. Den høje temperatur gør induktionsovnen velegnet til at lave stål med legeringsstoffer der har et meget højt smeltepunkt, og hvirvelstrømmene sikrer samtidig en effektiv omrøring af eventuelle legeringsstoffer så de fordeles jævnt. Induktionsovnen er meget økonomisk og har en fin temperaturkontrol, den er velegnet til at fremstille alle former for højt legeret stål, f.eks. værktøjsstål. Induktionsovne findes i størrelser der kan behandle op til 20 ton stål ad gangen. Emissionerne fra en induktionsovn er varme, metallurgisk røg og støv, der fjernes ved afsug etableret omkring ovnen.

6.3.2.2 Støbning

Støbeprocessens grundprincip er at smeltet metal støbes i en form. Når metallet er størknet og "tilstrækkelig" afkølet, kan støbegods og form adskilles. Formene kan enten være "engangsforme", som destrueres ved adskillelsen, eller "flergangsforme", som kan genanvendes. Nedenfor er der beskrevet en række forskellige støbeprocesser.

Sandstøbning

Fremstilling af sandstøbte jern-, stål- og metalemner sker principielt ved at smelte metal materialet, behandle smelten (almindeligvis under overophedning) og støbe smelten i sandform (med eventuelt tilhørende sandkerner), hvor den størkner til den - af formhulrummet - afgrænsede geometri. Fra smelte-, støbe- og formeprocesserne opstår miljøbelastende emissioner, og det samme er gældende for adskillelses-, rensnings- og regenereringsprocesserne. Der dannes store mængder støv og gasser ved nogle af processerne. Specielt i forbindelse med udstøbningen udvikles der gasser og pyrolyseprodukter fra formesandet samt metallurgisk røg. Ved udstøbning af aluminium er der ingen nævneværdig emission af gasser og pyrolyseprodukter. Ved form- og kernefremstillingsprocesserne kan der udvikles en del støv, røg og frigives dampe fra bindemidlerne.

Kokillestøbning

Støbningen foregår i permanente forme (synonymet dækker også trykstøbning). Forskellen mellem kokillestøbning og sandstøbning er, at der ved kokillestøbning anvendes en form af stål - kokiller - og ved sandstøbning - en form af sand.

Sandformen kan kun bruges én gang, mens kokillen kan bruges fra 1.000-10.000 gange. Kokillestøbning anvendes f.eks. ved udstøbning af knipler, som efterfølgende anvendes til produktion af stangstål. Emissionerne ved kokillestøbning er begrænset til varme og vanddamp fra støbningen.

6.3.2.3 Udglødning, normalisering og hærkning

Udglødning og normalisering

Når et metal været udsat for kolddeformation, som følge af f.eks. koldvalsning af en plade, dybtrækning eller trådtrækning er der opstået mange slip og slipplaner, dannet mange krydssende dislokationslinier samt kommet mange uregelmæssigheder i krystalgitteret og dannet nye kim. Ved opvarmning kommer atomerne i svingninger, og når svingningerne er store nok vil atomerne bevæge sig og danne nye fejlfri gitter med kimene som udgangspunkt. En stor deformationsgrad giver mange nye kim og et finkornet materiale, og en lille deformationsgrad giver få nye kim og grovkornet materiale. Materialet vil efter udglødningen have sin oprindelige trækstyrke og sejhed. Udglødningen foretages i en ovn, og udglødningstemperaturen for f.eks. jern er ca. 450°C.

Normalisering foretages f.eks. af varmvalsede stålplader for at give pladerne en mere finkornet struktur. Normaliseringen af stål foretages ved at opvarme stålet til ca. 850°C. Her omdannes stålets strukturer (ferrit, perlit m.m.) til finkornet austenit. Ved langsom afkøling i luft omdannes det finkornede austenit til finkornet ferrit og perlit. Normalisering kan anvendes på almindeligste varmvalsede stål. Efter en normalisering er de oprindelige spændinger fjernet fra stålet. For at undgå nye spændinger under afkølingen må den kontrolleres nøje.

Der er ingen emissioner fra processerne udover varmetab fra ovnene.

Hærkning

Hærkning karakteriseres i denne sammenhæng ved, at emner, primært stål - men også støbejern og aluminium, underkastes et termisk procesforløb uden tilførsel af stoffer udefra. Herved

opnå ændringer i materialets mikrostruktur, som medfører udtalte ændringer i materialets mekaniske egenskaber, som hårdhed og styrke. Egenskabsændringerne er afhængig af en for materialet tilstrækkelig hurtig afkøling. Processen foregår i en hærdeovn.

Hærdning i olie

Processen er karakteriseret ved, at emnerne opvarmes til en hærdetemperatur på ca. 850°C afhængigt af stålqualiteten. Den efterfølgende holdetid sikrer gennemvarmning og homogenisering. Under det sidste procestrin bratkøles emnerne i olie, hvorunder hærdestrukturen dannes. Der er ingen emissioner på arbejdsstedet.

Saltbadshærdning

Processen er karakteriseret ved at emnerne der opvarmes til hærdetemperatur, som afhængig af stålqualitet er 850°C - 1150°C, sker ved at anbringe emnerne i forskellige saltbade, hver med deres arbejdstemperatur eller temperaturområde. Afsugning over badene er påkrævet af hensyn til det interne miljø.

Induktionshærdning

Overfladen på jernbaseret materiale opvarmes ved at emnet anbringes som kernen i en spole, hvori der genereres højfrekvent vekselstrøm. Der er ingen emissioner på arbejdsstedet.

Anløbning

Normalt følger anløbningen direkte efter hærdeprocessen. Anløbningsovn er oftest en kammerovn eller varmluftovn med maksimal temperatur på ca. 600°C. Ovnen kan være integreret i en produktionslinie, men ofte betjenes ovnen manuelt. Der er ingen emissioner på arbejdsstedet.

Indsætning

Indsætning af kulstof i stål foregår i en opvarmet, lukket ovn med cirkulerende gas. Temperaturen ved behandlingen er 850-950°C, afhængig af ståltypen. Processen kan foregå kontinuert eller i batch. Kulstofpotentialet kan varieres under behandlingen og behandlingstiden er 0,5-20 timer. Uforbrændte gasser fra processen er giftige (CO), hvis de slipper ud i lokalet.

6.3.2.4 Overfladebehandling

Elektrolytisk overfladebehandling

En elektrolytisk belægningsproces er kendetegnet ved et i reglen vandigt bad, hvori der er opløst metalsalte. I badet er neddyppet to elektroder: en anode og emnet, som udgør katoden. Ved strømgennemgang sker der udfældning (reduktion) af metal fra opløsningen på katoden, det vil sige på emnet. Samtidig kan der ved reduktionsprocessen ske udvikling af hydrogen (brint). Ved anoden sker der samtidigt en oxidationsproces, hvilket vil sige opløsning af metalioner fra anoden og/eller dannelse af oxygen (ilt). Nedenfor ses en række af de mest anvendte elektrolytiske overfladebehandlingsprocesser.

Elforzinkning

Zink udfældet fra et alkalisk cyanidholdigt bad, hvori der er neddyppet en zinkanode, inert jernanode og emnet (katoden). Ved jernanoderne udvikles oxygen og ved emnet udvikles hydrogen med middelstor intensitet. Procestemperaturen er typisk 25-30°C. Der dannes giftige og ætsende aerosoler som følge af gasudviklingen. En stor del af aerosolerne opfanges af skumdannelsen på badets overflade. Gas og aerosoler fra badet må ikke spredes og skal bortskaffes effektivt. Der bør benyttes ventileret indkapsling. Karret kan f.eks. skærmes af et låg, som monteres omkring strømfophænet med udsugning langs karkanten.

Forkromning og fornikling

Forkromning sker i et hårdkrombad, hvori der er anbragt en blyanode og et emne (katode). Ved emnet udvikles hydrogen med meget stor intensitet og ved anoden udvikles oxygen med meget stor intensitet. Procestemperaturen er typisk 55°C. Der dannes aerosoler som følge af gasudvikling ved elektroderne. Langt størsteparten af aerosolerne optages i et skumtæppe, som dannes over badet ved tilsætning af fluortensider. Disse forbruges, hvorfor dannelsen af skumtæppet må holdes under opsyn. Dette gælder også i perioder hvor badet ikke anvendes (f.eks. i weekenden), så der sker oxidation af overskydende krom(III) til krom(VI). De dannede gasser (hydrogen/oxygen) og ikke opfangede aerosoler skal fjernes ved effektiv lokaludsugning, da krom(III) er giftigt og kræftfremkaldende.

Fornikling sker i et nikkelbad, hvori der er anbragt en nikkelanode og et emne (katoden). Der er ingen gasudvikling fra badet. Badet er surt og procestemperaturen er typisk 50°C. Badet afgiver i sig selv hverken gasser eller aerosoler, men der kan dannes aerosoler, hvis der benyttes luftgennemblæsning til badomrøring.

Maling og lakering

Ved maling og lakering påføres metallet primært en beskyttende overflade. Nedenfor ses eksempler på male- og lakeringsprocesser.

Pneumatisk sprøjtning

Denne form for maling kaldes også sprøjtning med luftforstøvning eller lavtrykssprøjtning. Pneumatisk sprøjtning er en proces, hvor flydende maling ved hjælp af luft forstøves via en dyse for derefter at påføres et emne. Anlæggene består af en luftkilde, en kompressor og en sprøjtepistol. Sprøjtning skal foregå i en sprøjteboks, idet processen emitterer opløsningsmidler og i mindre omfang støv. Under manuel sprøjtning bæres åndedrætsværn. Omfanget af ventilation af sprøjteboks fastsættes af Brandinspektionen og sikrer normalt, at grænseværdierne for arbejdslokalet kan overholdes. I lukkede sprøjtebokse bæres friskluftmasker.

Hydraulisk sprøjtning

Denne form for maling kaldes endvidere luftløs sprøjtning, højtrykssprøjtning eller airless sprøjtning. Hydraulisk sprøjtning er en proces der ved trykforstøvning påfører flydende maling på et emne. Forstøvningen sker med en sprøjtepistol monteret med en speciel dyse, og forstøvningen skyldes kombinationen af højt tryk og dysens konstruktion. Sprøjtetrykket er typisk 100 bar, men kan variere i området 50-300 bar. Malingen har normal værkstedstemperatur, men ved varmsprøjtning forekommer dog temperaturer op til 80°C. Processen emitterer opløsningsmidler og i mindre omfang støv. Under manuel sprøjtning skal der bæres åndedrætsværn. Omfanget af ventilation i sprøjtebokse fastsættes af Brandinspektionen og sikrer normalt, at grænseværdierne for arbejdslokalet kan overholdes. I lukkede sprøjtebokse bæres friskluftmasker.

Pulversprøjtning

Denne form for maling kaldes også elektrostatisk sprøjtning, triboelektrisk sprøjtning, elektrokinetisk sprøjtning, friktionssprøjtning eller Corona-sprøjtning. Som de forskellige navne antyder, sker pulversprøjtning efter forskellige principper.

Ved elektrostatisk pulversprøjtning føres pulveret frem til pistolen ved hjælp af trykluft. Når pulverpartiklerne passerer en elektrode ved pistolmundingen bliver de elektrostatisk opladet. Spændingen i sprøjtepistolen kan normalt varieres i intervallet 3- 20 kV. Det elektrisk opladede pulver transporteres ved hjælp af en kombination af elektrostatiske kræfter og trykluft til det

jordede emne, som skal belægges. Rundt om det jordede emne opbygges et elektrisk felt. De opladede pulverpartikler følger de elektriske kraftlinier, og man opnår en "rundslags-effekt". Normalt sprøjtes pulvermalinger på kolde emner, men ønskes større lagtykkelse, kan emnet forvarmes.

Ved triboelektrisk sprøjtning oplades pulveret ikke af elektroder, men ved friktion mellem pulverpartikler og pistolløbet. Et pulver, der bringes i kontakt med en overflade og ledes hen over denne, oplades. Arbejdet med termohærdende pulvermaling indebærer en risiko, såvel for forurening af omgivelserne, som for at de beskæftigede personer. De ricisi, der er mest relevante ved håndtering af pulver, er hudkontakt og indånding. God ventilation er påkrævet ved anvendelse af pulver, og processerne skal foregå i sprøjtebokse.

Manuel påføring

Pensel og rullepåføring foretages normalt kun ved reparationsarbejde eller udstikning før sprøjtepåføring. Processerne emitterer opløsningsmidler fra den malede overflade. Operatøren skal bære personlig værnemidler der svarer til den aktuelle maling.

6.3.2.5 Tørring

Tørreanlæg i jern- og metalindustrien anvendes f.eks. i forbindelse med tørring af malede eller lakerede metaloverflader. Nedenfor ses eksempler på tørreprocesser- og anlæg.

IR-ovne

I IR-ovne udsendes infrarød stråling (varmestråling). Når strålerne møder malingsoverfladen kan de enten reflekteres eller trænge ned i laget og absorberes. I sidstnævnte tilfælde omsættes strålingen til varmeenergi, hvorved tørringen og hærdningen foregår. IR-ovne anvendes både til traditionelle "våde" malinger og til pulvermalinger. Tørreprocessen giver anledning til afgivelse af opløsningsmiddeldampe. Emissionen er afhængig af mængden og typen af opløsningsmiddel i malingen. Opløsningsmiddelmængden udgør sjældent mere end 15 % af det oprindelige indhold, når emnet placeres i ovnen.

Konvektionsovne

I konvektionsovne tørres og hærdes malingen ved hjælp af strømmende varm luft i lukkede eller åbne ovne. Tørreprocessen giver anledning til afgivelse af opløsningsmiddeldampe. Emissionen er afhængig af mængden og typen af opløsningsmiddel i malingen. Opløsningsmiddelmængden udgør sjældent mere end 15 % af det oprindelige indhold, når emnet placeres i ovnen.

Sand- og glasblæsning

Ved sandblæsning afrenses der med kvartsand der blæses ud gennem en dyse med et lufttryk på 0,5-4 bar alt efter hvor hårdt der skal renses. Lufttryk og kornstørrelse på sandet reguleres alt efter emne. En god tommelfingerregel er at jo højere tryk og jo større kornstørrelse på sandet jo hårdere afrensning. Omvendt jo lavere jo blidere afrensning. Der anvendes sand med en kornstørrelse på 300 - 700µm (0,30 - 0,70 mm) I industrien anvendes der udelukkende tør sandblæsning, der bruges til rensning af jern, stål, træ etc.. Metoden er forbundet med store støvgener og kræver derfor en kabine eller anden inddækning og bør kun anvendes indendøre. Sandblæsning giver en forholdsvis ru rensning af overfladen. Som alternativ til sandblæsning kan der anvendes glasblæsning, som giver skånsom overfladerensning med forholdsvis lille ruhed. Glasblæsning udføres ligesom sandblæsning ved hjælp af trykluftblæseanlæg. I anlægget blæses små glasperler mod emnets overflade. Da glasperlerne er kugleformede slider det ikke væsentligt på materialet, men renser for urenheder. Glasblæsningen giver en pæn og ensartet

overflade. Glasperlerne har en diameter på 150 - 250µm (0,15 – 0,25 mm). Glasblæsning giver skånsom overfladerensning med forholdsvis lille ruhed, og anvendes fortrinsvis til rustfrit stål og aluminium. Både sand- og glasblæsning forårsager støvemissioner og skal derfor foretages i lukkede kabiner eller inddækning. Ved komplekse emner foretages sand- eller glasblæsningen manuelt og operatørernes arbejdsmiljø sikres ved f.eks. friskluftforsynet åndedrætsværn.

6.3.3 Papir- og grafisk industri

I det nedenstående beskrives papirindustrien og den grafiske industri.

Papirindustri

Papir kan fremstilles af jomfrufibre, ved pulping af genbrugspapir eller i en kombination heraf. I den danske papirindustri anvendes der næsten udelukkende genbrugspapir ved fremstillingen. Det indsamlede genbrugspapir genpulpes, renses og bleges, konditioneres (tilsætning af fyldstoffer) inden papirmassen tilføres papirmaskinen. I papirmaskinen afvandes og presses papirmassen inden papirbanen tørres og oprulles.

Foruden papir i baner fremstilles der produkter af støbepap (f.eks. æggebakker). Støbepap kan ligeledes fremstilles af jomfrufibre eller genbrugspapir. I praksis bliver støbepap fremstillet på basis af genbrugspapir. Ligesom ved papirfremstilling pulpes og renses genbrugspapiret. Derefter støbes papemnerne i en formmaskine, som dernæst tørres i en tørreovn.

Både ved fremstilling af papir og støbepapir der er talrige kilder til varme-, damp- og støvemissioner. Der foretages procesafsug gennem ovne, inddækninger på papirmaskiner, punktafsug ved pulpere og mange andre steder.

Grafisk industri

Den mest anvendte proces i den grafiske industri er grafisk tryk på emner som aviser, tidsskrifter, reklamer etc.. I det følgende beskrives denne type produktion sammen med en række andre processer, der er almindelige i den grafiske industri. Den grafiske industri har været storforbruger af organiske opløsningsmidler, og mange trykkere har fået varige helbredsskader heraf, da opløsningsmidlerne "opløser hjernen og nervesystemet". Heldigvis er forbruget af opløsningsmidler faldet – f.eks. bruger mange offset-trykkerier i dag planteoliebaserede afvaskere - de såkaldte vegetabiliske afvaskere.

Tryksager

En almen model for fremstilling af trykt massekommunikation ser således ud:

- originalklargøring
- grafisk tekst- og billedbehandling
- formfremstilling
- trykning, inkl. tørring
- færdiggørelse

De tre første produktionstrin kan forkortet kaldes prepress, hvormed produktionsprocessen groft inddeles i tre trin. Tilsvarende er branchen groft opdelt i tre virksomhedstyper, som hver for sig varetager sin del af produktionsprocessen. Der er således tale om prepress'virksomheder, trykkerier og bogbinderier. Det skal dog bemærkes, at mange grafiske virksomheder har flere produktionstrin samlet under et tag.

Prepress

Tidligere var prepress en meget arbejdsmiljøbelastende proces på grund af de fremkaldervæsker, der blev anvendt ved filmfremkaldelsen. Efter at billedmateriale og tilhørende tekster er blevet digitalt er behovet for filmkaldelse forsvundet og dermed de alvorlige miljøproblemer der var forbundet frem fremkaldervæsker, fixer'væske etc..

Trykning

Offset rotationstrykning benyttes ved mellemstore og store oplag f.eks. aviser, ugeblade, emballagetryk m.m., idet produktionskapaciteten i en rotationspresse er stor. En offset rotationspresse består af et antal trykværker fra 1 til 5 efterfulgt af et valseværk. Hvert trykværk består af et stort antal valser til påføring af fugtevand og sværte. Værkerne kan være kølet med cirkulerende kølevand i visse valser. Ved offsettryk på coatet eller glittet papir benyttes den såkaldte heat set offset teknik. Som følge af papirets ringe sugsevne, er der behov for at tørre papiret umiddelbart efter trykning. En del papir- og kartonmateriale overfladebehandles med en lake-ring. Der benyttes tre principielt forskellige laktyper: UV-hærdende lakker, vandfortyndbare lakker og opløsningsmiddelbaserede lakker. I forbindelse med trykkeprocessen og afvaskningen af valserne kan der udvikles der dampe som indeholder organiske opløsningsmidler og andre kemiske stoffer fra trykfarverne og fugtevandet. I dag er størstedelen af trykfarverne planteolie-baserede, men til nogen tryktyper, f.eks. visse arktryk, anvendes der stadig trykfarver der indeholder organiske opløsningsmidler. Organiske opløsningsmidler kan også indgå i trykfarver til flexotryk, dybtryk, serigrafi, tampontryk og i visse UV-farver og lakker til brug ved serigrafisk tryk. Desuden er etanolen i fugtevandet der anvendes til offset'tryk også et organisk opløsningsmiddel. I dag findes de organiske opløsningsmidler primært i de væsker der anvendes til afvaskning af valser, gummiduge, serigrafirammer, farvebakker og andet udstyr. Spritten i fugtevandet til offset-tryk er også et organisk opløsningsmiddel.

Ark'offset er en plantrykmetode, hvor trykprincippet bygger på at fedt og vand skyr hinanden. Ved offset pladepkopiering (trykpladefremstilling) fremstilles en plan trykplade med vandbærende og vandskyende overfladeområder. De vandskyende partier udgør i trykningen trykbilledet, idet de modtager farve fra trykvalsen og afgiver denne til en gummidug, hvorfra farven afsættes til papiret. Farve tilføres trykpladen fra et farveværk. Forinden tilføres trykpladen fugtevand, som skal sikre adskillelsen mellem trykgivende og ikke-trykgivende områder. Fugtevandet kan bestå af en blanding af alkohol/isopropanol, fugtevandstilsætning og vand. Ligesom ved rotationstrykning anvendes der normalt vegetabiliske trykfarver og væsker til afrensning, men etanolholdig fugtevand.

Ved højtryk afsættes farve fra ophøjede partier, klicheer, på trykformen direkte til trykemnet. Ved flexotryk anvendes rotationspresser, som ofte kan trykke i op til 6 farver i en arbejdsgang. Trykfarverne er oftest på sprit- eller vandbasis og hurtigtørrende.

Ved dybtryk afgives trykfarver fra fordybninger (kopper) i trykformen direkte til trykemnet. Billed- og tekstpartierne består af små fordybninger, der er ætset eller graveret ned i en kobberbeklædt cylinder. De ikke-trykgivende arealer repræsenteres af den blanke cylinderoverflade. Farverne tørrer dels ved indtrængning i papiroverfladen, dels ved fordampning i et varmeanlæg. Ved dybtryk anvendes letflydende farver med et stort indhold af opløsningsmidler. Til emballagetryk anvendes farver med indhold af opløsningsmidler som ethanol, isopropanol og n-propanol. Til magasindybtryk anvendes farver som indeholder store mængder organiske opløsningsmidler som toluen og benzin. Produktioner hvor der anvendes dybtryk repræsenterer dermed stadig en risiko for arbejdsmiljøet og for eksplosionsfare.

Tørring

I det følgende er der beskrevet de mest anvendte tørremetoder i forbindelse med tørring i den grafiske industri.

Tørreovne benyttes f.eks. ved trykning på ikke-sugende eller svagt sugende materialer, ved lakering og andre anvendelser, hvor større mængder væske skal afdampes for at undgå afsmitning. I ovnen holdes et konstant undertryk for at minimere udslip af opløsningsmiddeldampe til lokalet.

IR-tørring anvendes til at fremme tørringen af trykfarver der tørrer ved lufttørring, f.eks. på en rotationstrykpresse. Papirbanen opvarmes til 40°C ved bestråling med infrarødt lys, hvorved den hastighed hvormed tørringen sker øges væsentligt.

UV- hærkning anvendes fortrinsvis ved trykning af offsetfarver på ikke sugende materialer, som f.eks. på coated papir/pap til emballage. Overførslen af energi sker ved bestråling af emnet, og strålerne passerer gennem den øverste film på lakken og direkte ind i emnet.

Ved ovennævnte tørreprocesser frigives der diverse stoffer som skal fjernes fra trykkemaskinen, ligesom der også forekommer termisk belastning. Det er nødvendigt at bortventilere disse belastninger ved udsugning fra tørrektionen.

6.3.4 Kemisk industri

Den kemiske industri kan opdeles i følgende hovedgrupper:

1. Kemisk råstofindustri, herunder blandt andet fremstilling af industrigasser, kunstgødning, bekæmpelsesmidler og basisplast
2. Olieraffinaderier
3. Fremstilling af asfalt, tagpap, smøremidler og andre kulprodukter
4. Fremstilling af andre kemiske produkter, herunder blandt andet farve- og lakfabrikker, medicinalfabrikker, sæbe- og kosmetikfabrikker, sprængstoffabrikker og limfabrikker

En af fællesnævnerne for hele branchen er et forbrug af kemiske stoffer og materialer til produktion af andre stoffer og materialer, af mellemprodukter og halvfabrikata eller af færdige produkter.

I det følgende beskrives nogle få udvalgte processer for hovedgruppen "Fremstilling af andre kemiske produkter", idet hovedparten af produktionsanlæggene for virksomhederne i de øvrige kategorier er placeret helt eller delvis udendørs, og der er derfor ikke behov for procesafsugning.

6.3.4.1 Farve- og lakfabrikker

Procesforløbet ved fremstilling af farve og lak ses nedenfor:

Forblanding

Maling og trykfarve er generelt sammensat af 5 hovedkomponenter:

- bindemiddel
- opløsningsmiddel
- pigment
- fyldstof
- additiver/hjælpestoffer

Afhængig af batchstørrelse, råvaremængde og produktionsteknik tilsættes råvarer enten ved håndkraft direkte fra emballagen eller via pumpe- og doseringsanlæg. Blandekarret er normalt forsynet med en hurtiggående savbladsomrører, en såkaldt dissolver. Når dissolveren arbejder

afgives den mekaniske energi i blandingen som bevirker at temperaturen stiger, - i visse tilfælde op til 60-70°C.

Rivning

Ved rivning opnås, at produktet får den ønskede rivefinhed.

Færdigblanding

Når den ønskede findeling er opnået tilsættes de resterende råvarer, typisk supplerende opløsningsmiddel og bindemiddel

Tapning

Efter færdigblanding tappes det færdige produkt til forsendelse og levering. Ved tapning foretages altid en filtrering af blandingen.

I forbindelse med alle procesforløbene, er der etableret permanente udsug og punktudsug. Der anvendes både åbne og lukkede kar i produktionen.

Den vigtigste emissionstype set i forhold til procesafsug er fordampningen af organiske forbindelser (VOC), der er indeholdt i nogle af produkttyperne. Der emitteres desuden organisk og uorganisk støv fra håndteringen af de pulverformige fyldstoffer og pigmenter, der anvendes. Visse pigmenter kan indeholde metaller som f.eks. kobber og krom. Emissionen af VOC afhænger væsentligt af de flygtige komponenters damptryk, – det vil sige produktsammensætningen og blandingens temperatur. I de tilfælde hvor produktionen foregår batchvis skla der ske en komplet rengøring af alt procesudstyr efter hver batch for at undgå afsmitning af farve, samt i nogle tilfælde regulær uforenlighed imellem råvaretyper fra produkt til produkt. Rengøring af mobile kar og tanke sker med manuel afrensning og spuling i særlige aflukkede skyllerum med kraftig udsugning. Der er maskepåbud under arbejdet. Lukkede systemer og blandeanlæg rengøres med CIP'lignende (cleaning-in-place) anlæg, hvor der anvendes "grise" til rengøring af længere rørstrækninger.

6.3.4.2 Medicinalfabrikker

I den farmaceutiske industri er der typisk tale om kemiske reaktioner og gæringsprocesser ved anvendelse af mikroorganismer. Processerne kan være såvel endoterme (varmeforbrugende) som exoterme (varmeafgivende). Gæringsprocesser er typisk exoterme. Herudover er der for mange produktioner meget høje krav til renhed, hvilket stiller helt særlige krav til procesventilation og afsug. I nogle produktioner anvendes renrum, hvor det ikke er ualmindeligt med et luftskifte på op til 100 gange i timen.

Procesforløbene er ofte batchvis og at de enkelte produktionsenheder er forholdsvis små.

Processerne i medicinalindustrien spænder vidt, da de produkter der fremstilles er meget forskellige (flydende, pulver, tabletform). Det typiske procesforløb indeholder råvarekonditionering, reaktioner/gæring, separation, færdigbehandling og pakning. I forbindelse med stort set enhver medicinsk produktion anvendes der organiske opløsningsmidler. Og i mange tilfælde anvendes desuden forskellige aminer og estere, der for visses vedkommende er sundhedsskadelige. Endelig kan der være støvende processer i forbindelse færdigbehandling (f.eks. ved tabletering) og pakning.

Der er udbredt anvendelse af procesventilation og afsug i branchen har på grund af krav til renhed i produktionen, arbejdsmiljøhensyn og i mange tilfælde ligeledes for at begrænse risici

for eksplosion. Der er typisk etableret procesventilation (grundventilation) af produktionslokalerne med et luftskifte på 10-30 gange per time. Derudover er der procesafsug ved særlig krævede kilder. Endelig er der stinkskebe til laboratoriebrug samt LAF-bænke (Laminar Air Flow) og renrum de steder hvor produkterne håndteres i det fri og der er krav om meget høj renhed.

Den væsentligste emission stammer fra fordampningen af organiske forbindelser (VOC), der anvendes ved produktion af nogle af produkttyperne. Der emitteres støv fra håndteringen af de pulverformige fyldstoffer til tabletering. I mange tilfælde bliver både tilgangs- og afkastluft HEPA-filtreret.

7 Procesudsug

7.1 Generelt

I dette projekt arbejdes der ud fra en inddeling af procesudsugning efter de tre grundprincipper:

- Omslutningsprincippet (indkapsling)
- Modtageprincippet
- Gribepincippet

Ved *omslutningsprincippet* er processen helt eller delvist indkapslet, og der suges fra indkapslingen, så forureningen ikke kommer ud i det omgivende lokale. Ofte vil det kun være nødvendigt at udsuge små luftmængder for at opretholde et lille undertryk i indkapslingen.

Modtageprincippet udsuger den forurenende luft fra et udsug, som er placeret således ved processen, at luftens bevægelsesmønster udnyttes. Bevægelsesmønsteret kan f.eks. være opstigende varm luft.

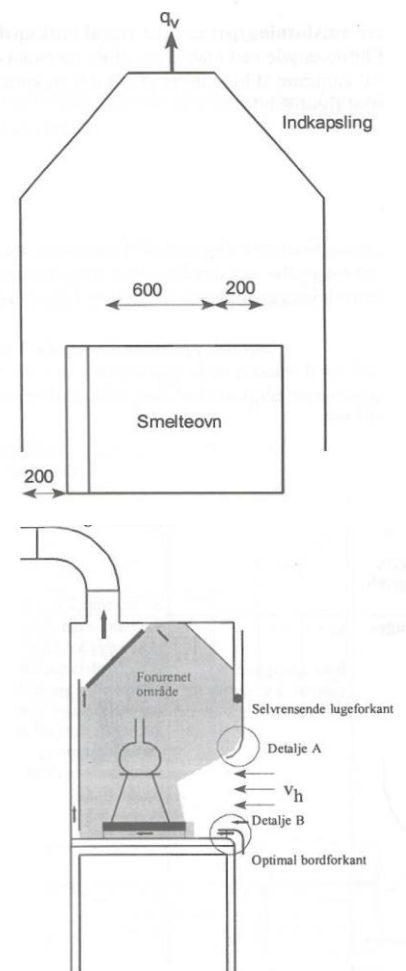
Ved *gribepincippet* udformes og placeres udsuget, så det kan indfange og fjerne forureningen fra processen før den slipper ud i lokalet.

Omslutningsprincippet

Omslutningsprincippet anvendes primært i forbindelse med udsugning fra processer, hvor der udvikles dampe/gasser der kan være helbredsskadelige og hvor det derfor vigtigt at udsugningen er meget effektiv, f.eks. i forbindelse med maleprocesser. Derudover anvendes omslutningsprincippet ved varmeafgivende processer som f.eks. smeltning. Ved omslutningsprincippet kan der være tale om:

- En total indkapslet proces
- En delvist indkapslet proces

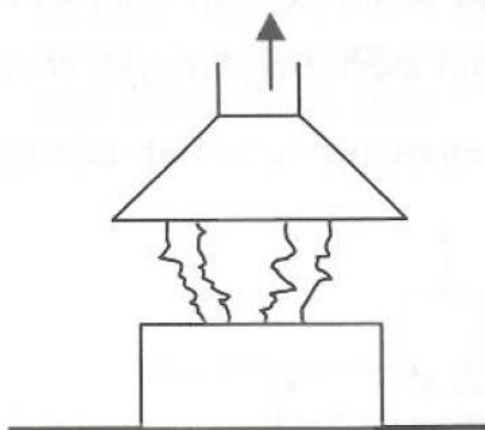
Set i forhold til udsugningseffektivitet og energiforbrug er det bedst at indkapsle den forurenende proces. Der skal kun opretholdes et svagt undertryk i indkapslingen for at fjerne forureningen effektivt, og den udsugede luftmængde kan derved være meget lille. I visse tilfælde vil det være hensynet



til varmeafgivelse, eksplosionsfare og minimum bærehastighed i kanalsystemet hvis der er partikelemission, som vil være dimensionerende for den udsugede luftmængde. I de mange tilfælde vil det ikke være muligt at foretage en total indkapsling af den forurenende proces, da det vil forhindre tilstrækkelig overvågning og at der arbejdes med processen. Som eksempel på total indkapslede processer kan nævnte CNC-drejebænke og plaststøbemaskiner, der placeret i lukkede kabinetter med udsugning. Når det ikke af hensyn til processen er muligt at foretage en total indkapsling kan processen indkapsles delvist, dvs. at den ene af de seks side i indkapsling er helt eller delvist åben. Et par eksempler på delvist indkapsling er en malekabine og et stinkskab, hvor kun den side der har front mod operatøren er åben. I åbningen opretholdes tilstrækkelig hastighed til at forureningen ikke undslipper udsugningen. Det er vigtigt at udsugningen fra indkapslingen udformes så der skabes en ensartet lufthastighed over hele det åbne areal. Desuden er det vigtigt indløbsforholdene (kanterne i indkapslingen) udformes så forureningen holdes i indkapslingen, og at hastigheden i det åbne areal kan holdes så lav som mulig.

Modtageprincippet

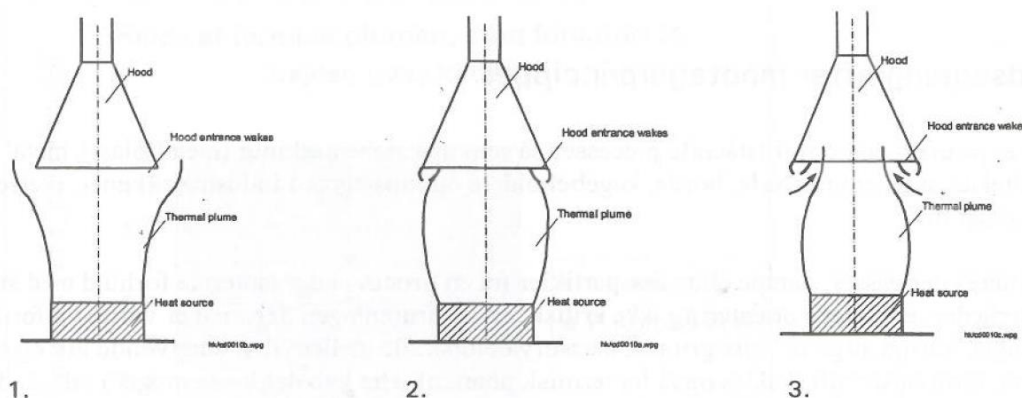
Ved modtageprincippet vil emitterede gasser, varme eller fine partikler bringes fra forureningsstedet og til udsugningen ved egen kraft, hvorfra det udsuges. Gasser og varme bringes til udsugningsstedet af enten ved opdrift som følge af vægtfyldeforskel i forhold til den omgivende luft eller ved termisk opdrift, mens partikler til udsugningen hvis de er i bevægelse mod udsugningen. Der kan være tale om processer som f.eks. støbemaskiner, smelteovne/-kar, bade, svejseprocesser og stege-/kogeprocesser. Hvis der emitteres gasser/dampe eller partikler under isoterme forhold og med små hastigheder er placeringen af udsugningen ikke kritisk. Men hvis der er en betydelig termisk belastning vil den varme forurening (også kaldet termisk plumen) stige til vejrs som følge af den termiske opdrift, og det kan være svært at indfange forureningen, da der skal arbejdes mod de termiske kræfter. Derfor er udsugningen fra varme forureningskilder stort set altid placeret over kilden, idet den termiske opdrift selv bringer forureningen ind i udsugningen. Det er vigtigt, at udformningen af udsugningen har en størrelse, der kan modtage den termiske plumen samt at udformningen af udsugningen er udført så den sikrer mod at en del af den termiske plumen forlader udsugningen igen som følge af bevægelsen oppe i udsugningen. Udsugningen bør være forsynet med reflektorer, der sikrer at den termiske plumen forbliver oppe i udsugningen.



Figur 7.1.1 Udsugning efter modtagerprincippet.

Når den varme luft (forurening) stiger til vejrs kan der opstå tre forskellige situationer, som er illustreret med figur 7.1.2.

1. Luftstrømmen i den termiske plumen (forureningen) er større ved sugehovens underkant end den udsugede luftmængde – situation 1
2. Luftstrømmen i den termiske plumen (forureningen) er af samme størrelse ved sugehovens underkant end den udsugede luftmængde – situation 2
3. Luftstrømmen i den termiske plumen (forureningen) er mindre ved sugehovens underkant end den udsugede luftmængde – situation 3



Figur 7.1.2 Termisk plumen i forhold til udsuget luftmængde.

Det ses, at hvis den termiske plumen er større end den udsugede luftmængde vil en del af forureningen ikke blive fanget og forsvinder til omgivelserne (situation 1). På den anden side suges der en del unødigt luft med den termiske plumen hvis den udsugede luftmængde overstiger behovet (situation 3). Den mest effektive udsugning skabes når der er passende overensstemmelse mellem den termiske plumen og den udsugede luftmængde.

Gribeprincippet

Ved gribeprincippet indfanges og fjernes forureningen fra en proces ved at skabe en så kraftig luftbevægelse ved forureningen at den ledes til udsugningen. Princippet bruges bl.a. til at fjerne træ- og metalstøv samt dampe fra processer. Ved svejseprocesser er der tale om en kombination af gribe- og modtagerprincippet, da svejserøgen er varm. Uanset hvilken type forurening der er tale om er det som altid vigtigt så vidt at placere udsugningen, så en eventuelt bevægelse i forureningen er mod udsugningen. Desuden skal sugestedet placeres så tæt på kilden som overhovedet muligt af hensyn til udførelsen af processen. Udsug efter gribeprincippet kan give anledning til høje udsugede luftmængder. Ud fra et energioekonomisk – og også arbejdsmiljømæssigt – synspunkt bør udsugninger derfor så vidt muligt udformes efter omslutnings- eller modtagerprincippet.

Uanset hvilket udsugningsprincip der vælges i det konkrete tilfælde er udformningen af sugestedet yderst vigtigt, når udsugningen skal være effektiv samtidig med at energiforbruget (dermed luftmængden) skal være lavt. Det er i den forbindelse især vigtigt at skærme forureningskilde bedst muligt af samt at etablere flanger/foils, der medvirker til at gribe og tilbageholde forureningen.

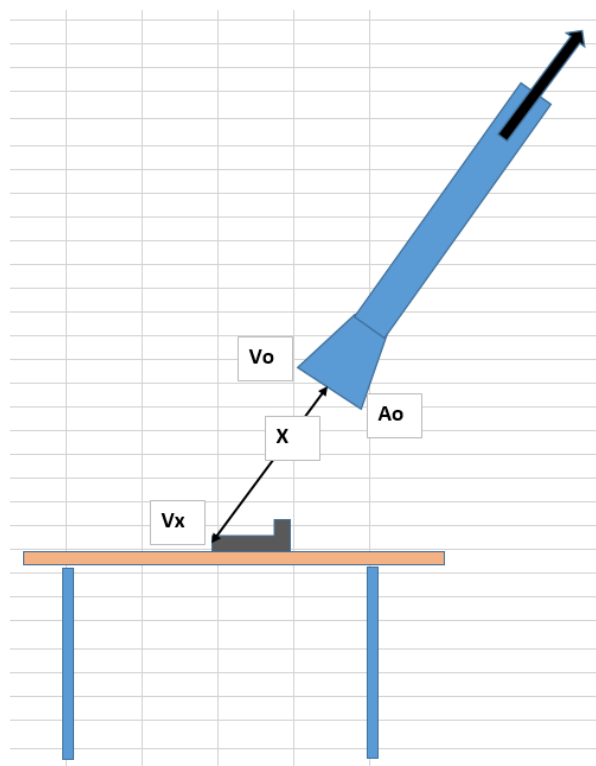
Ved dimensionering af procesudsugning er det vigtigt at forureningens naturlige bevægelsesretning studeres, og der vælges den udsugningsretning, der understøtter forureningens naturlige bevægelse. Bevægelsen kan være bestemt af termisk opdrift, almen ventilation, arbejderens bevægelser, værktøjets eller arbejdsstykkets bevægelse, f.eks. medriver et roterende hjul luft og skaber stærke luftbevægelser i nærheden af hjulet. Forureningens massefylde i forhold til luften spiller en vis rolle. For dampe er det dog sjældent, at de i luftblanding bevæger sig på anden måde end luft. En anden væsentlig faktor ved dimensionering af et lokalt udsug er at vurdere hvor tæt udsugningsåbningen kan placeres ved forureningsstedet; jo nærmere des bedre virkning for samme lufthastighed i sugeåbningen.

Projektets haft til formål var at udvikle automatik til proces- og punktudsug, der kan assistere brugeren ved f.eks. at følge bearbejdningsprocessen og således kan holde sig relativt tæt på forureningskilden, eller ved at tilpasse udsugningen til det faktisk, aktuelle behov, herunder at afbryde udsugningen når der ikke er behov.

I rapporten "Energioptimering af procesventilation og udvikling af fleksible procesudsug til store industrielle emner" /3/ er der et udførligt teorigrundlag for beregning og dimensionering af luftmængder for procesudsug. Denne teori er bragt i anvendelse i nærværende projekt.

7.2 Punktudsug

Den allerstørste ulempe ved de eksisterende punktudsug er den kritiske afstand til forureningskilden, hvilket den efterfølgende skitsetegning og formeludtryk illustrerer.



Figuren viser en skitse af et punktudsug, hvor A_o er punktudsugets åbningsareal, V_o er indløbs-hastigheden, X er afstanden fra punktudsugets åbning til det fjerneste punkt på svejsemærket og V_x er

den nødvendige minimumsgribe-hastighed ved emnet som er tilstrækkelig til at gribe forureningen og føre det op i selve udsuget.

Sammenhængen mellem V_o og V_x er vist i det efterfølgende formeludtryk:

$$\frac{V_o}{V_x} = \frac{10 \cdot X^2 + A_o}{A_o}$$

eller

$$q_o = V_o \cdot A_o = V_x \cdot (10 \cdot X^2 + A_o)$$

Det ses af formeludtrykket, at to parametre har stor betydning for størrelsen af den nødvendige udsugede luftstrøm: V_x og X , - men specielt afstanden X , som indgår i anden potens har dramatisk betydning.

Formeludtrykket gælder strengt taget for isoterme forureninger, dvs. forureninger med nogenlunde samme temperatur som omgivelsestemperaturen (rumtemperaturen).

Ved gassvejsning anvendes en brænder, som almindeligvis får tilført en blanding af [ilt](#) (O_2) og acetylen (C_2H_2), som antændes og herved udvikler en svejseflamme, som kan opnå en temperatur på omkring $3.000^\circ C$. Denne høje temperatur skaber en termisk plumen, som stiger opad. Herved vil punktudsuget ofte have lidt nemmere ved at fange svejserøgen, men igen spiller afstanden en vigtig rolle, hvilket ses af det efterfølgende udtryk for en varm forureningskilde:

$$q_y = 0,005 \cdot \Phi_k^{1/3} \cdot (y + d)^{5/3}$$

Φ_k er den effekt – indsat i W – som varmekilden (svejseflammen) afgiver ved konvektion

y er den lodrette afstand over varmekilden (svejseflammen)

d er varmekildens (svejseflammens) diameter

Den varme termiske plumen "suger" mere luft til sig og den samlede luftstrøm q_y vokser kraftigt med den lodrette afstand y .

$$d_y = 0,44 \cdot (y + d)$$

Herforuden vokser den termiske plumen i bredden, d_y som funktion af den lodrette afstand y , hvilket giver punktudsuget mere vanskelige betingelser.

For at kunne tage hensyn til disse forhold og andre "usikkerhedsmomenter" er det blevet praksis at projektører et punktudsug, f.eks. svejseudsug, til en udsuget luftstrøm på mindst $1.000-1.200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Udsugningen er i dag karakteriseret af manuel eller stationær placering af punktudsuget (mundingen) og deraf manglende optimal placering i procesforløbet. Det bevirker at volumenstrømmen oftest er – og skal være – unødvendig stor for at opnå den ønskede effekt i form af fjernelse af uønskede stoffer som røg, støv, partikler eller skadelige gasser. Men den manglende mobilitet kan også medføre (for) lange sugeafstande, der nedsætter punktudsugets effekt på koncentrationen af skadelige stoffer i luften, hvorfor det kan være svært at opretholde det rette og ønskede arbejdsmiljø.

Når den udsugede volumenstrøm pr. punktudsug i de nuværende løsninger er relativt høj medfører det, at der dels benyttes forholdsvis meget energi dertil, men også at der skal indblæses tilsvarende mængde erstatningsluft, som der tilmed en stor del af året skal benyttes varmeenergi til at bringe op i den rette indblæsningstemperatur.

Ved at holde en mere konstant og kort sug afstand til kilden, kan luftmængden nedsættes og effektiviteten alligevel som minimum bevares.

Punktudsug benyttes i typiske eller udbredte industrielle processer som f.eks. svejsning, fræsning, slibning, laserskæring, maling og til forskellig automatisk bearbejdning.

I dag er punktudsug karakteriseret ved, at der som oftest benyttes en fleksibel men manuel sugearm, som indstilles af brugeren til en given position i forhold til arbejdsområdet og dermed forureningskilden. Efterhånden som arbejdet skrider frem, flytter den afgivne forurening i form af røg, støv, partikler eller skadelige gasser med selve bearbejdningen. Ofte kan det være svært for brugeren i praksis at få flyttet punktudsug med under arbejdet hurtigt nok til at punktudsugets effektivitet bevares.

Ved at gøre punktudsug bevægeligt og/eller automatiseret, er målet at holde punktudsug inden for en effektiv afstand af kilden ved at punktudsug flytter sig efter forureningskilden eller gør brugeren opmærksom på, at punktudsug skal flyttes for at bevare udsugets effektivitet.

7.2.1 Udsugningseffektivitet

Afstanden fra forureningskilde til punktudsug spiller som nævnt i indledningen en markant rolle for den nødvendige udsugede luftstrøm. For at få mere klarhed over dette forhold og yderligere en vurdering af punktudsugets følsomhed overfor asymmetrisk placering af forureningskilde i forhold til punktudsug, er der gennemført en række forsøg med varm N₂O sporgaskilde (forureningskilde). Der er anvendt en tilhørende Nordtest NT VVS 088 standard, hvor udsugningseffektiviteten er defineret som:

$$\varepsilon = \frac{C_{udsug(aktuel)}}{C_{udsug(100%)}}$$

Sporgaskilden er først placeret direkte oppe i selve punktudsug, således at definitions mæssigt 100% af sporgasmængden suges ud. N₂O koncentrationen måles i udsugningskanalen. Herefter er sporgaskilden ført ned på arbejdsbordet i den rette position i forhold til punktudsug. Forsøget gentages nu og den målte N₂O koncentration måles igen i udsugningskanalen. Forholdet mellem de to målte koncentrationer giver den beregnede udsugningseffektivitet.



Figur 7.2.1 Billedserien viser opstillingen i laboratoriet til måling af udsugningseffektivitet under forskellige forhold.

Selve sporgaskilden er valgt opbygget med et varmeelement i bunden af en $\varnothing 100$ mm kanal i metal. Herefter en hulplade og sluttelig et stykke M5 filter. Sporgassen doseres tre steder lige over varmeelementet. M5 filteret bevirker en rimelig jævn fordeling af sporgassen. Opstillingen blev først testet med røg.



Figur 7.2.2 Billedserien viser sporgaskildens opbygning. Overfladetemperaturen kan gå helt op til omkring 1.200 °C.

Forsøgsrækken er gennemført med en variation af følgende parametre:

- Den udsugede luftstrøm, m³/h
- Vandret afstand fra sporgaskilde til punktudsug, cm
- Lodret afstand fra sporgaskilde til punktudsug, cm

		Målinger med traktposition på skrå = 45° - Præsentation af ugeeffektivitet i % baseret på de udførte lattergas målinger i PPM & Korrektion af 100% værdier																						
Volumenstrøm (m ³ /h)	0/0	20/20	20/30	20/40	20/50	0/0	0/0	30/20	30/30	30/40	30/50	0/0	0/0	40/20	40/30	40/40	40/50	0/0	0/0	50/20	50/30	50/40	50/50	0/0
400	106,9	103,3	102,8	99,9	95,9	97,5	122,5	117,5	117,6	115,0	113,3	117,4	116,7	116,0	113,5	64,8	36,5	121,7	121,7	119,3	113,3	46,0	39,2	125,9
Sugeeffektivitet		98,4%	99,7%	98,7%	96,5%			96,8%	97,6%	96,2%	95,6%			98,5%	95,6%	54,1%	30,2%			97,3%	91,8%	37,0%	31,4%	
500	120,7	112,7	111,1	106,4	88,0	98,1	121,9	116,4	116,1	98,6	96,5	118,3	143,6	137,1	132,7	111,6	85,3	146,4	146,4	141,0	139,5	93,7	84,9	145,0
Sugeeffektivitet		97,0%	99,5%	99,3%	85,7%			96,0%	96,3%	82,3%	81,1%			95,1%	91,7%	76,8%	58,5%			96,5%	95,7%	64,4%	58,5%	
600	151,9	149,8	149,6	149,1	145,8	156,3	146,4	144,1	142,5	141,6	111,5	148,4	148,4	142,8	129,2	117,6	116,2	156,1	145,7	142,8	147,2	141,1	140,4	156,5
Sugeeffektivitet		98,0%	97,3%	96,4%	93,8%			98,2%	96,8%	95,9%	75,3%			95,2%	85,3%	76,8%	75,2%			96,6%	98,1%	92,7%	91,0%	
700	133,0	132,7	132,4	132,0	127,8	136,2	136,0	134,6	138,4	139,8	133,7	135,6	135,3	130,5	131,6	131,5	130,6	132,2	132,0	130,7	131,6	130,2	128,7	132,5
Sugeeffektivitet		99,3%	98,6%	97,9%	94,3%			99,0%	101,9%	103,0%	98,6%			96,9%	98,1%	98,5%	98,3%			98,9%	99,5%	98,4%	97,2%	
800	118,6	119,7	119,1	122,3	125,0	128,2	128,7	123,9	125,2	126,3	125,8	127,8	127,1	122,2	121,1	123,8	127,4	129,3	128,0	122,4	123,8	123,7	121,1	127,4
Sugeeffektivitet		99,3%	97,3%	98,3%	99,0%			96,4%	97,6%	98,5%	98,3%			95,8%	94,6%	96,4%	98,8%			95,7%	96,9%	96,9%	94,9%	
934	142,3	139,7	142,9	141,9	141,3	145,2	145,0	141,8	141,1	140,6	139,8	144,5	144,5	139,7	139,6	138,3	138,4	142,5	141,6	140,0	138,3	137,7	136,9	141,3
Sugeeffektivitet		97,7%	99,6%	98,5%	97,7%			97,8%	97,4%	97,2%	96,7%			96,9%	97,1%	96,5%	96,8%			98,9%	97,8%	97,4%	96,9%	

Værdien fx 20/30 betyder henholdsvis 20 cm lodret over sporgaskilde og 30 cm vandret væk fra sporgaskilde. Det giver en direkte afstand på 36 cm

Tabel 7.2.1 Udsugningseffektivitet som funktion af den vandrette og lodrette afstand til forureningskilden.

Udsugningseffektiviteten i tabel 7.2.1 er opgjort som funktion af den vandrette og lodrette afstand til forureningskilden i centimeter, dvs. at f.eks. værdierne i kolonnen 20/30 er udsugningseffektiviteten, hvis den vandrette afstand er 20 cm og den lodrette afstand er 30 cm ved de anførte volumenstrømme.

Tabellen viser, at et punktudsug med en udsuget luftstrøm på knap 1.000 m³/h kan håndtere en afstand mellem forureningskilde og selve punktudsuget på omkring [50/50] uden en mærkbar forringelse i udsugningseffektivitet (gribeevne). Hvis luftstrømmen reduceres til det halve eller omkring 500 m³/h bør afstanden ikke overstige omkring [30/30].

Det er vurderet, at udsugningseffektiviteten bør være over 95% for at sikre brugernes arbejdsforhold.

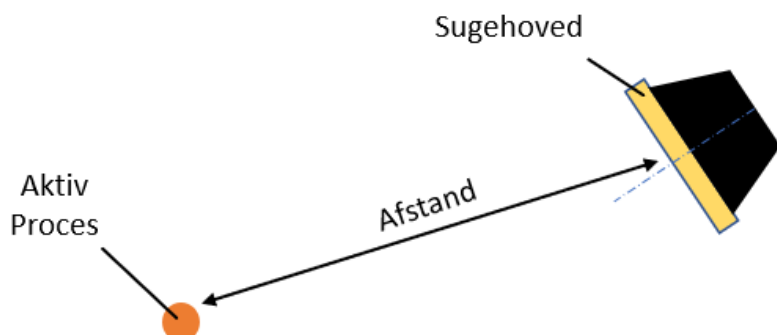
8 Procesudsug med automatisk styring af luftmængden

En stor del projektets budget er dedikeret til udvikling af "intelligent" styring af luftmængden. I dette afsnit dokumenteres udviklingen af to systemløsninger til automatisk styring af udsugningsmængder i procesventilation.

Systemerne er udviklet på baggrund af tre fundamentale designkrav:

- 1) Da processer der kræver punktudsug foregår tæt på sugehoven, typisk inden for en radius af 100 cm, er det nødvendigt at afstandsmålingerne har en målenøjagtighed på centimeterniveau
- 2) Hvis løsningen skal bruges til industri processer, er det vigtigt systemet er robust, pålideligt og kræver begrænset eller ingen vedligehold som eksempelvis periodisk kalibrering
- 3) Det er afgørende at prisen for løsningen holdes på et minimum. Dels for at tillade en høj adaptation på markedet, men endnu vigtigere for at have en ordentlig rentabilitet.

For at regulere luftmængden automatisk, er der behov at kende afstanden mellem den aktive proces og sugehoven. Til detektering af processen blev forskellige teknologier overvejet. Der var blandt andet tale om laser afstandsmåler, accelerometer/gyroskop samt billedgenkendelse/AI.



Figur 8.1 Måleprincip.

På baggrund af designkravene, blev det vurderet at et akustisk måleprincip var det bedste udgangspunkt til den første prototype.

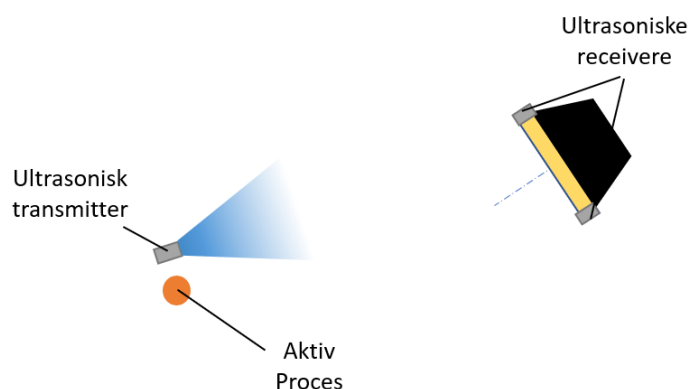
Fordelene ved denne løsning er:

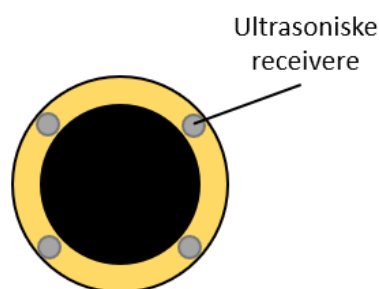
- Billige sensorer
- Kræver ikke kalibrering
- Har en præcision på millimeterniveau

Den største udfordring ved denne løsning, er håndtering af fejlmålinger, som resultat af støj fra miljøet.

8.1 Prototype 1

En ultrasonisk transmitter placeres i nærheden af processen, f.eks. på en svejsepistol. 4 ultrasoniske receiveere placeres på sugehoven.





Figur 8.1.1 Måleprincip med ultrasonisk transmitter.

Afstanden mellem transmitter og receiver kan måles med Time of Flight (ToF) metoden. Et ultrasonisk signal sendes afsted fra transmitteren og modtages efter en kort tidsforsinkelse af receiveren. Eftersom lydets hastighed er kendt, kan afstanden transmitter og receiver beregnes ud fra følgende formel:

$$d = v * \Delta t$$

Hvor d er afstanden, v er lydets hastighed i luft og Δt er tidsforskellen mellem det afsendte og modtaget signal.

For at bestemme transmitterens lokation, er det også nødvendigt at kende vinklen til en kendt reference. I dette tilfælde er sugehoven vores reference, da vi har brug for positionen relativ til sugehoven og ikke en absolut position i rummet.

Vinklen på sugehovens plan kan enten måles direkte med fastmonterede sensorer eller den kan beregnes ud fra afstandsmålinger fra tre receiveere (et plan kan defineres ud fra tre punkter).

I prototype 1 blev det besluttet at bruge en ekstra receiver for redundans, da dette tillader filtrering af fejlmålinger.

8.1.1 Hardware

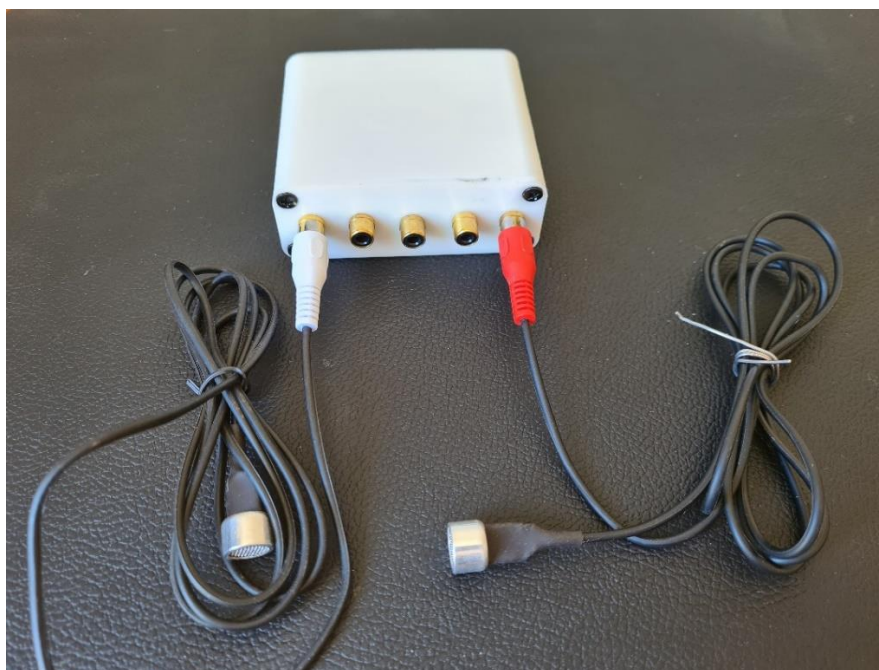
Der blev brugt 400ST120 ultrasoniske kapsler som både transmitter og receiver. Kapslerne blev hver monteret på et standard RCA kabel, se figur 6.1.4. Endvidere blev der brugt fire ultrasoniske afstandsmålere type HC-SR04 som transmitter/receiveere. De eksisterende ultrasoniske kapsler loddet af og blev erstattet af de nye kapsler (400ST120) med RCA-tilslutning, se figur 8.1.5. Der blev brugt en ESP32 mikrocontroller til dataopsamling.



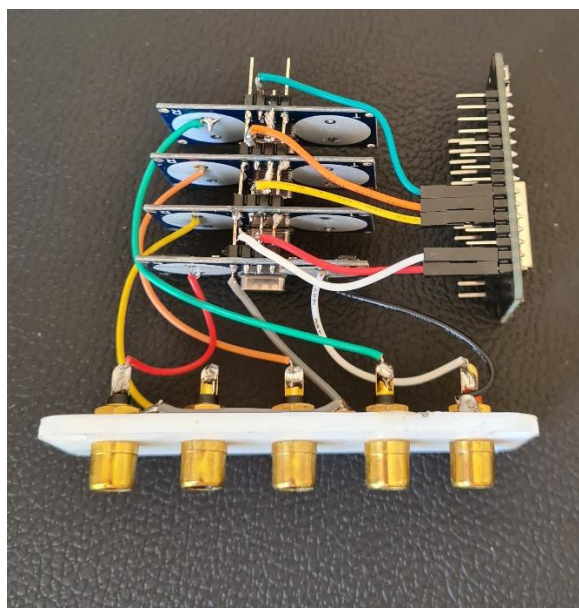
Figur 8.1.2 HC-SR04 ultrasonisk afstandsmåler.



Figur 8.1.3 400ST120 kapsel. 12,7x10mm.



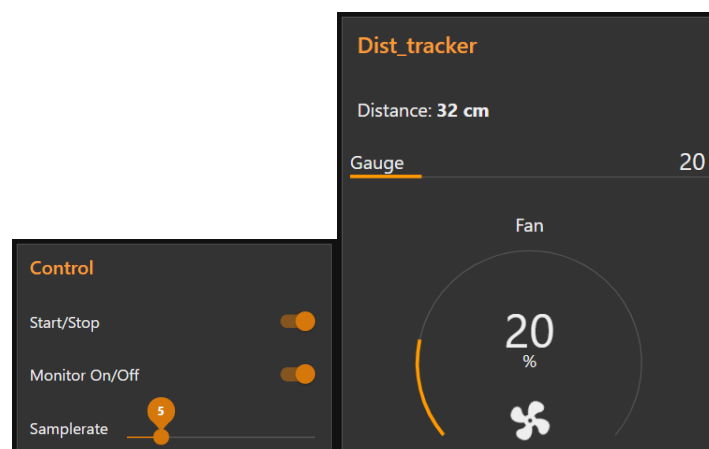
Figur 8.1.4 Prototype 1 med transmitter og en enkelt receiver tilsluttet.



Figur 8.1.5 Prototype 1 hardware.

8.1.2 Software

Der blev udviklet et web-interface til styring, monitorering og datalogning under udviklingsfasen. Det endelige produkt forventes at være plug and play uden behov for Wifi.



Figur 8.1.6 Web-interface til styring og monitorering.

8.1.3 Test af prototype 1

Den første prototype der blev bygget virkede mere eller mindre fejlfrit under normale forhold. Dog var bekymringen, at svejsningsprocessen ville indeholde støj i det ultrasoniske spektrum, som kunne påvirke afstandsmålingerne, og der dermed opstod risiko for at kompromittere arbejdsmiljøet.

Prototypen blev testet med både CO₂-svejsning og skæring med vinkelsliber. I begge tilfælde blev målingerne voldsomt irregulære, men gik trods alt igennem. Det blev bemærket, at den ultrasoniske støj ofte blev registreret af modtagersensoren før det ultrasoniske burst nåede frem, hvilket resulterede i fejlmålinger der var tilfældige, men altid for korte. Det blev også bemærket at selvom der var mange fejlmålinger var der også gode målinger indimellem.

8.1.4 Delkonklusion

Måleprincippet som prototype 1 bygger på, er blevet testet og virker efter hensigten ved processer som ikke udsender støj i det ultrasoniske spektrum. Ved processer som producerer ultrasonisk støj, såsom metalbearbejdning og svejsning, er ultrasonisk afstandsmåling praktisk set ikke velegnet og et andet måleprincip bør anvendes.

8.2 Prototype 2

Prototype 2 er en videreudvikling af akustiske måleprincip, men er i modsætning til den første prototype udviklet specifikt til støjende processer, som eksempelvis CO₂-svejsning.

Ved denne prototype bruges processens egen støj som transmissionssignal. Der er placeret en mikrofon tæt på støjekilden, f.eks. i håndtaget af en svejsepistol, og der er desuden placeret én eller flere mikrofoner på punktudsugget, f.eks. på sugehoven.

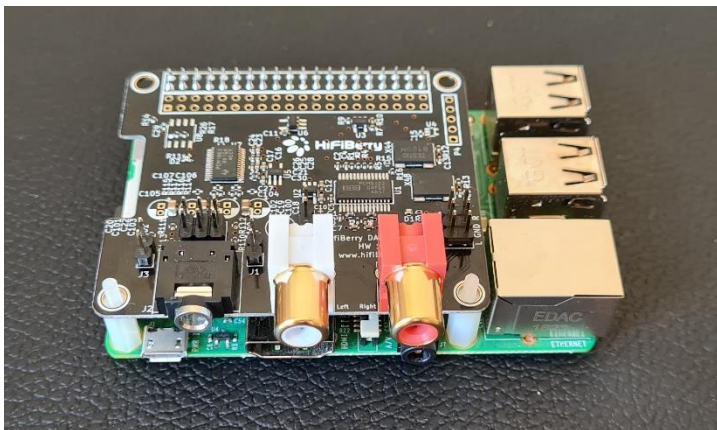
Når processen startes, udsendes kontinuerligt et akustisk signal som først opfanges af mikrofonen tæt på processen og derefter, - med kort tidsforsinkelse, af mikrofonerne på sugehoven. Afstanden mellem de to mikrofoner kan beregnes med formlen.

$$d = v * \Delta t$$

hvor d er afstanden, v er lydens hastighed i luft og Δt er tidsforskellen mellem det afsendte og modtaget signal.

8.2.1 Hardware

På grund af kravene til lydoptagelse og realtid signalbehandling, er der valgt en Raspberry Pi 4 med et "hifiberry dac+ adc pro" lydkort. Lydkortet har en samplingsfrekvens på op til 384.000 Hz.



Figur 8.2.1 Raspberry pi med hifiberry dac+ adc pro.

Mikrofonerne er et par generiske elektret mikrofonkapsler.



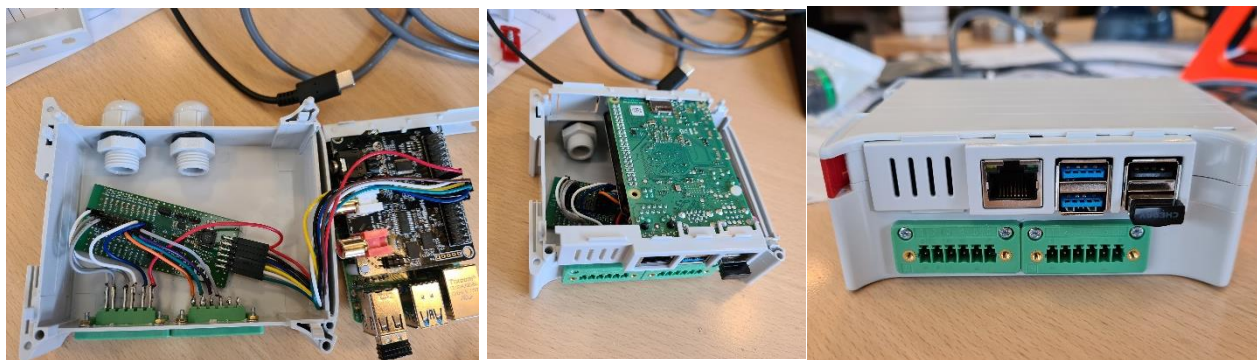
Figur 8.2.2 Elektret mikrofonkapsel.

Til analogt input og output blev der valgt et max1300PMB1 udviklingskort.



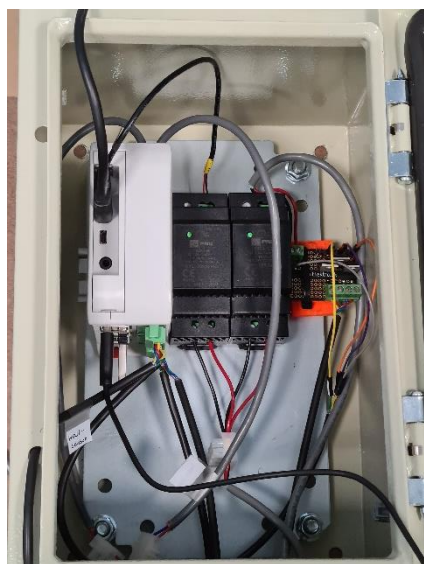
Figur 8.2.3 MAX1300PMB1 udviklingskort.

Kortet har 20 programmerbare 12 bit kanaler med 0-10 V analoge input eller output. Kortet blev tilsluttet til Raspberry'en over en SPI-bus og et driverbibliotek blev skrevet fra bunden af i Python.



Figur 8.2.4 Elektronikhus til Raspberry Pi DIN-skinne montering.

Hardwaren blev samlet i et elektronikhus til DIN-skinne montering og efterfølgende monteret i et elektriskskab.



Figur 8.2.5 Elektriskskab til vægmontering.

8.2.2 Signalbehandling

Da der ønskes at måle ind i det ultrasoniske spektrum, blev samplingsfrekvensen sat til 384.000 Hz, som er det hurtigste lydkortet kan sample. Lyden fra processen optages kontinuerligt og der er derfor behov for løbende signalanalyse for at beregne tidsforskellen og dermed afstanden.

8.2.2.1 Krydskorrelation

Lydsignalet splittes og signalbehandles i blokke i realtid. Antallet af samples i en blok N beregnes ud fra samplingsfrekvensen f_s og optagetiden d . Der er i nedenstående beregning brugt en optagetid på 0,15 sekunder, hvilket gav det bedste resultat i praksis. En kortere optagetid giver mere usikre målinger men hurtigere responstid, mens en længere optagetid giver mere præcise målinger, men længere responstid.

$$N = f_s \cdot d = 384.000 \text{ Hz} \cdot 0,15 \text{ s} = 57.600 \text{ samples}$$

I modsætning til prototype 1, hvor tidsforsinkelsen måles direkte, er der her behov for at finde korrelationen mellem to datasæt. Den matematiske metode er kendt som krydskorrelation.

$$\begin{aligned}
 w(t) = u(t) \otimes v(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} u^*(\tau)v(\tau+t)d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} u^*(\tau-t)v(\tau)d\tau
 \end{aligned}$$

Denne metode er imidlertid meget regneintensiv ved store datasæt, da hele datasættet skal regnes igennem for hvert τ , som i vores tilfælde er 0 til N samples. En dataserie på 57.600 samples, resulterer i en beregningstid på adskillige sekunder med vores Raspberry Pi 4, - altså meget langsommere end realtid, som der er behov for.

Beregningstiden kan reduceres betydeligt ved at gøre brug af krydskorrelationsteoremet som siger:

$$\begin{aligned}
 R_{fg}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} F^*(\nu)e^{2\pi i\nu t}d\nu \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu')e^{-2\pi i\nu'(t+\tau)}d\nu' \right] dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F^*(\nu)G(\nu')e^{-2\pi it(\nu'-\nu)}e^{-2\pi i\nu'\tau} dt d\nu d\nu' \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F^*(\nu)G(\nu')e^{-2\pi i\nu'\tau} \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi it(\nu'-\nu)} dt \right] d\nu d\nu' \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F^*(\nu)G(\nu')e^{-2\pi i\nu'\tau} \delta(\nu'-\nu) d\nu' d\nu \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} F^*(\nu)G(\nu)e^{-2\pi i\nu\tau} d\nu \\
 &= \mathcal{F}^{-1}[F^*(\nu)G(\nu)]
 \end{aligned}$$

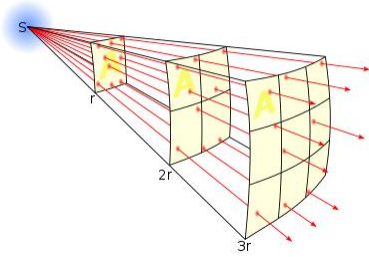
$$u(t) \otimes v(t) = \mathcal{F}^{-1}[\bar{U}(\nu)V(\nu)]$$

hvor \mathcal{F} repræsenterer fouriertransformation og \bar{U} er den kompleks konjugerede af U .

Ved først at fouriertransformere datasættet til frekvensdomænet, udføre beregningerne, og herefter transformere tilbage til tidsdomænet, kan vi slippe for at have τ med i beregningerne. Ved store datasæt betyder dette en drastisk reduceret beregningstid. Med en dataserie på 57.600 samples fås en beregningstid på under 0,1 sekund på en Raspberry Pi 4, altså hurtigere end realtiden som er 0,15 sekund.

8.2.2.2 Normalisering

I og med at de to mikrofoner er placeret i forskellig afstand fra lydkilden (processen) vil lydtryksniveauet på de to optagelser være forskelligt. Mikrofonen som sidder på svejsepistolen, vil mere eller mindre altid opleve det samme lydtryk, hvorimod mikrofonen som sidder på sugeloven, vil opleve et lydtryk som aftager som funktion af afstanden til lydkilden. Lydtryksniveauet vil falde med 6 dB når afstanden fordobles. Dette er kendt som afstandskvadratloven.



Figur 8.2.6 Afstandskvadratloven¹.

Før krydskorrelationen mellem de to datasæt kan beregnes, er der derfor behov for at de normaliseres til samme niveau.

8.2.2.3 Pearson's korrelationskoefficient

For at normalisere outputtet af krydskorrelationen til at ligge mellem -1 og 1, er der behov for at beregne Pearson's korrelationskoefficient.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\mathbb{E}[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

where:

- σ_Y and σ_X are defined as above
- μ_X is the mean of X
- μ_Y is the mean of Y
- \mathbb{E} is the expectation.

Figur 8.2.7 Standard formulering af Pearson's korrelations koefficient².

For et afgrænset datasæt kan dette skrives som:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

hvor n er datasættets størrelse, x_i og y_i er de individuelle samplepunkter med index'et i mens \bar{x} , \bar{y} er middelværdier for hhv. x og y .

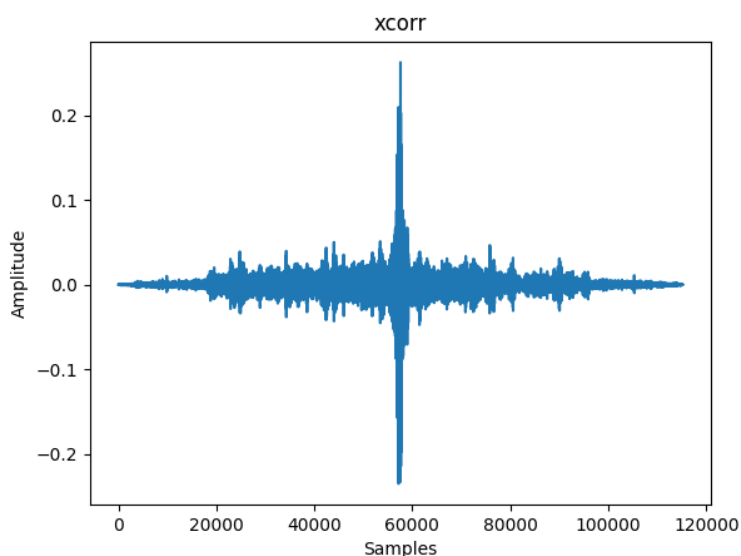
Ovenstående formel bruges til at normalisere de to datasæt inden krydskorrelationen beregnes.

8.2.2.4 Tidsforsinkelse

Ved beregning af den normaliserede krydskorrelation fås en korrelationsværdi mellem -1 og 1 for alle samplepunkter i de to lydsamples. Det betyder, at det resulterende datasæt er dobbelt så langt som en enkelt lyd-sample.

¹ Fra wikipedia.

² Fra Wikipedia.



Figur 8.2.8 Output fra krydskorrelationsfunktionen.

Når krydskorrelationen er beregnet, kan tidsforsinkelsen mellem de to mikrofoner beregnes ud fra nedenstående formel. Resultatet er forsinkelsen mellem de to signaler i antal samples.

$$\Delta s = \frac{|A|}{2} - \operatorname{argmax}_i(A_i)$$

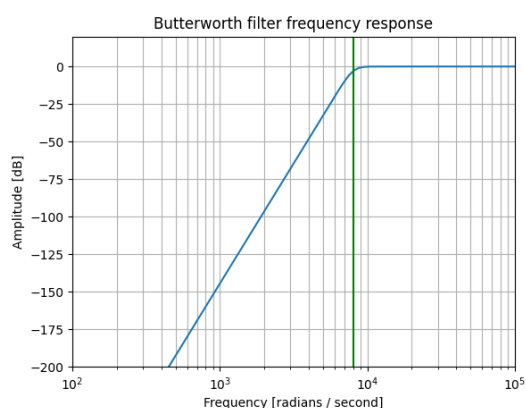
hvor Δs er forsinkelsen i antal samples, A er datasættet indeholdende korrelationsværdierne og i er index'et for A . $|A|$ er antallet af samplepunkter i A . $\operatorname{argmax}_i(A_i)$ er det samplepunkt med den højeste korrelationsværdi i datasættet. Afstanden mellem de to mikrofoner kan herefter beregnes med følgende formel:

$$d = \frac{\Delta s}{f_s} \cdot c$$

hvor d er afstanden, Δs er forsinkelsen i antal samples, f_s er samplingsfrekvensen og c er lydens hastighed.

8.2.2.5 Højpasfilter

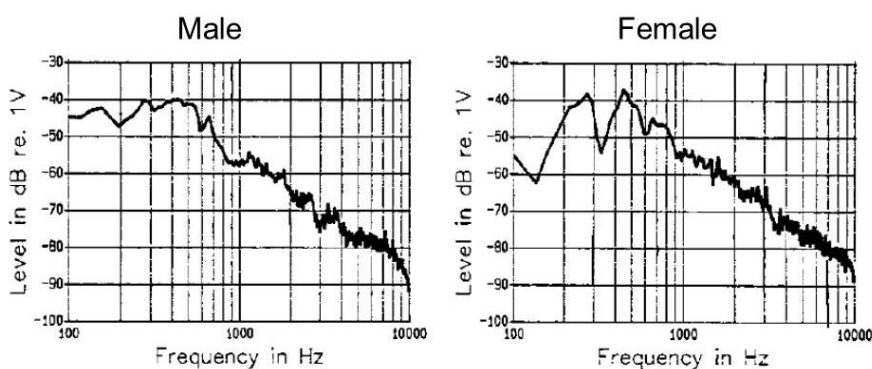
Et 8. ordens højpasfilter blev brugt fra 8 kHz for at frasortere ambient støj så som maskinstøj og konversationer. Filteret viste sig at være særdeles effektiv til filtrering af ambient støj. Filterresponsen er vist nedenfor.



Figur 8.2.9 8. ordens højpasfilter med afskæringsfrekvens på 8 kHz.

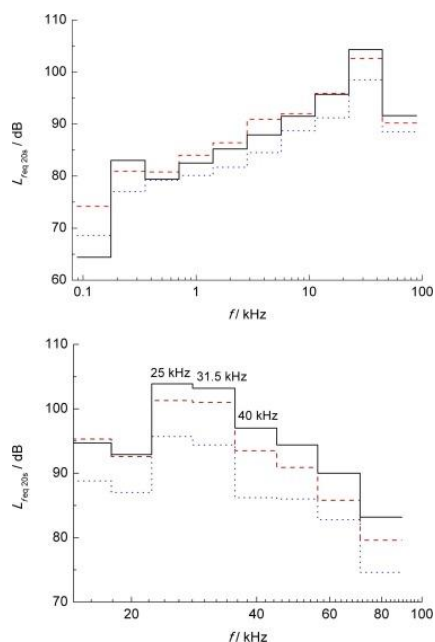
8 kHz blev brugt som afskæringsfrekvens, da dette praktisk talt er den øvre grænse af den menneskelige stemmes spektrum. CO₂-svejsning derimod udsender størstedel af den akustiske energi i det ultrasoniske spektrum.

Human voice spectrum



Figur 8.2.10 Akustisk spektrum for hhv. mande- og damestemme³.

³ Kilde mangler



Figur 8.2.11 Akustik spektrum for MAG-P svejsning⁴

8.2.2.6 Sortering af afstandsmålinger

Vi er kun interesseret i målinger, der ligger inden for det normale arbejdsområde. Alle målinger der ligger uden for intervallet $[0;100]$ cm sættes til 0. Dette gøres for at reducere antallet af fejlmålinger, som følge af støj fra refleksioner.

8.2.2.7 Medianfilter

Der blev brugt et glidende medianfilter på afstandsmålingerne for at frasortere afvigende målinger, som f.eks. kan opstå som følge af stærke refleksioner fra objekter i nærheden af arbejdszonen. Et medianfilter er det bedst egnede til et hurtigt reagerende system, da god filtrering kan opnås med relativt kort filterlængde i forhold til et glidende gennemsnit.

Det viste sig, at en filterlængde på 5 eller 7 samples afhængig af sampling frekvensen gav det bedste resultat. En filterlængde på 5 samples har en forsinkelse på 3 samples, mens en filterlængde på 7 har en forsinkelse på 4 samples.

Eksempel: med en samplingsfrekvens på 10 Hz og en forsinkelse på 3 samples fås en responstid på

$$t = \frac{s}{f_s} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ s}$$

⁴ Kilde: Piotr Szłapa, Wojciech Marczak: Arc welding noise assessment from the measured ultrasound pressure levels. Part II: Pulsed and double pulsed metal active gas welding

8.2.2.8 Præcision og nøjagtighed

Afstandsmålingerne med prototype 2 har vist sig at være særdeles præcise (mindre end 1 mm), og er dermed i stand til at opnå langt højere præcision end der er behov for. Måleopløsningen er direkte afhængig af samplingsfrekvensen og kan beregnes på følgende måde.

$$l = f_s^{-1} \cdot c = 384000^{-1} \cdot 346 = 0,009 \text{ m} = 0,9 \text{ mm}$$

hvor l er afstanden lyden kan rejse mellem to samplepunkter, f_s er samplingsfrekvensen i Hz og c er lydens hastighed i $\frac{m}{s}$.

Nøjagtigheden af afstandsmålingerne afhænger primært af, hvor nøjagtigt lydens hastighed kan bestemmes. Lydens hastighed i luft er en funktion temperatur og relativ luftfugtighed, hvor temperaturen har langt den største indvirkning.

$$c = 331.4 + (0.606 \cdot T) + (0.0124 \cdot H)^5$$

hvor c er lydens hastighed i $\frac{m}{s}$, T er temperaturen i $^{\circ}C$ og H er relativ luftfugtighed i %.

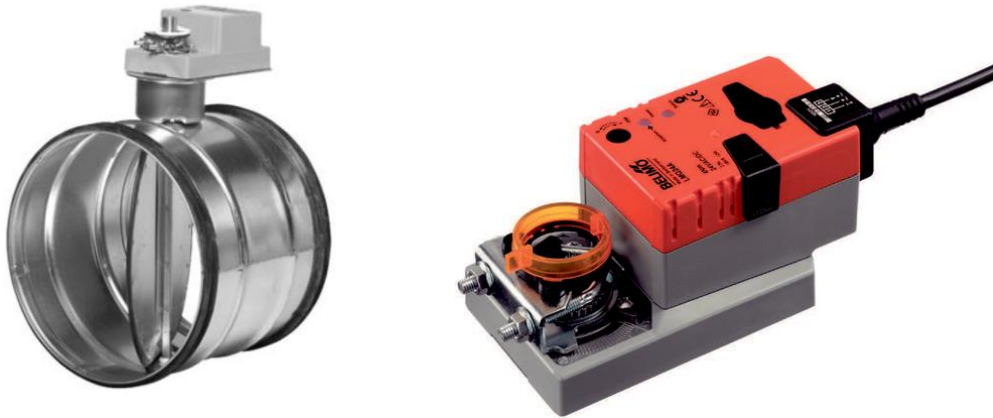
Andre faktorer så som dopplereffekten som følge af lufthastigheden ved indsugningen, har indvirkning på nøjagtigheden, om end betydningen af dopplereffekten er forsvindende lille i dette tilfælde. Der blev foretaget orienterende målinger med hhv. lukket og fuldt åbent spjæld, og det gav ingen målbare forskelle i afstandsmålingerne som følge af dopplereffekten.

Overslagsberegninger viser, at der kun er få procent afvigelse i nøjagtigheden som følge af ovenstående faktorer. Det er derfor blevet besluttet at undlade at tilføje yderligere sensorer for at kunne korrigere for ovenstående faktorer, da det ville resultere i øget pris og kompleksitet med en minimal forbedring i nøjagtigheden af afstandsmålingerne. Når det er sagt er hardwaren i prototype 2 forberedt til tilføjelse af ekstra sensorer, hvis behovet skulle opstå.

8.2.3 Flowregulering

Til regulering af flowet blev der indkøbt et DTFU spjæld fra Lindab. Spjældet er udstyret med en hurtigdrejende Belimo-motor LMQ 24A-SR med en 90° løbetid på 2,5 sekund. Det motoriserede spjæld er designet til aktiv flowregulering i stinkskabe, hvor der er behov for meget hurtig reaktionstid.

⁵ Kilde mangler: <https://ogbugbu-sofwares.com.ng/ultrasonic-range-finder-with-16x2-lcd-using-arduino/#Related>



8.2.4 Flowmåling

Flowmålingerne blev foretaget ved at måletrykdifferensen over en Ø160 målebøjning. Flowet beregnes efter følgende formel.

$$\dot{V} = 75,086 \cdot \Delta p^{0,463}$$



Figur 8.2.12 JMBU160 målebøjning.

Trykdifferensen blev målt med en SDP816 fra Sensirion.



Figur 8.2.13 Sensirion SDP816 – 500 Pa.

8.2.5 Styringsstrategi

Den overordnede styringsstrategi består af fem hovedelementer:

- Beregning af flowsetpunkt
- Flowkurve
- PID-controller

- Glidende gennemsnitsfilter
- Logik

I dette afsnit forklares disse fem punkter.

8.2.5.1 Beregning af flowsetpunkt

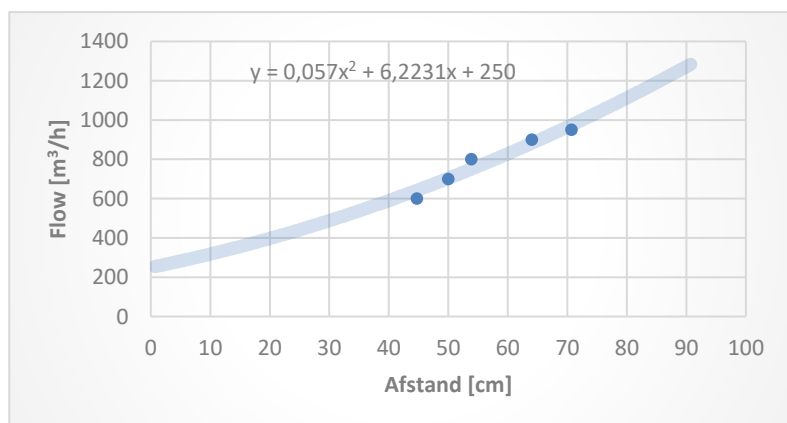
Til beregning af flowsetpunktet, er der behov for en funktion med afstanden som input og det ønskede flow som output. Det er afgørende at det beregnede flowsetpunkt til en hver tid er sikkerhedsmæssigt forsvarligt.

Ud fra forsøgsresultaterne med sporgas, er der lavet en anden ordens polynomisk regression af flowet som funktion af afstanden. Da systemet kun beregner afstanden mellem processen og sugehoven, og derfor ikke kan identificere afstanden til bordet, udvælges punkter efter "worst case" princippet. Dermed prioriteres sikkerheden højest, mens energibesparelser kommer i anden række.

		Målinger med traktposition på skrå = 45° - Præsentation af ugeeffektivitet i % baseret på de udførte lattergas målinger i PPM & Korrektion af 100% værdier																						
Volumenstrøm (m ³ /h)	0/0	20/20	20/30	20/40	20/50	0/0	0/0	30/20	30/30	30/40	30/50	0/0	0/0	40/20	40/30	40/40	40/50	0/0	0/0	50/20	50/30	50/40	50/50	0/0
400	106,9	103,3	102,8	99,9	95,9	97,5	122,5	117,5	117,6	115,0	113,3	117,4	116,7	116,0	113,5	64,8	36,5	121,7	121,7	119,3	113,3	46,0	39,2	125,9
Sugeeffektivitet		98,4%	99,7%	98,7%	96,5%			96,8%	97,6%	96,2%	95,6%			98,5%	95,6%	54,1%	30,2%			97,3%	91,8%	77,0%	52,7%	
500	120,7	112,7	111,1	106,4	88,0	98,1	121,9	116,4	116,1	98,6	96,5	118,3	143,6	137,1	132,7	111,6	85,3	146,4	146,4	141,0	139,5	93,7	84,9	145,0
Sugeeffektivitet		97,0%	99,5%	99,3%	85,7%			96,0%	96,3%	82,3%	81,1%			95,1%	91,7%	76,8%	58,5%			96,5%	95,7%	64,4%	58,5%	
600	151,9	149,8	149,6	149,1	145,8	156,3	146,4	144,1	142,5	141,6	111,5	148,4	148,4	142,8	129,2	117,6	116,2	156,1	145,7	142,8	147,2	141,1	140,4	156,5
Sugeeffektivitet		98,0%	97,3%	96,4%	93,8%			98,2%	96,8%	95,9%	75,3%			95,2%	85,3%	76,8%	75,2%			96,6%	98,1%	92,7%	91,0%	
700	133,0	132,7	132,4	132,0	127,8	136,2	136,0	134,6	138,4	139,8	133,7	135,6	135,3	130,5	131,6	131,5	130,6	132,2	132,0	130,7	131,6	130,2	128,7	132,5
Sugeeffektivitet		99,3%	98,6%	97,9%	94,3%			99,0%	101,9%	103,0%	98,6%			96,9%	98,1%	98,5%	98,3%			98,9%	99,5%	98,4%	97,2%	
800	118,6	119,7	119,1	122,3	125,0	128,2	128,7	123,9	125,2	126,3	125,8	127,8	127,1	122,2	121,1	123,8	127,4	129,3	128,0	122,4	123,8	123,7	121,1	127,4
Sugeeffektivitet		99,3%	97,3%	98,3%	99,0%			96,4%	97,6%	98,5%	98,3%			95,8%	94,6%	96,4%	98,8%			95,7%	96,9%	96,9%	94,9%	
934	142,3	139,7	142,9	141,9	141,3	145,2	145,0	141,8	141,1	140,6	139,8	144,5	144,5	139,7	139,6	138,3	138,4	142,5	141,6	140,0	138,3	137,7	136,9	141,3
Sugeeffektivitet		97,7%	99,6%	98,5%	97,7%			97,8%	97,4%	97,2%	96,7%			96,9%	97,1%	96,5%	96,8%			98,9%	97,8%	97,4%	96,9%	

Værdien fx 20/30 betyder henholdsvis 20 cm lodret over sporgaskilde og 30 cm vandret væk fra sporgaskilde. Det giver en direkte afstand på 36 cm

Nedenfor ses den resulterende kurve som flowet styres efter. Skæringen i 250 ved en afstand på 0 cm er valgt for at sikre at spjældet til en hver tid vil være tilstrækkeligt åbent.

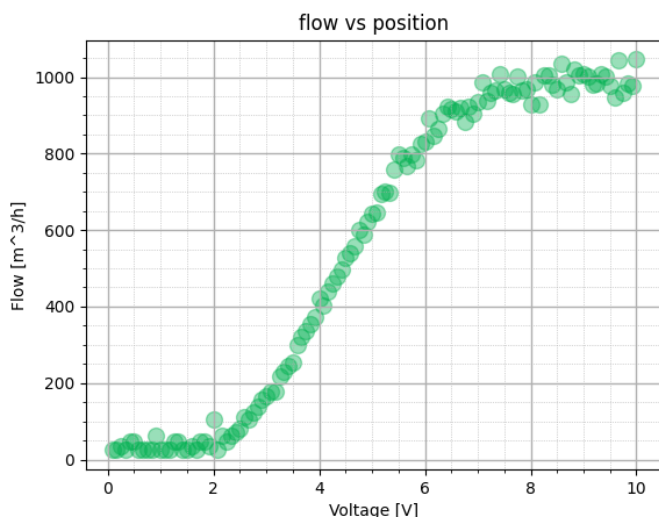


Figur 8.2.14 Regression på data fra sporgasforsøg.

Orienterende røgforsøg har verificeret at flowstyringen virker efter hensigten og systemet er sikkerhedsmæssigt forsvarligt at benytte op til ca. 70 cm (ved et maks. flow på $1000 \frac{m^3}{h}$).

8.2.6 Flowkurve

Det er vigtigt, at spjældet hurtigt indstiller sig i den rigtige position ved det ønskede flow. Derfor køres en test af systemet første gang det tændes for at producere en flowkurve, se nedenstående figur. Flowkurven benyttes til at foretage et hurtigt "første gæt" på hvad spjældpositionen skal være fremadrettet for at opnå det ønskede flow.



Figur 8.2.15 Flow vs. spjældposition.

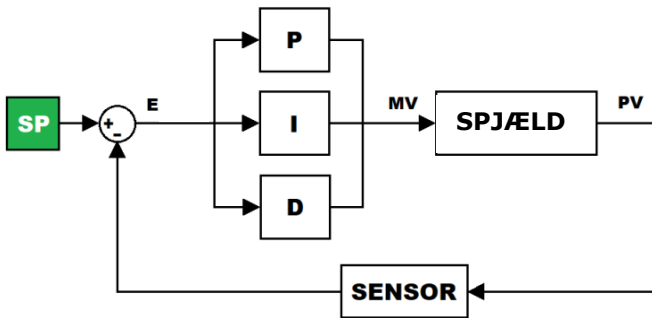
Efterfølgende laves en 5. ordens polynomisk regression, for at få et matematisk udtryk der kan bruges i programmet. Hele processen er automatiseret i et script, som skal køres inden systemet tages i brug. Ændres undertrykket i udsugningskanalen væsentligt, bør scriptet køres igen.

8.2.7 PID-regulator

Hvis forholdene i ventilationssystemet ændrer sig, efter flowkurven er lavet, introduceres en fejl i flowreguleringen. Derfor er der sat en PID-controller på for at kompensere for de eventuelle fejl der introduceres. Styresignalet til det motoriserede spjæld beregnes ud fra nedenstående formel.

$$U = f(q) + MV$$

hvor U er spændingen på styresignalet til spjældmotoren. $f(q)$ er funktionen for styrekurven (se afsnit **Error! Reference source not found.**) og q er flowet i $\frac{m^3}{h}$. MV (manipulated value) er o utputtet fra PID-controlleren.



Figur 8.2.16 PID-controller.

PV (process value) er det målte flow i $\frac{m^3}{h}$. SP (setpoint) er flowet i $\frac{m^3}{h}$ beregnet ud fra styrekurven. E (error) er differensen mellem SP og PV.

Efter indregulering af systemet, endte vi med nedenstående PID-parametre.

- P = 0.0005
- I = 0.00002
- D = 0

8.2.8 Dynamisk Glidende gennemsnitsfilter

For sikre at der til en hver tid er tilstrækkeligt med udsugning uanset svejseretningen, er der indprogrammeret et dynamisk glidende gennemsnitsfilter. Med ordet dynamisk menes, at længden af filteret varierer. Filteret virker på følgende måde:

- Længden af filterlisten starter på 0. En maks. filterlængde defineres, eksempelvis 45 samples.
- Så snart der svejses, tilføjes afstandsmålingerne til filterlisten op til den definerede filterlængde. Herefter virker filteret som et almindeligt glidende gennemsnit.
- Hvis der svejses væk fra sugehoven, omgås filteret for at systemet reagerer hurtigst muligt.
- Hvis der svejses hen mod sugehoven, bruges outputtet fra filteret. Resultatet er en forsinkelse i nedreguleringen af flowet.
- Hvis der stoppes med at svejse, reduceres længden af filterlisten i stedet for at fylde 0'er ind. Resultatet er at gennemsnittet forbliver mere eller mindre konstant indtil længden af filterlisten når 0.

8.2.9 Styrelogik

Der er indprogrammeret en del logik i Raspberry Pi'en.

- Når systemet startes, sættes spjældpositionen til 2 V (på kanten til at være åben).
- Så snart der er signal fra hall-effekt sensor eller start kontakt (svejsning påbegyndes), sættes spjældpositionen til 10 V (100% åben). Dette gøres for at minimere responstiden, da afstandsmålingerne ellers først skal igennem medianfilteret.
- Hvis afstanden er inden for det definerede arbejdsområde, sættes flowet til det beregnede sætpunkt.
- Når der er beregnet et nyt sætpunkt, opdateres spjældpositionen og overskriver dermed inputtet fra hall-effekt sensoren eller startkontakten. Dette bevirker at hvis eksempelvis en mikrofon sætter ud af drift, vil systemet skrue udsugningen

op på 100% når der svejses og det vil stadigvæk være sikkerhedsmæssigt forsvarligt.

8.2.10 Efterløb

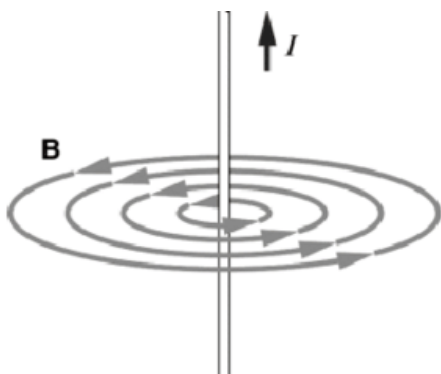
Efter forsøg hos Novenco blev det klart at der var behov for at kunne sætte et langt efterløb. Når signalet fra Hall-effekt sensoren forsvinder, startes en timer på den ønskede efterløbstid. Den sidste brugte spjældindstilling anvendes i efterløbstiden for at sikre at alle gasser bortsuges, dvs. at flowet forbliver konstant indtil timeren løber ud. Startes svejsningen igen inden timeren er udløbet, beregnes nye setpunkter som normalt.

8.2.11 Hall-effekt sensor

Da vi ønsker at udsugningen kun aktivere når der svejses, er der monteret en Hall-effekt, der måler det magnetiske felt der induceres omkring kablerne ved svejsestationen. En Hall-effekt sensor er en sensor der kan måle magnetisk feltstyrke. Fordelen ved at bruge en Hall-effekt sensor er at den kan påføres eksternt på et kabel uden behov for indgriben i svejseapparatet. Det er derfor nemt at retrofitte allerede eksisterende svejsestationer. Der blev valgt en SS496A1 Hall-effekt sensor, se *Figur* nedenstående billede.



Figur 8.2.17 SS496A1 Hall-effekt sensor.



Figur 8.2.18 Illustration af det magnetiske felt B , der induceres i en ledning når der løber en strøm I .

Magnetfeltet omkring en strømførende ledning kan beregnes med følgende formel.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

hvor B er magnetfeltstyrken, μ_0 er den magnetiske permeabilitet i vakuum, I er strømmen og r er afstanden fra ledningens centrum.

Ved $I = 100\text{ A}$ og $r = 8\text{ mm}$ fås

$$B = \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot 0,008} = 3 \cdot 10^{-3}\text{ T}$$

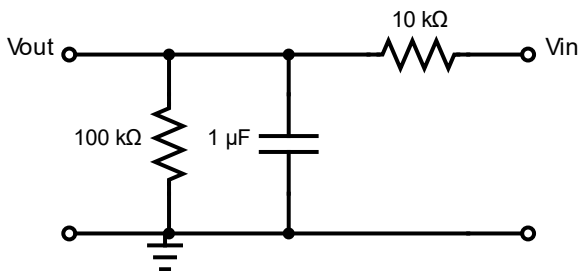
Hall-effekt sensoren har en følsomhed på $S = 3,125 \frac{\text{mV}}{\text{gauss}}$. Hvor $1\text{ gauss} = 10^{-4}\text{ T}$. Sensoroutputtet kan nu beregnes.

$$U = S \cdot B = 3,125 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,078\text{ V} = 78\text{ mV}$$

Vi kan altså forvente et sensoroutput på 78 mV når der svejses med 100 A .

Hall-effekt sensoren blev placeret vinkelret på stekablet. Under svejsning blev der observeret et spændingsudslag på ca. 70 mV over baseline. Systemet har en 12 bit ADC og ved en range fra 0 til $2,5\text{ v}$ er præcisionen $\frac{2,5}{2^{12}} = \frac{2,5}{4096} = 61 \cdot 10^{-5}\text{ V} = 0,61\text{ mV}$. Med andre ord er 70 mV rigeligt til detektering af start.

Der blev sat et RC filter på for at udglatte signalet fra Hall-effekt sensoren, se figur 8.2.19.



Figur 8.2.19 RC filter til Hall-effekt sensor.

Filteret har en afskæringsfrekvens på 20 Hz og en tidskonstant på ca. 18 ms . Filteret blev testet og virkede efter hensigten. Hvis elektrisk støj skulle vise sig at blive et problem, kan de to modstande øges med en faktor 2 eller 3. Dette vil bevirke at Hall-effekt sensoren reagerer langsommere, men er mindre modtagelig for overfor støj.



Figur 8.2.20 RC filter til Hall-effekt sensor.

8.2.12 Indikationslamper

Der blev monteret indikationslamper på sugehoven for at give brugeren feedback omkring driften af systemet. De tre lamper viser om brugeren har placeret sugehoven tæt på forureningskilden (grøn lampe), indenfor sugeafstand af sugehoven (hvid lampe) eller udenfor sugehovens rækkevidde (rød lampe).

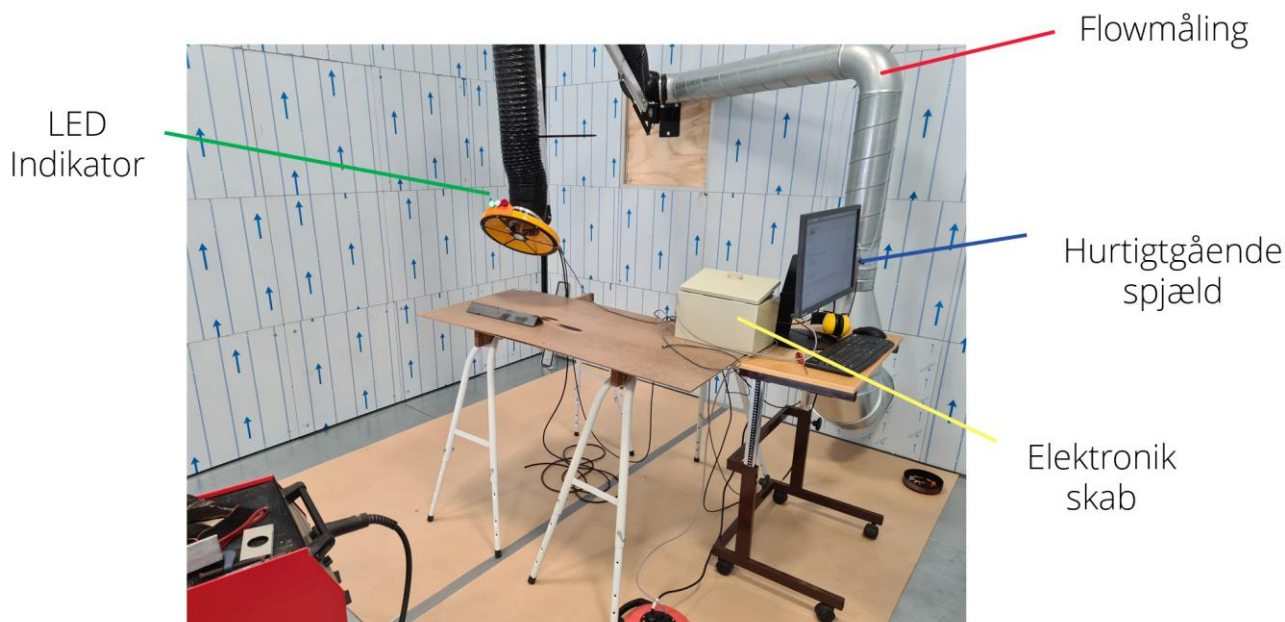
- **Grøn:** Indikerer at der i øjeblikket opnås en betydelig besparelse på energiforbruget. Den grønne lampe vil lyse så længe flowet er mellem 0 og 50% af det maksimale flow. En ventilators energiforbrug stiger med flowet i tredje potens, således vil en halvering af flowet reducere effektforbruget til $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^3 = \left(\frac{0,5}{1}\right)^3 = 0,125 = 12,5\%$.
- **Hvid:** Indikerer at flowet ligger mellem 50 og 100% - nominel drift.
- **Rød:** Indikerer at systemet forsøger at regulere flowet op over 100% (hvilket selvfølgelig ikke er muligt), - det er derfor ikke sikkerhedsmæssigt forsvarligt at svejse.



Figur 8.2.21 Indikationslamper monteret på Geovent sugearm.

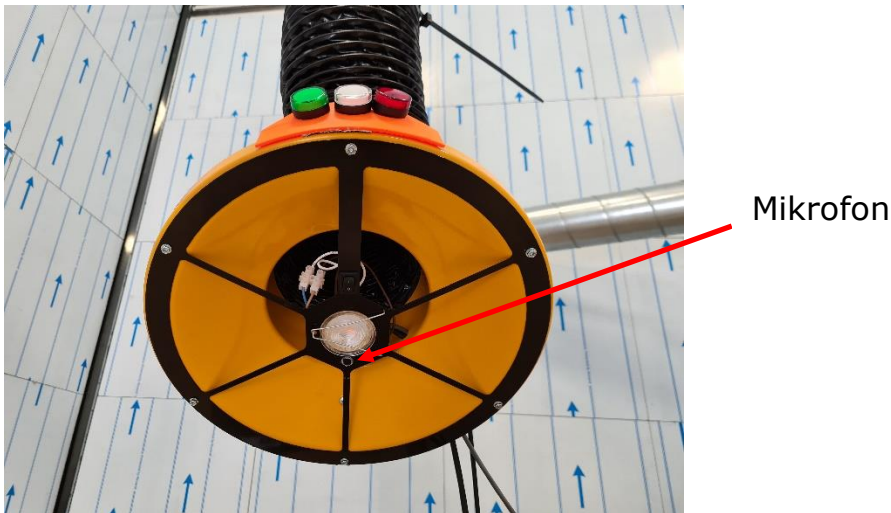
8.3 Forsøg i Teknologisk Instituts indeklimalaboratorium

En forsøgsopstilling blev bygget i TI's nye indeklimalaboratorium. Opstillingen blev brugt løbende til test under udviklingsfasen.



Figur 8.3.1 Forsøgsopstilling i TI's indeklimalaboratorium.

Den ene mikrofon blev monteret oppe i selve sugehoven ved siden af sugehovens lysarmatur for at få et godt sted at montere mikrofonen under forsøgene.



Mikrofon

Figur 8.3.2 Mikrofon monteret ved lysarmatur.

Den anden mikrofon blev monteret med gaffatape på svejsepistolen. Mikrofonen lille nok til kunne gemmes i svejsepistolen i et endeligt produkt.



Figur 8.3.3 Svejseforsøg i Indeklimalab.

8.3.1 Forsøg på Novenco

Novenco er en virksomhed som laver ventilatorer til både industriel brug (blæsere) og til indbygning i ventilationsanlæg. I forbindelse med produktion af nogle af blæserne bliver såvel blæser og blæserhus svejset manuelt sammen ved en svejsestation.



Figur 8.3.4 Opsætning hos Novenco.

Efter opsætning af systemet blev der udført tests af prototypen for den adaptive udsugningsarm, mens der blev svejst på et blæserhus. Det blev dog hurtigt bemærket at sugehoven blev sat langt fra svejseprocessen (ca. 1,5m), hvilket betyder at der svejdes uden for den definerede arbejdszone på 100 cm. Arbejdszonen blev ændret i softwaren for styringen af udsugningen til 185 cm på stedet.



Figur 8.3.5 På billedet ses systemet i aktivt brug. En Novenco medarbejder iført åndeværn er i gang med at svejse på et blæserhus.

Til svejsning af store blæserhuse er der behov for at have sugehoven meget langt væk fra svejseprocessen og der bruges derfor åndeværn af hensyn til sikkerheden. Dette betyder også at svejseudsugningen fungerer mere som rumventilation mens der arbejdes og der er derfor behov for et efterløb på adskillige minutter.

Dette betyder også at spjældet reelt set vil være fuldt åbent langt størstedelen af tiden og energibesparelser på ventilation vil være negligerbare.

Efter noget tid i operation, stoppede afstandsmåling af ukendte årsager med at virke. Efterfølgende fejlfinding har indikeret at problemet med al sandsynlighed skyldes overophedning, men problemet er endnu ikke definitivt identificeret.

Ved svejsning på indersiden af blæserhuset, blev det observeret at, der i visse tilfælde blev registreret en for lang afstandsmåling som følge af en stærk refleksion fra den konkave side af blæserhuset

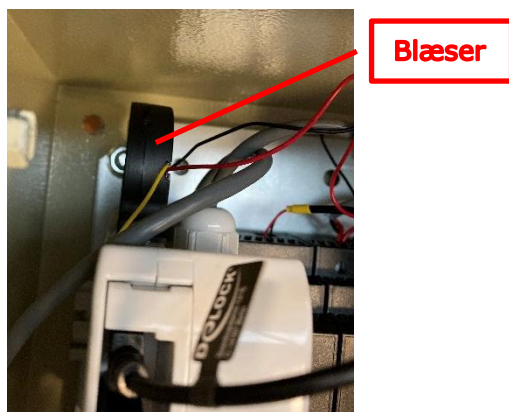
8.3.2 Modifikationer efter forsøg hos Novenco

Hos Novenco skiftes der ofte mellem CO₂-svejsning og TIG (Argon) svejsning. Da systemet udviklet i dette projekt er udviklet specifikt til CO₂-svejsning, var der behov for at kunne omgå styringen på motorspjældet. Derfor blev der monteret en vippekontakt i frontpanelet, så operatøren har mulighed for at sætte spjældet manuelt til 100% åbent.



Figur 8.3.6 Vippekontakt til overstyring af spjæld.

For at undgå overophedning af elektronikken i elskabet blev der ligeledes monteret en lille centrifugalblæser på elektronikhuset.



Figur 8.3.7 Blæser til køling af elektronikken.

8.4 Andre projekter

8.4.1 Energieffektiv adaptiv procesudsugning

Der er i 2017 udført et EUDP projekt (Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram) med titlen: "Energieffektiv adaptiv procesudsugning". Projektet havde journalnr. 64011 – 0367. Ideen med projektet var gøre punktudsug bevægelige ved brug af automatik- og robotteknologi, og med en styring og sorteknik (også benævnt sensorik) med indbygget adaptiv intelligens, så punktudsug bliver bevægelig i sig selv og automatisk kan følge bearbejdningsarbejdet og den deraf genererede forureningskilde. Ved at holde en mere konstant og kort sug afstand til

forureningskilden kan luftmængden nedsættes samtidig med at udsugningseffektiviteten bevares. Gevinsten for brugeren (svejseren) ville kunne have en mere effektiv produktion, bedre beskyttelse, mindre støj, og en øget betjeningskomfort, idet robotten skulle flytte udsugningsarmen automatisk. Dernæst ville der være et økonomisk incitament for virksomhedsejeren, idet det blev vurderet, at luftmængden kunne sænkes, hvilket ville betyde mindre energiforbrug på udsugningsventilatoren, mindre filtre, samt mindre forbrug på den samlede opvarmningsomkostning

Ved at automatisere placeringen af punktudsugningen i procesforløbet vil det være muligt at reducere energiforbruget, idet:

- Der skal anvendes mindre energi til bortsugning af forurenede luft pga. den reducerede luftmængde
- Der skal indblæses mindre erstatningsluft til lokalet med deraf følgende mindre ventilatorer, aggregater og rørføringer til følge
- Energimængden, der anvendes til opvarmning af erstatningsluften, reduceres.



Udviklingen af selve punktudsugningen tog sit udspring i de nuværende løsninger for mekanisk opbygning og funktion, samt viden, ekspertise og innovation med hensyn til automation og robotteknologi, som findes på Teknologisk Institut.

I projektet blev der udviklet prototype, som kan følge en svejseflamme (lysbue) i to dimensioner (bordets plan) med en konstant afstand på omkring 30 cm fra lysbuen. Prototypen er desværre ikke p.t. ikke robust nok til at kunne sælges som et færdigt kommercielt produkt. Hvis den adaptive procesudsugning skal blive et kommercielt produkt vil det formentlig kræve en mere enkel teknologisk løsning. Der skal også arbejdes mere med styringsalgoritmen der styrer placeringen af udsugningen, så den bliver mere robust. Problemstillingen er lidt den, at robotudsugningen ikke kan "se" svejserens placering i forhold til lysbuen. Herved kommer robotudsugningen i nogle tilfælde lidt for tæt på svejseren.

Projektet var så vidt vides det første af sin art i Danmark, hvor robotteknologi blev kombineret med industriventilation (punkt- eller svejseudsug). Robotudsugningen er efterfølgende blevet installeret på Mercantec svejse-skolen i Viborg i håb om, at der med tiden kommer flere erfaringer, som kan bruges konstruktivt.

Der henvises til rapporten fra EUDP projektet med følgende projekttitel: "Energieffektiv adaptiv procesudsugning", jr.nr. 64011 – 0367.

8.4.2 Større udsug

Der henvises til rapporten "Energioptimering af procesventilation og udvikling af fleksible procesudsug til store industrielle emner" /3/, hvor det på side 38-74 er beskrevet hvordan der udføres beregninger og dimensionering af luftmængder for større procesudsug.

Større procesudsug er i udgangspunktet stationære som følge af størrelse. Der er dog udviklet en række muligheder for at tilpasse / målrette den udsugede luftmængde det aktuelle udsugningsbehov og -sted.

9 Procesventilationsanlæg

9.1 Right sizing

Det ses ofte at der er energiforbedringsmuligheder i forbindelse med selve procesventilationsanlægget, dvs. ventilationsaggregatet. Det skyldes, at ventilationsaggregatets blæsere ikke passer til den fremherskende driftssituation, og derfor driftes med ringe virkningsgrad set i forhold til det mulige. Ventilationsaggregatets blæsere kan enten være dimensioneret uhensigtsmæssigt fra starten eller behovet for udsugning / ventilation kan være ændret over tid.

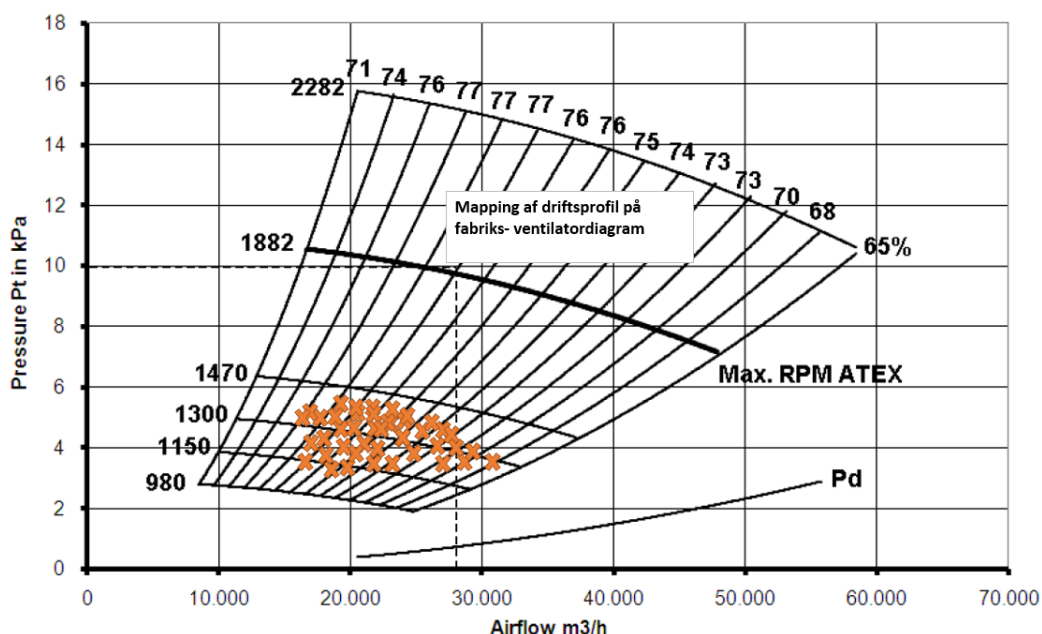
Den nuværende drift kan til dels fastslås ved at foretage målinger af tryk og luftflow over ventilationsaggregatets blæsere i en periode. I afhængighed af periodens længde opnås der indsigt i ventilationsaggregatets faktiske drift, der kan anvendes til at optimere det eksisterende aggregat eller ved dimensionering af et nyt aggregat, hvis der skal foretages en udskiftning.

9.1.1 Right sizing - case

Nedenstående er der vist et diagram med punkter, der indikerer samhörrende målinger af tryk og flow for en blæser, der er installeret i et procesudsugningsaggregat.

Combifab F Fan

F40-S500



Figur 9.1.1 Samhörrende målinger af tryk og flow.

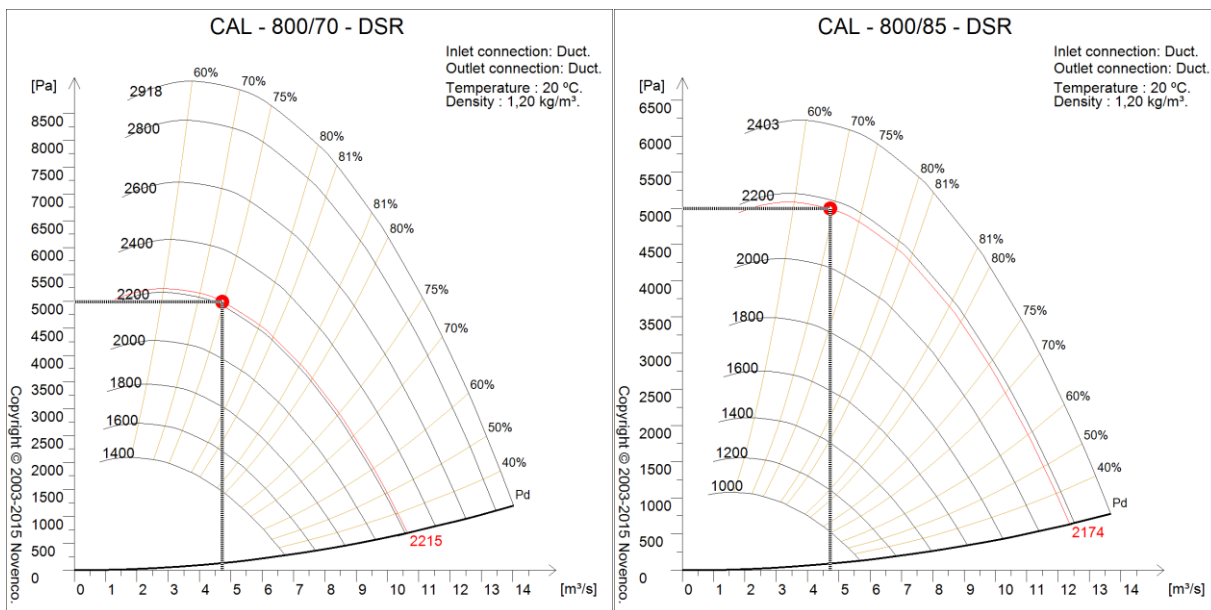
Det ses, at der er relativ stor forskel på behovet for både tryk og flow, idet trykket varierer mellem ca. 3.200-5.500 Pa samtidig med at flowet varierer mellem ca. 16-32.000 m³/h. Det ses

desuden at blæserens virkningsgrad generelt ikke er prangende. Målingerne er udført over ét døgn, hvilket er en relativt kort periode med mindre at der er sikkerhed for at den observerede drift er generelt gældende for aggregatet, dvs. at der f.eks. ikke er variationer over ugen eller året. Med baggrund i de data der er til rådighed kan der opstilles en tabel over de fremherskende, samhörørende værdier for tryk og luftflow, der efterfølgende kan parres med mulige blæsere, der ville kunne sikre en højere gennemsnitlig virkningsgrad set over driftstiden.

Luft-flow	Totaltryk
[m ³ /h]	[Pa]
30.000	3.800
25.000	5.000
20.000	5.500
17.000	5.000
17.000	3.800

Tabel 9.1.1 Værdier for samhörørende målinger af tryk og flow.

De luftflow og tryk der er vist i tabel 9.1.1 kan eksempelvis leveres af de to forskellige blæsere, der er vist nedenstående. Det er samme blæsertype, men med forskellig diameter på blæserhjulet (70 cm; 85 cm).



Figur 9.1.2 NV CAL blæsere med blæserhjul på hhv. 70 cm og 85 cm.

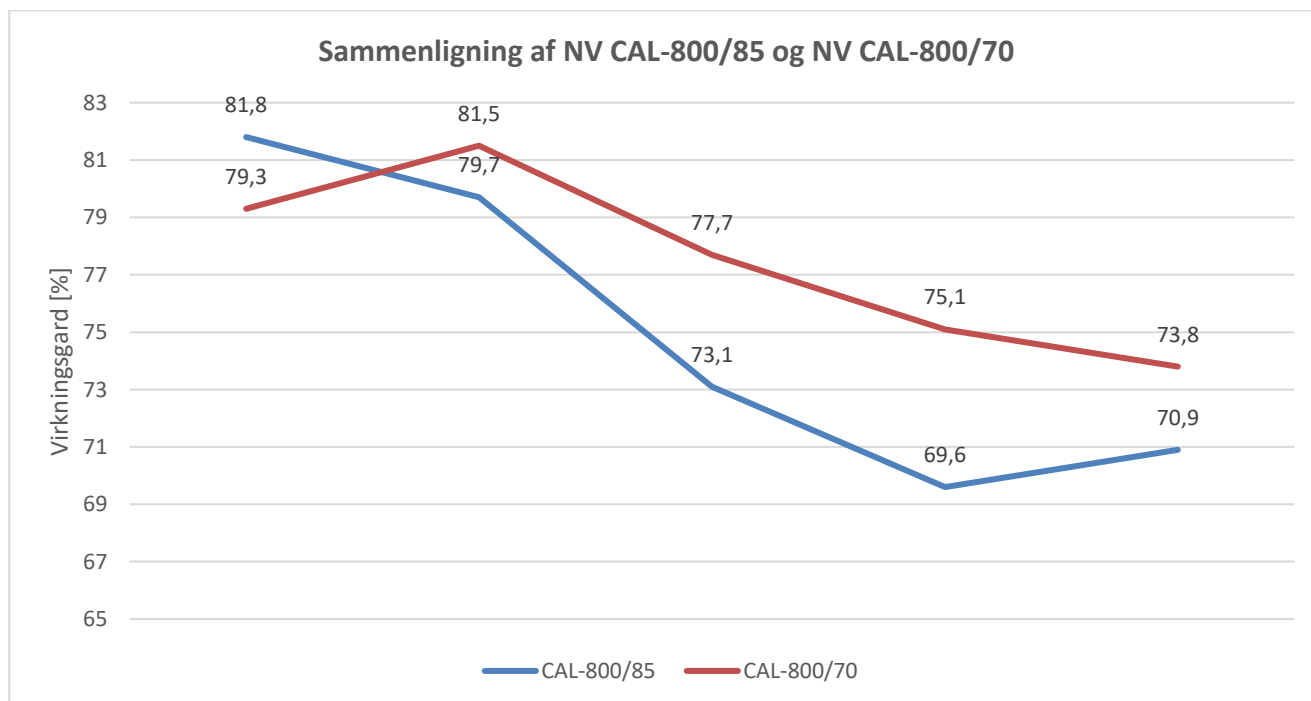
Begge de viste blæsere vil kunne anvendes i det aktuelle tilfælde. De to blæseres virkningsgrad i de driftspunkter der er vist i tabel 9.1.1 er vist nedenstående.

Luftflow	Totaltryk	Akseleffekt	η	Hastighed
m ³ /h	Pa	kW	%	omdr./min.
30.000	3.800	39,93	79,3	2.347
25.000	5.000	42,59	81,5	2.388
20.000	5.500	39,32	77,7	2.360
17.000	5.000	31,44	75,1	2.215
17.000	3.800	24,33	73,8	1.917

Tabel 9.1.2 Værdier for NV CAL-800/70

Luftflow	Totaltryk	Akseleffekt	η	Hastighed
m ³ /h	Pa	kW	%	omdr./min.
30.000	3.800	38,72	81,8	2.182
25.000	5.000	43,58	79,7	2.284
20.000	5.500	41,79	73,1	2.301
17.000	5.000	33,91	69,6	2.174
17.000	3.800	25,32	70,9	1.895

Tabel 9.1.3 Værdier for NV CAL-800/85



Figur 9.1.3 Sammenligning af virkningsgrad for NV CAL-800/70 og NV CAL-800/85.

Det ses, at virkningsgraden for blæseren med 70 cm blæserhjul er bedre end den tilsvarende blæser med 85 cm hjul i alle driftssituationer, undtagen ved drift ved 30.000 m³/h og 3.800 Pa.

Hvis det antages at antallet af driftstimer over tid er jævnt fordelt mellem de fem driftspunkter, der fremgår af tabel 9.1.1, er den gennemsnitlige virkningsgrad af de to blæsere henholdsvis 77,5% (CAL800/70) og 75,0% (CAL800/80). I det aktuelle tilfælde kører udsugningen on-stop hele året, undtagen nogle få nedluk i helligdage. Hvis der regnes med drift i 8.000 timer årligt ville det årlige elforbrug til de to forskellige blæsere være henholdsvis 322,2 MWh og 332,6 MWh, idet der er forudsat en gennemsnitlig virkningsgrad for motor- og frekvensomformer på 90% og 98%. Forskellen i elforbrug på 10,4 MWh årligt repræsenterer en værdi på ca. 8.300 kr.

Den nuværende blæser har i øvrigt en gennemsnitlig virkningsgrad, der er mellem de to forskellige blæsere der er vist ovenstående.

9.2 Udvikling af måleudstyr til procesventilationsanlæg

Som en del af projektet er der udviklet et koncept for måling af samhørende værdier for luftflow, tryk og effektoptag på blæseren(-erne) samt tilhørende datalogning. Formålet med udstyret er at identificere mulige energibesparelser gennem reduktion af luftflow, tryk eller ved at sikre at blæseren driftes i et mere optimalt driftspunkt. Desuden skal data kunne anvendes til fremtidig right sizing af kommende procesventilationsanlæg.

Målekonceptet og udstyret er udviklet med det formål både at kunne indgå som en del af et nyt procesventilationsanlæg (fast indbygget) og at være mobilt udstyr der kan monteres på eksisterende anlæg for at kortlægge effektiviseringsmulighederne.

I de følgende kapitler er der opstillet krav til de sensorer, der skal bruges til måling og overvågning af ventilationssystemets drift.

Den prototype der er opbygget på baggrund af det målekoncept der er beskrevet i det følgende, har været testet hos møbelvirksomheden Tvillum A/S.

9.2.1 Effektmåler

Til måling af effektoptaget skal der opsættes en effektmåler på udsugningsblæseren, som efterfølgende kan benyttes til vurdering af udsugningsblæserens driftsområde. Det vil give mulighed for at følge blæserens tilstand og vise en eventuel tilsmudsning af blæseren.

Der skal kunne måles aktuelt effektoptag, samt samlet energiforbrug for blæseren. Samtidig skal effektmåleren overholde kravene i EN50470 1/3, klasse B.

9.2.2 Trykdifferensmåler

Udviklingen i trykket over udsugningsblæseren er vigtigt for at kunne monitorere ventilationssystemets tilstand, og derfor skal etableres en trykdifferensmåler. Måleområdet og dermed, typen af trykdifferensmåler, skal vælges ud fra det driftsområde procesblæsere almindeligvis operere indenfor. Erfaringen er, at driftsområdet for trykket over en procesblæser (i udsugningskanalen) varierer mellem ca. 3.200 – 5.500 Pa. Det er derfor nødvendigt at trykdifferensmåleren kan håndtere tryk, der er i området op til 5.000-6.000 Pa eller i nogle tilfælde højere. Det er

derfor valgt at trykdifferensmåleren skal have et måleområde på 0 ± 10.000 Pa. De trykdifferensmålere der fås med et måleområde i denne størrelse, har en usikkerhed på $\pm 1-1.5\%$ over det samlede måleområde, hvilket er acceptabelt.

9.2.3 Luftflowmålere

Luftflowet kan beregnes ved enten at måle lufthastigheden og multiplicere med kanal tværsnittet eller ved at sammenholde trykstigningen over blæserne med karakteristikken for blæserne. Ved måling af lufthastigheder i ventilationssystemet kan benyttes forskellige former for måleudstyr. Lufthastigheden kan i udgangspunktet måles med et glødetrådsanemometer. Der er målt kanal hastigheder op til 35 m/s og glødetrådsanemometre kan ikke håndtere sådanne hastigheder. Desuden er glødetrådsanemometre følsomme overfor støv etc. i luften, hvilket der ofte vil være i procesventilationsanlæg. En anden mulighed for lufthastighedsmålinger er brug af pitotrør. Nøjagtigheden vil i de fleste tilfælde være $\pm 1\%$ inden for $\pm 10^\circ$ på flowretningen. Pitotrøret vil, i modsætning til varmetrådsanemometeret, være i stand til at måle i højere lufthastigheder, samt i varmere og mere forurenede luft.

For begge muligheder gælder det, at placeringen i kanalen er afgørende for præcisionen af målingen på grund af luftens flowprofil i kanalen. Det er derfor vigtigt at placeringen af måleinstrument sker med en afstand, der er givet ved minimum 5 gange kanalens diameter fra bøjninger eller andre komponenter, hvilket i praksis ofte er svært. De følgende formler beskriver metoderne til udregning af luftstrømmen ved brug af et pitotrør. Først findes lufthastigheden ved det dynamiske tryk:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot P_d}{\rho}} \quad [m/s]$$

$v =$ middellufthastigheden [m/s]

$P_d =$ dynamisk tryk [Pa]

$\rho =$ luftens densitet [kg/m^3]

Efterfølgende kan luftstrømmen findes ved brug af kanalens tværsnitsareal.

$$q_v = A \cdot v \cdot 3600 \quad [m^3/h]$$

$q_v =$ volumenstrøm [m^3/h]

$A =$ kanalens tværsnitareal [m^2]

$v =$ middellufthastigheden [m/s]

Volumenstrømmen kan om nødvendigt omregnes om til referencetilstanden ved $0^\circ C$ og 101.3 kPa ved brug af nedenstående formel.

$$q_{v_n} = q_v \cdot \frac{293}{273 + t} \cdot \frac{b}{1013}$$

$q_v =$ volumenstrøm [m^3/h]

$q_{v_n} =$ volumenstrøm – referencetilstand [m^3/h]

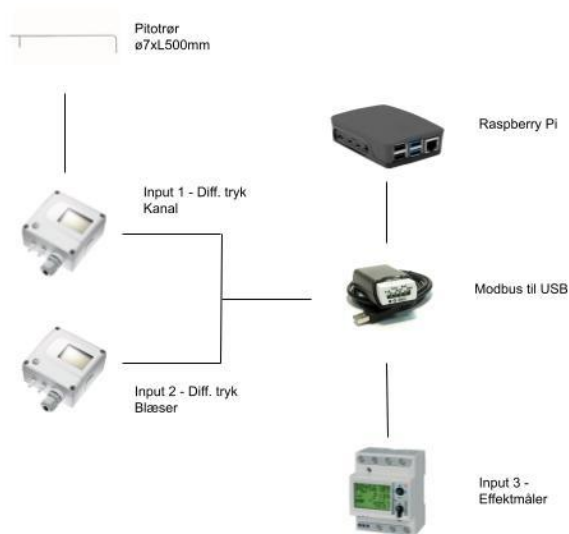
$t = \text{temperatur } [^{\circ}\text{C}]$

$b = \text{barometerstanden } [\text{kPa}]$

9.2.4 Målekoncept

Der er udviklet det målekoncept der er vist med figur 9.2.1 i projektet. På baggrund af det viste målekoncept er der opbygget en prototype, der først har været afprøvet i laboratoriet hos Teknologisk Institut, og sidenhen testet hos en møbelvirksomhed.

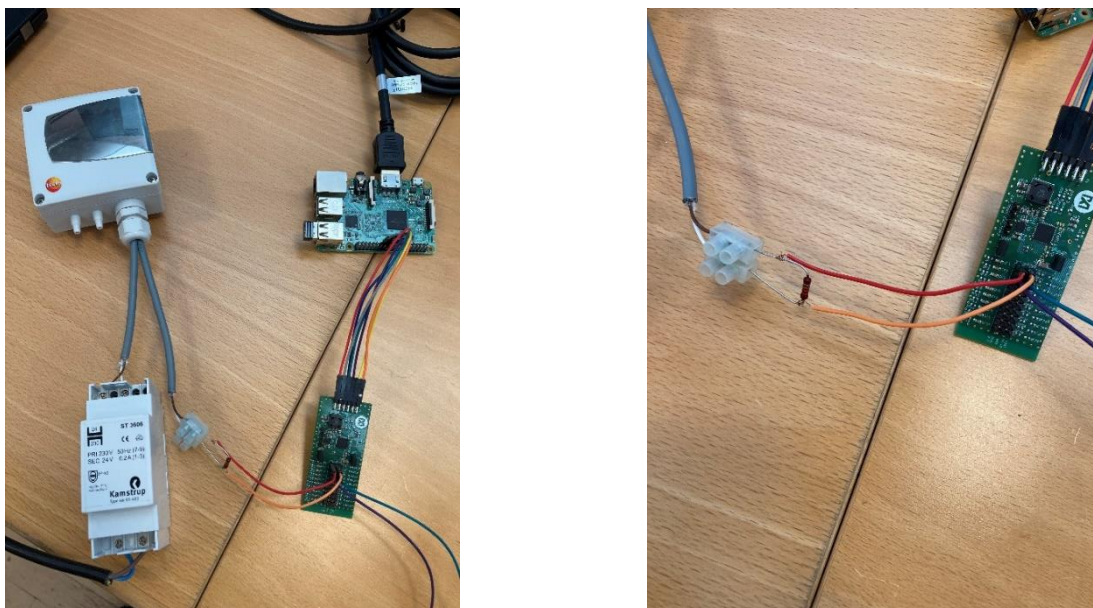
Effektmåleren der er brugt er et EM24-DIN modul, og de to differenstryktransmittere er af fabrikat Testo type 6231. Desuden er der brugt pitotrør med dimensionerne $\varnothing 7\text{mm} \times \text{L}500\text{mm}$. Endvidere er der brugt en Raspberry Pi til dataopsamling og logning.



Figur 9.2.1 Koncept for måleudstyr.

Det fremgår af figur 9.2.1, at de opsamlede data fra trykdifferensmålerne og effektmåleren bliver sendt via Modbus-til-USB og videre til logning i en Raspberry Pi. Da trykdifferensmålerne har et output på 4-20mA, er der brugt en ICP CON i-7017 Bus for at oversætte data til Modbus-til-USB. I Raspberry Pi gøres brug af et open-source styresystem kaldet Debian GNU/Linux. Data aflæses i Modbus'en ved brug af et program der er programmeret i Python, og opsamles i en tekstfil, der senere kan hentes ned og læses.

Raspberry Pi logger data hvert minut. Der er der implementeret en genstartsprocedure, der rebooter enheden én gang i døgnet for at forhindre problemer og fejl, der kan hindre logningen af data. Den eksterne hukommelse i Raspberry Pi'en er et SD kort. Raspberry Pi'en blev efter indledende undersøgelser tilsluttet et 16pin board med jumper ledninger i stedet for at tilslutte den til modbus. I dette tilfælde bruges en USB-til-mikroUSB fra PC'en. Testo 6231 trykdifferensmåleren kobles til strømforsyningen og der blev sat ledninger til 16pin boardet via en 220 Ohm modstand.



Figur 9.2.2 Fortrådning af tryktransducer med Raspberry Pi og strømforsyning.

For at afsøge eventuelle problemer med sensorerne blev der lavet et par simple test. Første test af udstyret foregik ved PC'en. Delene blev samlet som beskrevet i det foregående afsnit og der blev målt med et multimeter på modstanden for at vurdere om udgangssignalet fra trykdifferensmåleren var 1-5V, som en 220 Ohm modstand burde lave fra et 4-20mA signal. Signalet blev omsat til tryk i Pascal med få linjer kode, der læser udgangssignalet i volt og finder det tilsvarende tryk i forhold til det angivne måleområde trykdifferensmåleren har. Værdierne blev aflæst i et angivet tidsinterval og logget til en kommasepareret tekstfil med dato og tid. I dette forsøg blev målingerne aflæst hvert sekund og midlet over 30 sekunder. I dette forsøg var trykdifferensmåleren ikke koblet til et pitotrør eller en trykstuds, men der blev målt direkte på omgivelserne.

Anden test foregik på en forsøgsopstilling med en udsugningsventilator. Måle- og logningsudstyret blev sat sammen med pitotrøret, så der kunne foretages målinger samhørende værdier for luftflow og tryk. Målingerne foregik kun i centrum af kanalen, da kontrolmålinger foretaget med et mikromanometer viste en rimelig stabil luftstrøm i det valgte målepunkt på opstillingen.

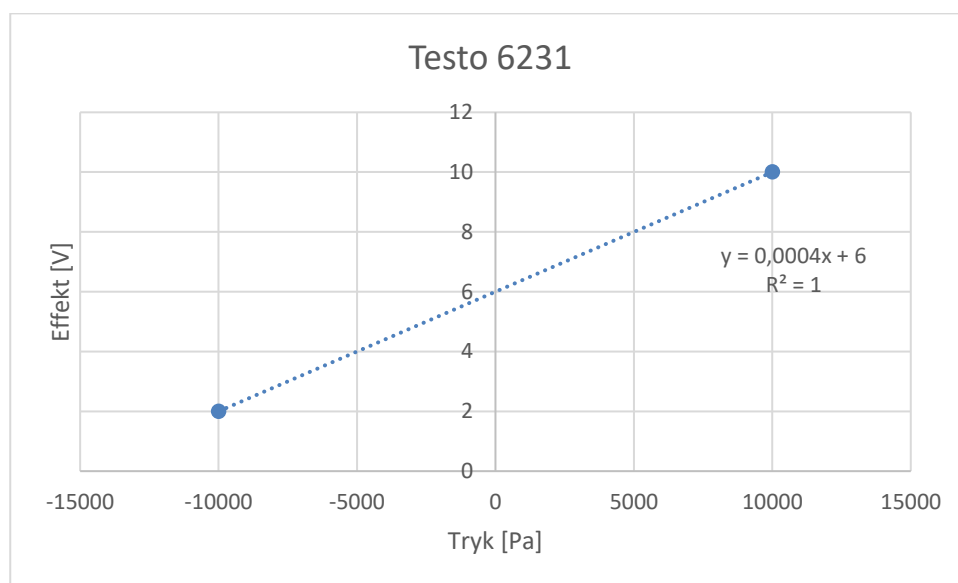
Der blev fundet en væsentlig difference mellem den aflæste spænding på multimeteret og den værdi der blev logget. Der blev fundet en fejl i sammenhængen mellem datalogningssoftwarens konfigurationsfil og modstanden brugt til trykdifferensmåleren. Modstanden blev derfor skiftet ud med en 500 Ohms modstand i stedet.

Efterfølgende blev målingerne genoptaget og der blev noteret samstemmende værdier for spændingen på multimeteret og den aflæste værdi fra softwaren. Ved afprøvning af Testo 6231 trykdifferensmåleren blev der opdaget svingende aflæste værdier, der kunne tyde på en mindre opløsning end ventet ved et måleområde på 0 ± 10.000 Pa, samt at der var flere store udsving.

Logningen af data foregik ved at skrive en kommasepareret fil, hvor hver kolonne indeholdte en datatype, og hver række indeholdte værdien af de loggede data for en given tidsperiode. De kommasepareret data er nemme at analysere efterfølgende, og fylder forholdsvis lidt i forhold til mængden af hukommelse på enheden der bliver brugt til dataopbevaring.

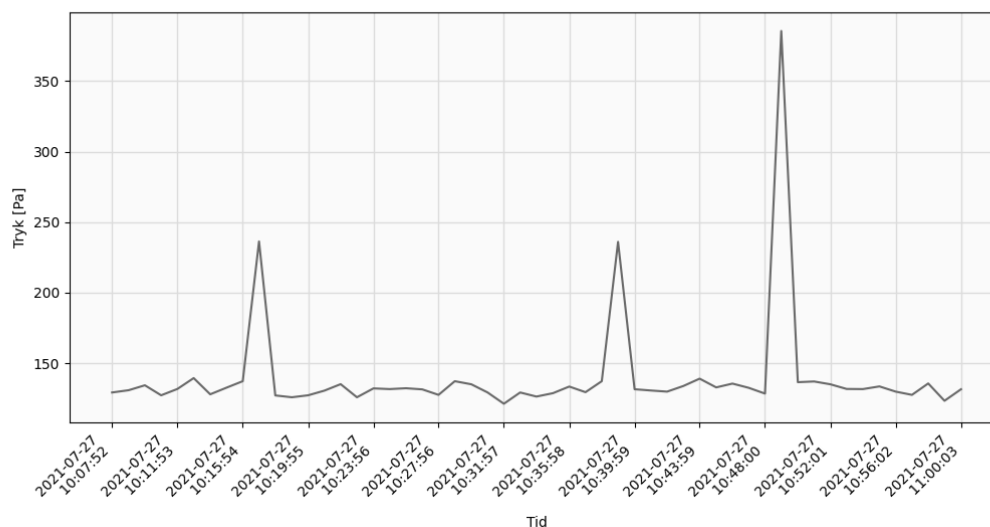
I softwaren til datalogningsystemet er der som tidligere nævnt tilføjet en funktion, der rebooter Raspberry Pi'en hvert døgn ved midnat for at fjerne eventuelle fejl der måtte forekomme som følge af f.eks. over flow i hukommelsen. Logningssoftwaren startes op på ny efter hver reboot og fortsætter med at logge til samme fil. Der vil mangle målinger i den tid hvor Raspberry Pi'en rebooter, men det er under forsøgene vurderet til at være mellem 1 og 2 minutter. Dermed mangler der kun en enkelt eller to målinger, hvilket ikke har nævneværdig betydning.

For Testo 6231 trykdifferensmåleren udgangssignalet ud, som vist med figur 9.2.3. Da måleren har et måleområde på $0..±10.000$ Pa kan opløsningen siges at være halveret i det positive område. Udgangssignalet er et 4-20mA signal, der på grundet af modstanden på 500 Ohm bliver et signal på 2-10V. I målerens brugsanvisning beskrives forholdet mellem signal og tryk som en lineær funktion og derved kan forholdet beskrives ved $y = 0,0004x + 6$.



Figur 9.2.3 Forholdet mellem spænding og tryk for Testo 6231.

Der blev udført en test af Testo 6231 trykdifferensmåleren. Under testen blev der observeret få, meget høje værdier, der ikke kan forklares ved ventilatorens karakteristika eller drift. Ved at fjerne de høje "outliers" blev der fundet en maksimal difference forskel på laveste og højeste værdi på 13,6 Pa. Målingerne lå undervejs imellem 125,8 og 139,4 Pa.

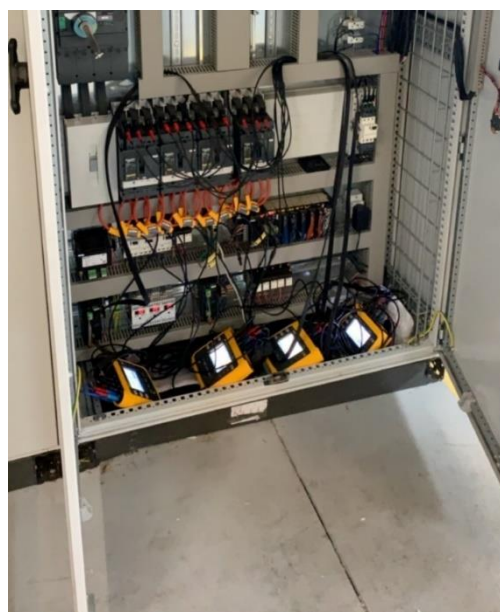


Figur 9.2.4 Test af Testo 6231.

Der er ikke nogen umiddelbar forklaring på de "outliers" der er logget, men de forekommer kun på Testo 6231 modellen. Modellen selvkalibrerer og det kan være en mulig forklaring.

9.2.5 Måling af effektforbrug

Det er i udgangspunktet ikke muligt at standse eksisterende procesventilationsanlæg for at kunne etablere målere til måling af effektoptaget til anlægget, da produktionen afhænger af at procesventilationen er i drift. Derfor er det nødvendigt at anvende elmålere, der kan monteres uden at afbryde procesventilationsanlægget i den mobile version af måleudstyret. Ved den fast monterede version af måleudstyret kan der indbygges elmålere i ventilationsanlæggets styretavle, hvor differenstryksensorer etc. ligeledes kan placeres. Nedenstående billeder viser måleudstyr placeret i en elforsyningstavle hos Tvilum, hvor Aura Energirådgivning foretog indledende målinger.



Figur 9.2.5 Måleudstyr til effektforbrug.

I det målekoncept der er udviklet og testet er der anvendt strømtransformere og en 3-faset elmåler fra fa. Carlo Gavazzi. Elmåleren er en EM24-DIN 3-faset elmåler med mulighed for tilkobling af strømtransformere.

Der blev undersøgt flere løsninger til at foretage energimålinger og analyser med clamp-on strømtransformere. En anden mulighed er EM210 el-måleren med strømtransformertilslutning. Der kan både tilsluttes to-kernede strømtransformere og Rogowski-strømspoler.

Der blev efter flere undersøgelser og konsultationer med Carlo Gavazzi besluttet at den 3-fasede elmåler, EM330-DIN, var det bedste valg, da den har en modbus protokol, der gør det muligt at logge målte data på en Raspberry Pi via en modbus-til-USB forbindelse, og samtidig har mulighed for tilkobling af relativt billige strømtransformere.

De to-kernede strømtransformere er nemme at montere på stedet, men har en begrænset og kan derfor være besværlige at installere i snævre installationskabe, se figur 9.2.6. Rogowski-strømspoler har derimod en bedre målenøjagtighed og en større huldiameter. Den er ligeledes nem at montere på grund af dens åbningsmekanisme.

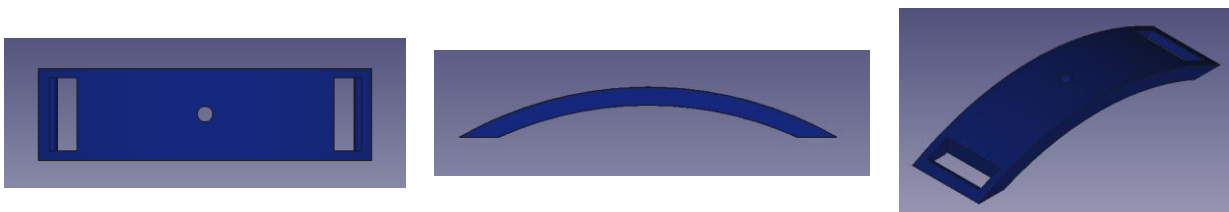


Figur 9.2.6 Venstre billede: To-kernet strømtransformer, højre billede: Rogowski-strømspoler.

9.2.6 Montering af måleudstyret

Ved de første tests af måleudstyret i laboratoriet var pitotrøret fæstnet midlertidigt til kanalen med runde flanger og tape. Sideløbende hermed blev der konstrueret en 3D-printet monteringsplade, der skulle fastholde pitotrøret på en kanal. Første model blev udviklet til brug med bånd, der spændes omkring kanalstykket. Hullet til pitotrøret i monteringspladen havde en diameter på 10 mm og er dermed en smule større end selve pitotrøret, således at pitotrøret kan bevæge sig frit i hullet så den længde pitotrøret rækker ind i kanalen kan justeres frit. I hullet skal der være en gummitætning.

De følgende billeder viser den 3D-printede monteringsplade, der i dette tilfælde er beregnet til en $\varnothing 630$ mm kanal.



Figur 9.2.7 3D-model af monteringsplade.



Figur 9.2.8 Færdig 3D-print af monteringspladen.

For at gøre sammenføjen mellem kanal og monteringsplade tæt, er der monteret gummilister rundt i kanten af monteringspladen.

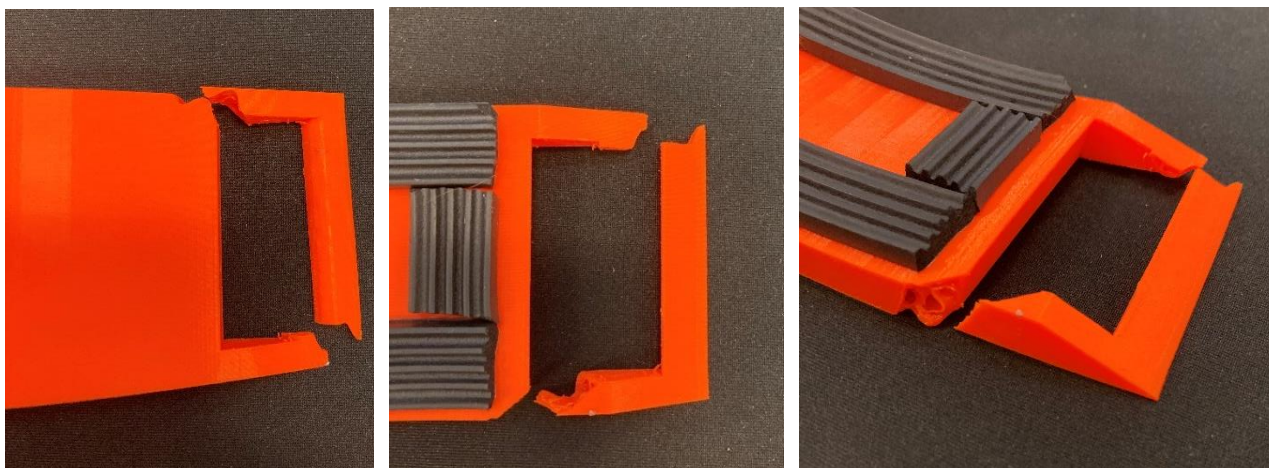


Figur 9.2.9 Montering af gummilister på monteringsplade.

Monteringspladen blev monteret på toppen af kanalen, se figur 9.2.10. Der blev brugt et bånd med skraldeopstrammer, og båndet blev spændt indtil monteringspladen var tilfredsstillende fastgjort. Herefter blev opstillingen overvåget for at opdage eventuelle problemer eller fejl. Efter drift af opstillingen i ca. 11 minutter, opstod der en revne i det ene hjørne af monteringspladen. Det måtte derfor konkluderes at en monteringsplade i denne udførelse ikke vil være brugbar i en faktisk driftssituation.



Figur 9.2.10 Test af 3D-printet monteringsplade på ventilationskanal.



Figur 9.2.11 Monteringsplade i plast efter brug.

Monteringspladen kan gøres stærkere ved at øge tykkelsen. Det vurderes dog, at den udviklede monteringsplade i plast ikke vil være stærk nok i længden til at kunne anvendes. Det vurderes, at det vil være nødvendigt at udføre monteringspladen på traditionel vis i metal for at den skal kunne holde.

9.2.7 Økonomi

Det udviklede måleudstyr kostede mellem kr. 11.500-12.500,- afhængig af konfigurationen. På grund af leveringsproblemer blev de valgte komponenter lidt dyrere, så det antages at det på sigt vil være muligt at reducere omkostningerne. Det skal dog bemærkes, at omkostningerne til måleudstyret afhænger af kanalstørrelsen på det procesventilationsanlæg der skal måles, idet omkostningerne til montering på større ventilationsystemer stiger med kanalstørrelsen.

9.3 Tests hos casevirksomhed

Det udviklede måleudstyr blev testet hos møbelvirksomheden Tvilum A/S, hvor det blev opsat til at overvåge ét af virksomhedens udsugningsanlæg. Måleudstyret blev opsat så det overvågede én af udsugningsanlæggets i alt tre blæsere. Boksen med måle- og sendeudstyr blev placeret udendørs tæt ved udsugningsventilatoren.



Figur 9.3.1 Placering af måleskab ved Tvilum A/S.

Måleskabet var IP54 og dermed sikret mod vandindtrængning som følge af regn og slud. Den varme udstyret udvikler forventes at være nok til at sikre komponenterne i måleskabet mod for kolde temperaturer.

Der blev etableret trykudtag på hver side af blæseren, der anvendes til målingen af trykket over blæseren. Differenstryksensoren var indbygget i måleskabet.



Figur 9.3.2 Montering af trykstuds til differenstryk målinger.

Pitotrøret blev monteret på kanalen med et metalbeslag, se figur 9.3.3.

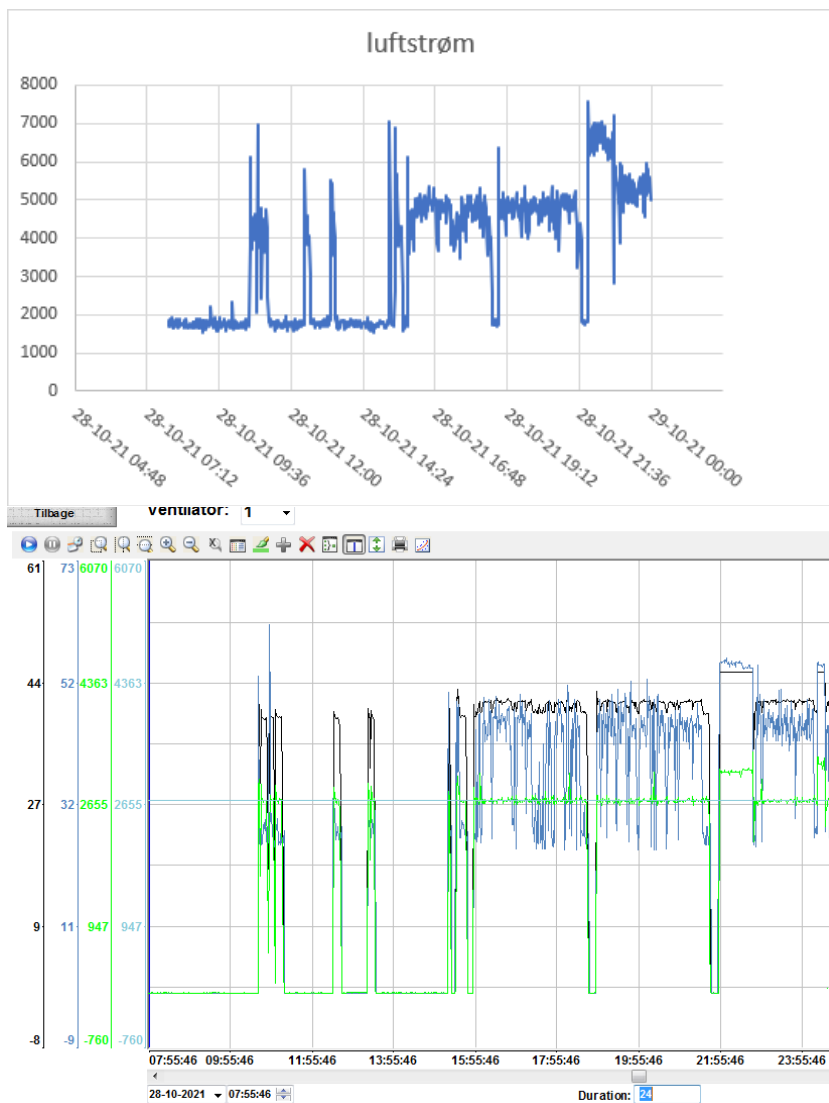


Figur 9.3.3 Montering af pitotrør på udsugningskanal.

Målingerne af effektoptaget blev foretaget i eltavlen, der forsyner udsugningsanlægget. Eltavlen er placeret i en nærliggende bygning.

9.3.1 Indledende vurdering af måleudstyret

Efter at måleudstyret var monteret blev der foretaget en indledende vurdering af, om målingerne var valide. Det blev gjort ved at sammenholde virksomhedens egne elmålinger samt målinger af tryk og luftflow foretaget med håndholdt udstyr med måledata fra måleudstyret. De målte tryk og luftflow samt effektoptag stemte overens med de data, der blev logget af måleudstyret. Det blev således konstateret, at måleudstyret var i stand til at aflæse og logge data in-situ på det udvalgte procesventilationsanlæg.

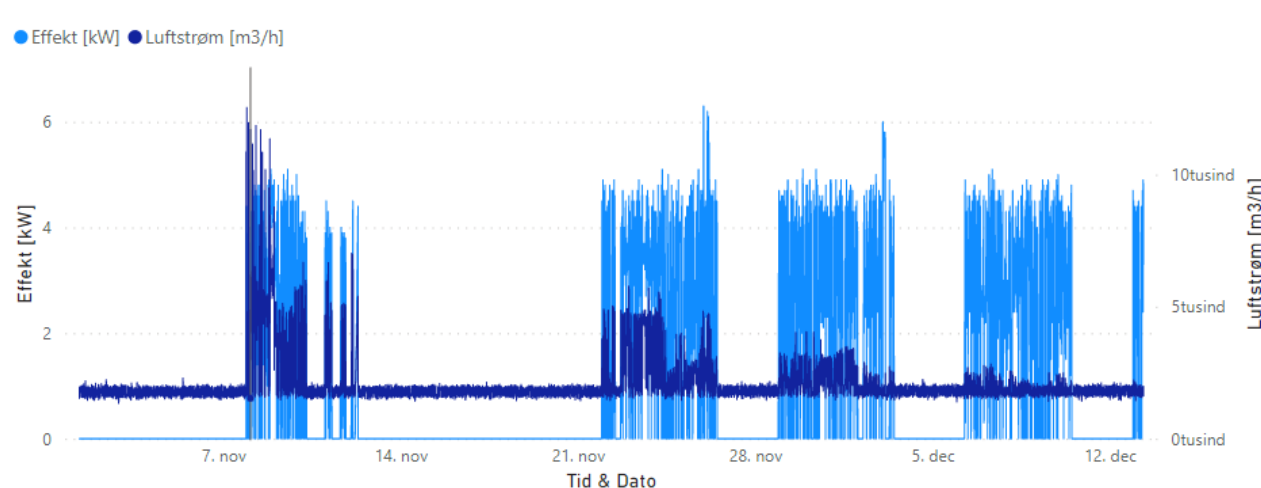


Figur 9.3.4 Sammenligning af måledata med virksomhedens egne registreringer.

9.3.2 Måleresultater

Måleudstyret var opsat i ca. tre måneder fra primo november 2021 til ultimo januar 2022 for at langtidsteste udstyret og for at få tilstrækkelige erfaringer med driften af udstyret.

I figur 9.3.5 ses måledata for luftflow og effektoptag. Det ses, at der over den første tid skete en væsentlig reduktion i luftflowet, mens effektoptaget var nogenlunde uændret. Reduktionen i luftflow skete gradvist. Som det ses af figur 9.3.5, er effektoptaget lavt i forhold til luftflowet, hvilket skyldes at der var en fejl i logningssoftwaren, der nedskalerede den optagne effekt med en faktor 10. Denne fejl blev efterfølgende rettet.



Figur 9.3.5 Effekt [kW] og luftstrøm [m^3/h] midtvejs i måleperioden.

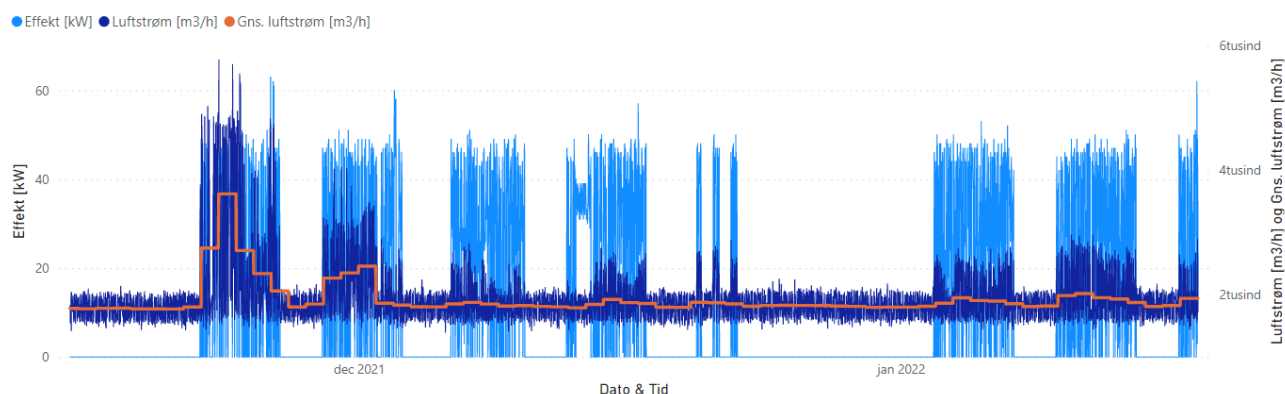
Det blev antaget, at der kan være to mulige forklaringer på reduktionen i luftflowet, - enten sker der en tilsmudsning af pitotrøret pga. det støv der er i udsugningsluften, eller så var positionen af pitotrøret i forhold til luftstrømmen ændret.

Ved et opfølgende besøg på virksomheden blev pitotrøret undersøgt og pitotrørets position kontrolleret. Det viste sig, at pitotrøret var roteret fra sin oprindelige position. Pitot-rørets placering blev rettet til, og røret blev fastgjort yderligere for at modvirke at røret ville rykke sig igen.



Figur 9.3.6 Rotation af pitotrør efter 6 ugers drift.

Figur 9.3.7 viser de målte værdier for ventilatorens afgivne effekt [kW] og luftstrøm [m^3/h], samt den daglige gennemsnitlige luftstrøm [m^3/h] over hele måleperioden. Målingerne viser at udsugningsanlægget er i drift i løbet af hverdage og at der i weekenden bliver slukket for systemet. Ud fra ventilatorens optagne effekt ses det tydeligt, at ventilatoren driftes ensartet gennem måleperioden.



Figur 9.3.7 Effekt [kW], luftstrøm [m^3/h] og daglige gennemsnitlige luftstrøm [m^3/h].

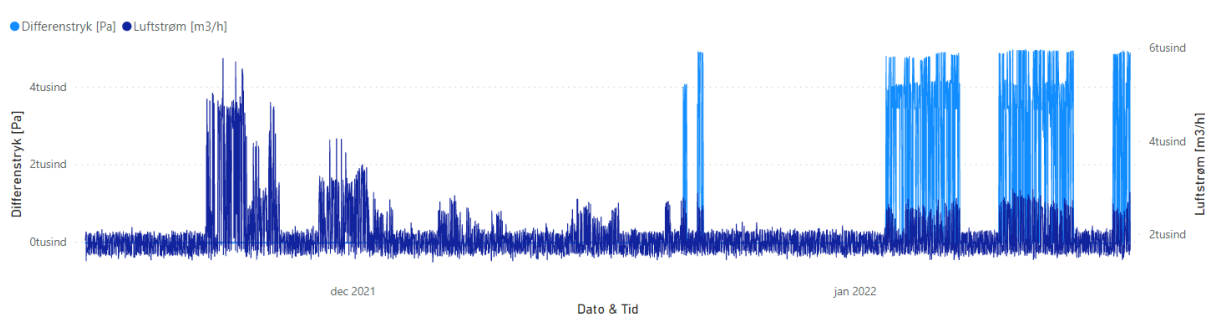
Den højest målte luftstrøm i den første uge af målingerne er på $5.775 \text{ m}^3/\text{h}$, mens der i den tredje uge måles en maksimal luftmængde på $2.823 \text{ m}^3/\text{h}$ som følge af pitotrørets skævvridning. Efter yderligere fastgørelse af pitotrøret var flowmålingen stabil.

Figur 9.3.8 viser målingerne af optagen effekt og luftflow for d. 22. november, hvor det tydeligt ses at udsugningen kun er i drift i relativt kort tid over døgnet.



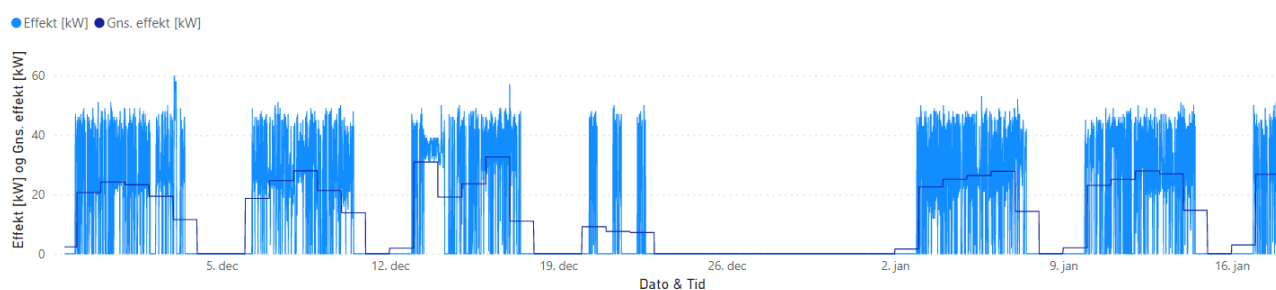
Figur 9.3.8 Effekt [kW] og luftstrøm [m^3/h] den 22. november 2021.

Differenstrykket [Pa] over udsugningsblæseren blev først målt fra ultimo december på grund tekniske problemer med transduceren. Figur 9.3.9 viser forholdet mellem differenstrykket og luftstrømmen målt igennem hele måleperioden. Det kan tydeligt ses på figuren, hvordan differenstrykket over blæseren er på et konstant niveau på mellem 4-5 kPa, når udsugningssystemet er i drift.



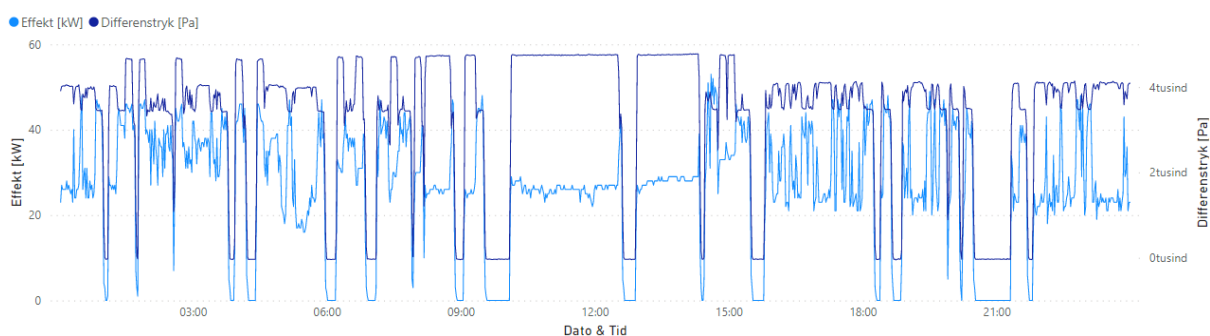
Figur 9.3.9 Differenstryk [Pa] over ventilatoren og luftstrømmen [m^3/h].

Den målte optagne effekt for blæseren har været helt stabil i måleperioden, og det noteres at de målte værdier stemmer overens med virksomhedens egne målinger. Den gennemsnitlige optagne effekt er omkring 35 kW. Den tilsyneladende voldsomt varierende optagne effekt skyldes, at der er vist data for hele måleperioden, hvor blæseren både er i drift og standset.



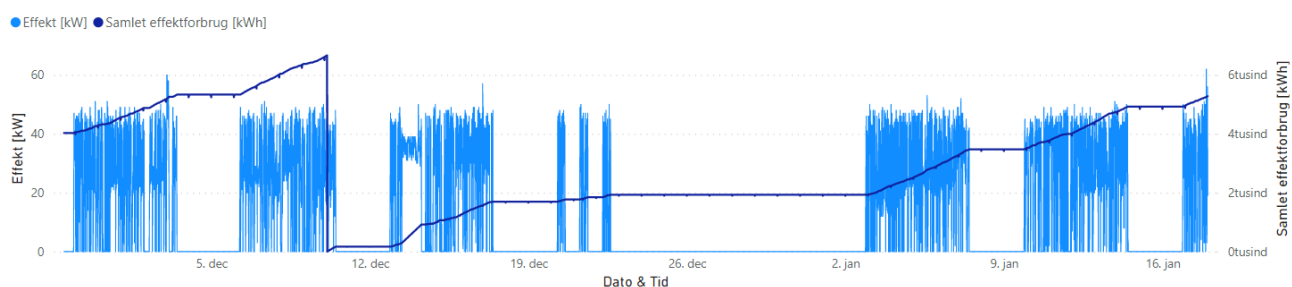
Figur 9.3.10 Målt optagen effekt [kW] og daglig gennemsnitlig effekt [kW].

Ved en nærmere undersøgelse af den optagne effekt over en enkelt dag fås et bedre billede af, hvordan den optagne effekt og differenstrykket varierer over tiden. Figur 9.3.11 viser hvordan den optagne effekt i løbet af dagen er imellem 25 og 40 kW. Differenstrykket over blæseren er tilsvarende konstant ca. 4.000 Pa. Det stemmer overens med tidligere håndholdte målinger og blæserens datablade.



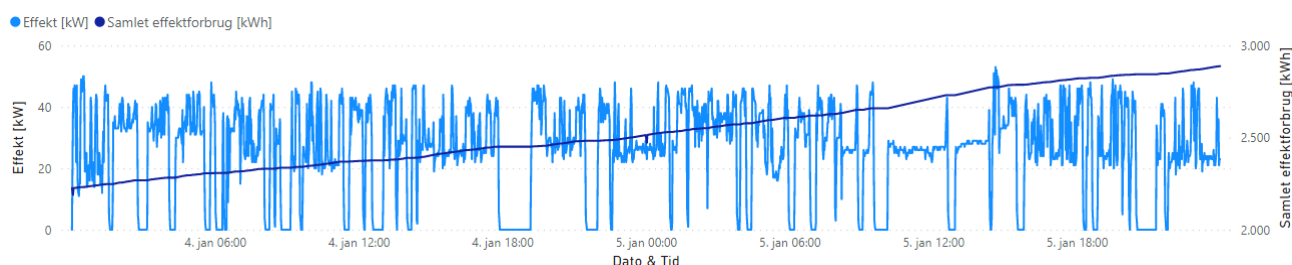
Figur 9.3.11 Effekt [kW] og differenstryk [Pa] den 5/1-2022.

Det samlede energiforbrug over måleperioden er vist i figur 9.3.12 med den mørkeblå linje. Nulstillingen af det akkumulerede energiforbrug i starten af december skyldes en afbrydelse af måleudstyret.



Figur 9.3.12 Effekt [kW] og samlet energiforbrug [kWh] i løbet af måleperioden.

Figur 9.3.13 viser den optagne effekt og det akkumulerede energiforbrug for d. 4-5. januar. Det bemærkes, at der er et lille dyk i den akkumulerede værdi for energiforbruget ved midnat mellem d. 4. januar og d. 5. januar. Det skyldes, at måleudstyret reboot'er på dette tidspunkt.



Figur 9.3.13 Effekt [kW] og samlet energiforbrug [kWh] mellem 4. og 5. januar 2022.

Målingen af den optagne effekt påvirkes ikke af at måleudstyret reboot'er, og den målte værdi er derfor korrekt.

9.3.2.1 Vurdering af måleudstyret

Efter endt testperiode blev det opsatte udstyr taget ned og undersøgt. Som det ses på figur 9.3.14 blev der observeret små mængder støv i slangerne for differenstryksensoren umiddelbart ved trykstudsene, men der vurderes ikke at have påvirket målingerne.



Figur 9.3.14 Trykstudsene placeret på hver side af udsugningsventilatoren.

Ved nedtagelsen pitotrøret kunne det konstateres at røret ikke havde ændret position siden det blev rettet medio december og placeringen stadig var korrekt i forhold til at kunne få præcise målinger. Ved pitotrørsholderen blev der observeret støv og rester fra udsugningsluften, der kunne bevæge sig igennem de små sprækker ved pitotrøret og skrueerne brugt til fastgørelse.



Figur 9.3.15 Undersøgelse af pitotrør ved nedtagelse.

Selve pitotrøret var ved nedtagelsen dækket af et fint lag støv. Der blev desuden observeret støv i pitotrørets måleåbning. Støvet i måleåbningen vurderes ikke at have blokeret pitotrøret. Det ville også have været opdaget ud fra målingerne, hvis det havde været tilfældet. Det må dog vurderes som sandsynligt at der har været støv i pitotrøret. Det var ikke muligt at teste pitotrøret efter nedtagelse, da en stor del af støvresterne røg ved nedtagelsen og den efterfølgende transport.

Skabet med måle- og datalogningsudstyret var placeret udendørs. Der blev ikke observeret nogle problemer med selve skabet og det havde holdt vand, sne og blade ude. Der blev kun fundet minimale mængde støv fra produktionen og ikke i en størrelsesorden der havde betydning.

Undervejs i måleperioden blev der konstateret flere nætter med udetemperaturer under frysepunktet. Måle- og datalogningsudstyret vurderes ikke at have lidt skade under de lave temperaturer og det er sandsynligt at udstyrets egenudviklede varme beskytter det. Det kan dog samtidig betyde at man under sommerforhold er nødsaget til at køle (ventilene) måleskabet for, at undgå overophedning. Det vil kræve yderligere test under varmere forhold for at kortlægge om overophedning er et problem.

Det har ved opsætning og nedtagning af udstyr vist sig muligt at lave måleudstyr der kan påsættes eksisterende installationer uden større konstruktionsmæssige ændringer og indenfor meget kort tid. Udstyret har vist sig at være holdbart og har klaret sig igennem hele måleperioden. Der blev til forsøget lavet flere ændringer i måleudstyret der skulle garantere at det ikke svigtede undervejs, heriblandt opsætning af ekstra transducere og trykslanger der i en fremtidig version kunne undgås. Derfor vil det være muligt at gøre måleskabets størrelse betragteligt mindre og skabe en mere mobil platform til midlertidig måling og overvågning af udsugningssystemer.

Måling af tryk over ventilatoren, effektforbrug samt datalogning vurderes at kunne lade sig med en stor præcision. Der er dog behov for nogle få rettelser og præciseringer i datalogningssoftwaren for at undgå de observerede dyk i effektforbruget. Det er ligeledes muligt at ændre softwaren til andre overvågningsopgaver, hvor det vurderes at andre måleintervaller eller værdier er nødvendige.



Pitotrøret vurderes at være den største usikkerhedsfaktor ved målingerne. Der skal ved fremtidige opstillinger laves yderligere fæstningstiltag end den medfølgende pitotrørsholder, for at være sikker på pitotrørets position i luftstrømmen. I udsugningsluft med tilsvarende rester fra produktionen kan pitotrør ikke benyttes i måleperioder der rækker længere end et par dage, og drastiske nedgange i de målte luftstrømme tyder på at præcisionen i disse kortere måleperioder også bliver påvirket.

På baggrund af de udførte tests vurderes det mobile udstyr som en anvendelig og holdbar løsning.

9.3.3 Afprøvning af digital målebøjning

Som en del af de afprøvninger der er foretaget hos Tvilum har der været monteret en digital målebøjning i ét af de støvholdige procesudsug. Formålet med afprøvningen har været at undersøge, om den digitale målebøjning er tilstrækkelig robust til at kunne måle på støvholdig procesluft. Måleprincippet i den digitale målebøjning er at måle trykforskellen mellem to målestudse placeret henholdsvis på indersiden og ydersiden i en 90° bøjning, som vist på skitsetegningen til venstre. De statiske tryk er forskellige og denne trykdifferens måles og kan omsættes til et flow. Den digitale målebøjning er baseret på et elektronisk kredsløb med en tryksensor, som måler trykket over bøjningen. Dette tryk og diameter på bøjningen indsættes i en funktion som udregner luftmængden gennem bøjningen. Ved lave luftmængder er trykket lavt og stiller dermed store krav til tryksensoren og målepræcision i det lave måle område. Denne test skulle afgøre om sensorens præcision ændrede sig over tid i et støvet miljø.

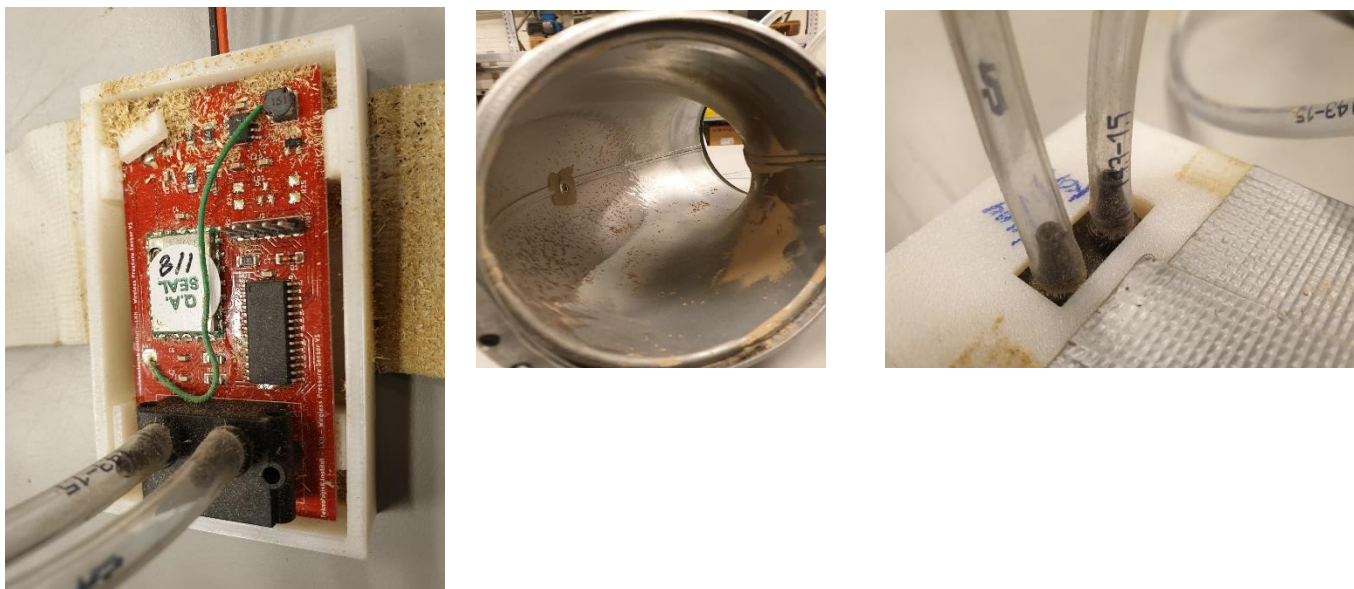
Målebøjningen var placeret i en afgrening på et større procesventilationsanlæg, der betjener en maskine der bearbejder spånplader. Procesluften er derfor meget støvholdig, og derfor problematisk for almindelige typer af flowmålere, som f.eks. pitotrørsmålere og andre målere med følere i luftstrømmen. Lufthastigheden kan i nogle tilfælde komme helt op på omkring 25-30 meter/s. Den høje hastighed og støvet er en udfordring for sensorer placeret i selve luftstrømmen, da de hurtigt bliver ødelagt af slitage. Den digitale målebøjning som er udviklet sammen med JRV A/S, og blev testet i ca. en måned på stærkt støvholdig luft.

9.3.3.1 Resultat efter test

Den digitale målebøjning var som tidligere nævnt monteret og eksponeret for støvholdig luft i ca. én måned, hvorefter målebøjningen blev demonteret og adskilt for at undersøge dens tilstand. Der ses tydelige aflejringer af træstøv stort set overalt i målebøjningen.

På det andet billede ses trykslangerne umiddelbart ved indgangen til den sensor, der registrerer trykforskellen. Det ses, at det er ret begrænset hvor meget støv der er vandret gennem slangerne op til sensoren.

Derimod blev der konstateret store mængder træstøv i slangerne mellem den digitale målebøjning og tryksensoren, se billede. Og det blev ligeledes konstateret, at der havde trængt store mængder støv ind gennem tryksensorens kabinet, - støv der stammer fra den omgivende luft i produktionslokalet.



Der blev udført en række målinger for at afgøre om sensoren stadig målte korrekt. Målingerne blev sammenlignet med måleudstyr fra Teknologisk Institut.

Tryk i Pa	Målebøjning	TSI reference
10	11	10
20	21	20
30	32	30
40	43	40
100	107	100
125	127	125

Det ses, at sensoren stadig målte korrekt, og ikke havde taget skade af det barske miljø.

9.3.3.2 Forslag til forbedringer ved produktmodning

Monteringsboksen til sensoren til den digitale målebøjning skal være IP55 støv- og spuletæt. Dette betyder, at støv ikke kan trænge ind på elektriske komponenter, så der kunne opstå isolationsfejl.

Herudover skal trykslangerne monteres således at støv ikke kan komme tæt på tryksensor. Det kan være nødvendigt at lave en form for støvfang, som kan tømmes. Derudover kan det overvejes at sætte støvfiltre på luftslangerne.

9.4 Recirkulering

9.4.1 Status i Danmark

Arbejdstilsynet skriver i At – vejledning A.1.7 (2002) blandt andet følgende omkring 'recirkulation':

Der skal etableres mekanisk udsugning, når der under arbejdet udvikles luftarter, støv e.l., som er sundhedsskadelige eller eksplosive. Det gælder også, hvis der udvikles røg, mikroorganismer, aerosoler, ildlugt eller anden generende luftforurening. Den mekaniske udsugning skal så vidt muligt fjerne forureningen på det sted, hvor den udvikles. Samtidig skal der tilføres frisk erstatningsluft.

Luft, der suges ud ved procesventilation, må ikke føres tilbage til arbejdsrummet eller til andre lokaler. I stedet skal den føres ud til det fri. Omgivelserne skal sikres ifølge Miljø- og Energiministeriets regler.

Forbud mod recirkulation gælder ikke for lukkede systemer, hvor den forurenede procesluft - eventuelt efter filtrering - føres tilbage til processen, uden at de ansatte udsættes for luften.

Vejledningen refererer til At – vejledning A.1.9 (2003): "Faste arbejdssteders indretning" og At – vejledning A.1.1 (2001): "Ventilation på faste arbejdssteder", dvs. at der er andre og mere lempelige regler for områder, der ikke er kategoriseret som "faste arbejdspladser". Men i praksis er alle områder, hvor der er adgang for personale, faste arbejdspladser.

En mindre undersøgelse af lovgivningen på dette område i andre lande (Norge, Sverige, Tyskland, Holland og Østrig) udført i 2015 viste, at Danmark indtager et særstandpunkt på området eller sagt med andre ord har den mest strikse lovgivning på området.

Status for Arbejdstilsynets mulige lempelser kan læses i nedenstående svar fra Arbejdstilsynet fra marts 2020 til projektgruppen.

"Reglerne, som du beskriver trådte i kraft 1. januar 2017 (seneste ændring af bekg. 96 af 13. feb. 2001 om faste arbejdssteders indretning):

§35 stk. 5. Udsuget luft, der udelukkende stammer fra tørslibning af karbonstål (SEA-klassifikation 10xx, 11xx og 12xx) eller rent aluminium, kan dog efter effektiv rensning samt efter tilførsel af en passende mængde frisk luft, føres tilbage til samme arbejdsrum, jf. dog stk. 8. Dette gælder dog ikke, hvis karbonstålet eller det rene aluminium indeholder stoffer og materialer omfattet af bekendtgørelse om foranstaltninger til forebyggelse af kræfttrikoen ved arbejde med stoffer og materialer, og der kan dannes et eller flere af sådanne stoffer og materialer under slibeprocessen.

Lige nu arbejder vi videre med at se på mulighederne for yderligere lempelser i forbindelse med tørre processer, hvor der ikke dannes gasser/dampe."

Teknologisk Institut, COWI og Eurofins har for Arbejdstilsynet undersøgt udført følgende undersøgelser med baggrund i mulig lempelse af det generelle recirkulationsforbud i Danmark:

"Kortlægning af eksisterende viden om recirkulation af procesluft", Teknologisk Institut, januar 2016.

”Projekt om vurdering og test af filterteknologier og tilhørende sikkerhedssystemer i forbindelse med recirkulation af procesluft med forurening af metalslibestøv”, Teknologisk Institut, december 2015.

”Undersøgelse og vurdering af risikoen ved recirkulation af procesluft – vurdering af risikoen for øget påvirkning fra sundhedsskadelige eller generende gasser fra udvalgte arbejdsprocesser”, COWI og Eurofins, januar 2016.

9.4.2 Meromkostninger uden recirkulation

Meromkostningerne (investering/drift) for at kunne overholde lovgivningen er normalt følgende foruden omkostninger til selve procesudsugningen:

- Et indblæsningsanlæg med mindst samme luftkapacitet som procesudsugningen.
- Større samlet kanalsystem (indblæsning og udsugning)
- Eventuelt varmevekslerarrangement (krydsveksler, roterende veksler, væskekoblet vekslerbatteri, heat-pipes). Vekslereffektiviteten er afhængig af varmegenvindingsprincippet og svinger pt. i praksis mellem ca. 45-70%. I Bygningsreglementet er der krav om at vekslereffektiviteten for nye anlæg skal være mindst 73% for anlæg med kryds- eller roterende vekslere og mindst 68% for anlæg med væskekoblede batterier
- Varmeblade lagt ud for -12 °C, hvis der ikke er varmegenvinding. Der har dog i en længere årrække været krav i Bygningsreglementet om at der skal være varmegenvinding
- Øgede udgifter til både elektricitet og især varme til opvarmning af indblæsningsluften

9.4.3 Koncept for recirkulering

Indblæsningsluft der tilføres arbejdslokaler med faste arbejdspladser, skal generelt være så fri for forurenende stoffer, som det er praktisk muligt. Indholdet af forurenende stoffer i indblæsningsluften skal være betydeligt lavere end de hygiejniske grænseværdier, hvor sådanne findes. I mange tilfælde regnes med en sikkerhedsfaktor på 10, dvs. at indholdet forurenende stoffer i indblæsningsluften skal være under 10% af den hygiejniske grænseværdi. I praksis skal indblæsningsluften mindst have samme luftkvalitet, som almindelig udendørs luft.

Ventilationsanlæg med recirkulation må kun monteres, hvis særlige undersøgelser har vist, at de er egnede til formålet. Det skal være muligt at lukke fuldstændig for recirkulationen.

Det skal kunne dokumenteres med målinger m.m., hvordan den fornødne luftkvalitet er opnået, og hvordan systemets pålidelighed opretholdes.

Udsugningsluft, som bliver recirkuleret til arbejdslokaler, skal filtreres, så indblæsningsluften opfylder kravene til luftkvalitet, dvs. udendørs luftkvalitet. Hvis luft fra et rum med procesventilation anvendes til recirkulation skal enhver mistanke om luftforurenende stoffer som følge af fejl i anlægget hurtigt kunne observeres, - om nødvendigt ved hjælp af måleinstrumenter monteret på ventilationsanlægget. Den forurenede luft skal derefter ledes til et andet filtreringssystem eller direkte til det fri, eller alternativt skal processen afbrydes automatisk.

Det må understreges, at teknikker til filtrering af gasformige forureninger er mere komplicerede, og dokumentationen er mere sparsom end dokumentationen for filtrering af partikler (støv). Udsugningsluft, som indeholder gasser, der er sundhedsskadelige, bør derfor ikke recirkuleres. Olie dampe er også vanskelige at fjerne, og luften efter olietågeudskillere bør derfor ledes til det fri.

Andelen af recirkuleret luft i indblæsningsluften må maksimalt udgøre 80%.

I tilfælde af driftsforstyrrelser skal anlægget omstilles til afkast til det fri og det skal sikres at støvbelastningen i arbejdsrummene holdes så lav, som mulig. Mere præcist må udsugningsluft som indeholder stoffer, gasser markeret med 'L', 'H' og 'K' i henhold til grænseværdilisten ikke recirkuleres.

Nedenstående er der nogle få eksempler fra grænseværdilisten.

CAS-nr.	Stof	ppm	mg/m ³	Anm.
10024-97-2	Dinitrogenoxid	50	90	
67-64-1	Acetone	250	600	E
1310-58-3	Kaliumhydroxid	-	2	L
7439-97-6	Kviksølv og uorganiske forbindelser inkl. dampe	-	0,025	H
14808-60-7	Kvarts, total, respirabel		0,1	K

Tabel 9.4.1 Eksempler hentet fra grænseværdilisten.

$$C \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{M}{24,45} \cdot C [ppm]$$

hvor M er stoffets molekylvægt.

For stoffer hvor grænseværdien for støv er angivet i fibre/cm³, er enheden placeret i kolonnen mg/cm³.

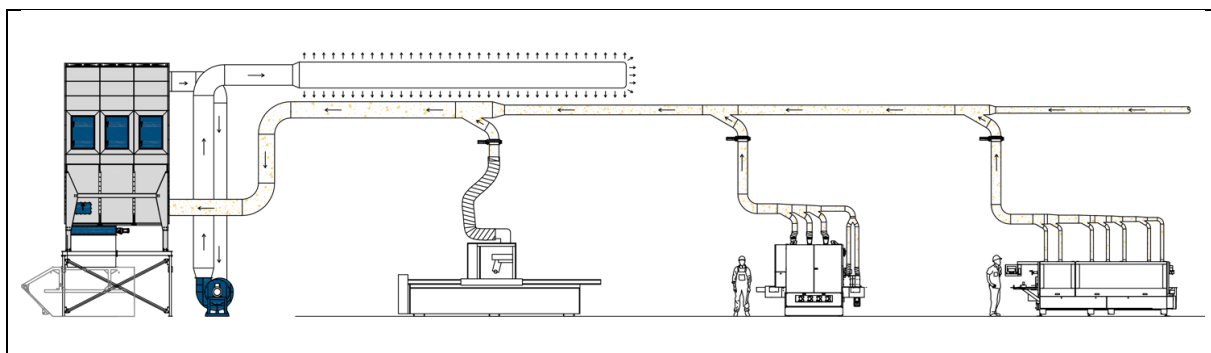
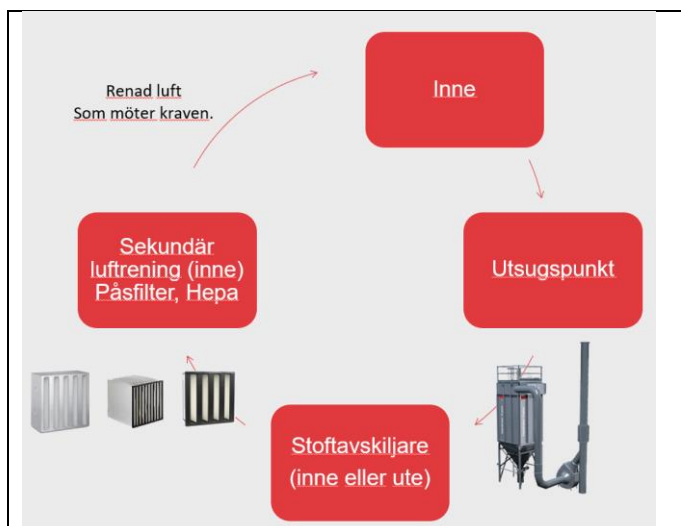
- E betyder, at stoffet har en EF-grænseværdi
- L markerer, at grænseværdien er en loftværdi, som ikke på noget tidspunkt må overskrides
- H betyder, at stoffet kan optages gennem huden
- K betyder, at stoffet er optaget på listen over stoffer, der anses for at være kræftfremkaldende

Ventilationsanlæg skal kontrolleres og vedligeholdes regelmæssigt.

Nyinstallerede ventilationsanlæg skal efterses for at kontrollere at de fungerer efter hensigten, før den egentlige igangsætning af normal drift. Inspektion og vedligeholdelse skal dokumenteres. Det er tilrådeligt at gøre en person på virksomheden ansvarlig for disse rutiner efter nødvendige oplysninger og instruktioner. Dokumentationen skal være tilgængelig ved installationen.

Af hensyn til arbejdernes sikkerhed skal der monteres systemer på ventilationsanlægget, som giver alarm i tilfælde af svigt af filtreringssystem.

En mulig principiel opbygning af procesventilation med mulighed for recirkulering er vist på den efterfølgende principskitse.



Figur 9.4.1 Eksempel på recirkulationsarrangement fra Sverige. Procesluften filtreres først gennem et egentligt filtreringssystem fx patronfilter, som renses automatisk qua trykluft. Herefter returneres den filtrerede luft til arbejdslokalet, men først efter yderligere filtrering gennem f.eks. F7 filtre.

9.4.3.1 Arbejdshygiejniske målinger i arbejdslokalet

Der bør være et årligt tjek af luften i arbejdslokalet med hensyn til støvindhold i henhold til grænseværdilisten. Et eksempel på måling er vist i det efterfølgende skema:

Af AMI-vejledningen nr. 5 1993 "Luftforurening – vejledning i arbejdshygiejniske undersøgelser" fremgår det:

	Resultat Personbåren	Resultat Stationær inde i huset	Resultat Stationær i arbejdsområdet udenfor
Totalstøv $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,28	0,27	< 0,07
Grænseværdi mg/m^3	3	3	3
Brøksum	0,09	0,09	< 0,02

Figur 9.4.2 Eksempel på test for 'Totalstøv' i arbejdsområdet i henhold til grænseværdier.

9.4.3.2 Sekundær filtrering af returluft

Den udsugede procesluft skal filtreres ned til et niveau, hvor det er tilladt med afkast til det fri uden tilhørende skorsten i henhold til vejledning fra miljøstyrelsen nr. 2 (2001): "Luftvejledningen – Begrænsning af luftforurening fra virksomheder". I dette tilfælde bør afkastet "kun" føres 1 meter over tagniveau. Der anvendes i dette tilfælde begrebet 'spredningsfaktoren', der er defineret som:

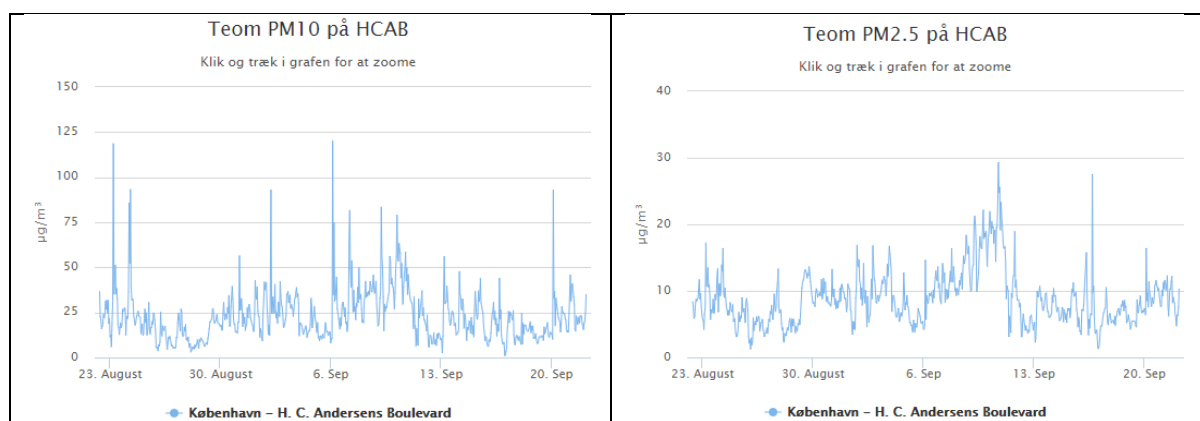
$$\text{Spredningsfaktor} = (\text{time emission mg/s}) / (\text{B-værdi mg/m}^3) = \text{m}^3/\text{s} < 250$$

Hvis spredningsfaktoren er større end 250, er det nødvendigt at fastlægge afksthøjden ved en spredningsberegning med OML-modellen. Forskellige stoffer kan have forskellige B-værdier.

Herefter skal procesluften filtreres ned til udendørs luftkvalitet. WHO-anbefalinger og partikelmålinger (her fra København) sætter niveauet for tilladelig partikelindhold i recirkulationsluften (indblæsningsluften) og DS/EN 16798 - 1: 2019 lister WHO (2005) 'outdoor air quality guidelines for annual mean' på:

$$-\text{PM}_{2,5} = 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$-\text{PM}_{10} = 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$$



Figur 9.4.3 On-line partikelmålinger i København (august-september).

9.4.3.3 Filtervalg

Til fastlæggelse af filtervalg til sekundær filtrering skal følgende analyse laves først:

- Udsuget luftmængde udtrykt i f.eks. m^3/h
- Partikelindhold i procesluft efter filtreringssystem udtrykt i f.eks. $\text{ePM}_{10} \mu\text{g}/\text{m}^3$ og $\text{ePM}_{2,5} \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Plads (areal) til rådighed til filterarrangement udtryk i f.eks. m^2
- Valg af filter filtreringsevne
- Valg af filter energiklasse

EN 779:2012		ISO 16890 - Average Efficiency		
Filter Classes	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	Coarse
G1	-	-	-	-
G2	-	-	-	30%-50%
G3	-	-	-	45%-65%
G4	-	-	-	60%-85%
M5	5%-35%	10%-45%	40%-70%	80%-95%
M6	10%-40%	20%-50%	45%-80%	>90%
F7	40%-65%	50%-75%	80%-90%	>95%
F8	65%-90%	75%-95%	90%-100%	>95%
F9	80%-90%	85%-95%	90%-100%	>95%

Figur 9.4.4 Filterklasseinddeling efter gammel- og ny standard.

M _i = 200 g (AC Fine)	Årligt energiforbrug kWh/år for ePM ₁ (ePM ₁ og ePM _{11min} ≥ 50%)					
	A+	A	B	C	D	E
50 & 55%	800	900	1050	1400	2000	>2000
60 & 65%	850	950	1100	1450	2050	>2050
70 & 75%	950	1100	1250	1550	2150	>2150
80 % 85%	1050	1250	1450	1800	2400	>2400
> 90%	1200	1400	1550	1900	2500	>2500

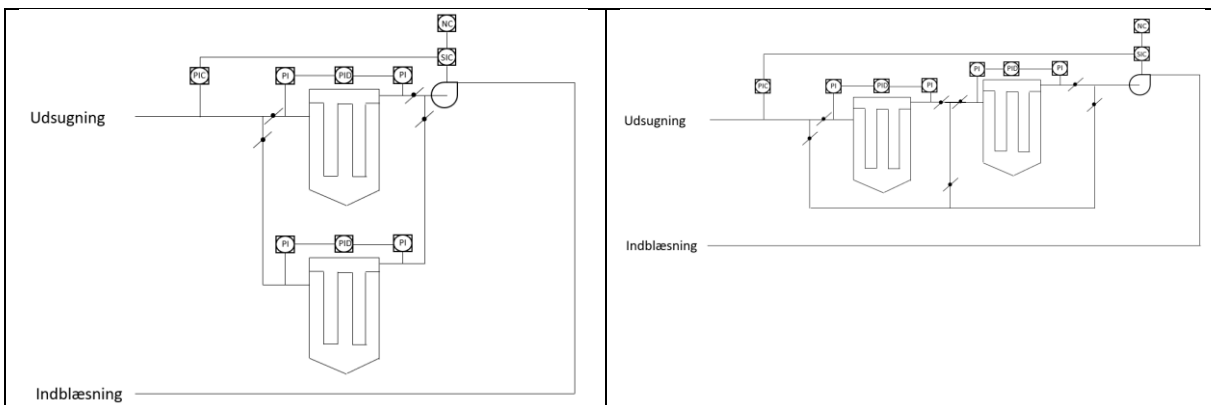
M _i = 250 g (AC Fine)	Årligt energiforbrug kWh/y for ePM _{2,5} (ePM _{2,5} og ePM _{2,5min} ≥ 50%)					
	A+	A	B	C	D	E
50 & 55%	700	800	950	1300	1900	>1900
60 & 65%	750	850	1000	1350	1950	>1950
70 & 75%	800	900	1050	1400	2000	>2000
80 % 85%	900	1000	1200	1500	2100	>2100
> 90%	1000	1100	1300	1600	2200	>2200

M _i = 400 g (AC Fine)	Årligt energiforbrug kWh/y for ePM ₁₀ (ePM ₁₀ ≥ 50%)					
	A+	A	B	C	D	E
50 & 55%	450	550	650	750	1100	>1100
60 & 65%	500	600	700	850	1200	>1200
70 & 75%	600	700	800	900	1300	>1300
80 % 85%	700	800	900	1000	1400	>1400
> 90%	800	900	1050	1400	1500	>1500

Figur 9.4.5 Det årlige energiforbrug beregnet efter metoden beskrevet i Eurovent-dokumentet Eurovent 4/21-2018. Symbolet 'M' står for tilsat støvmængde.

9.4.4 Alternative koncepter for opbygning af filtersystem

Der er i dette dokument vist to eksempler på opbygning af sekundært filtersystem, men alternative opbygninger er illustreret på de efterfølgende to figurer.



Figur 9.4.6 Koncepter for recirkulering

1. To filtre i parallel – hvis en differenstryksensor registrerer et pludseligt trykfald over ét af filtrene lukkes spjældene mod dette filter, og der gives alarm. Det betyder naturligvis at tryktabet over det funktionsduelige filter øges meget betydeligt, og formentlig er det nødvendigt at filtrene skal være lettere overdimensionerede, så udsugningssystemet fortsat kan køre og holde det nødvendige undertryk. Der vil et kort stykke tid blive recirkuleret delvis ufiltreret luft indtil at det defekte filter er afspærret.
2. To filtre i serie – hvis differenstryksensoren på ét af filtrene registrerer et pludseligt trykfald gives alarm, og det defekte filter bypass'es. Begge filtrene er nødt til at have 100% kapacitet og der er lidt bekosteligt, - også fordi der skal en del spjæld til. Til gengæld er der ingen risiko for at der kommer ufiltreret luft retur til produktionslokalet.

Det er dog således, at selv mindre huller i filterposerne kan give en betydelig støvpåvirkning, - uden at det registreres som et pludseligt tryktab. Derfor er en støvmåler indbygget i kanalsystemet på "den rene side" den bedste løsning. Støvmålere er imidlertid dyre og skal kalibreres med mellemrum. Støvmålere koster fra ca. kr. 60.000,- og op.

9.4.5 Cases for recirkulering

9.4.5.1 Case Stibo Complete, Horsens

Stibo producerer tryksager på papir og pap, herunder tilretning (tilskæring) af pap m.m. Der kunne derfor være et potentiale for rentable investeringer for de procesudsugningsanlæg uden udsugning af gasser/dampe.

Der er undersøgt et ventilationsanlæg, der alene håndterer støv og ingen dampe, da recirkulering for et anlæg af denne type måske vil blive muligt i fremtiden. Ventilationsanlægget er placeret udendørs og har en ydelse på ca. 8.000 m³/h. Ventilationsanlægget er i drift 5.500 timer pr. år.

Der kan etableres recirkulering på to måder, idet der i begge tilfælde iblandes 20% frisk luft:

1. Afkast fra filter føres til ventilationsaggregat med blandeboks og videre til lokale. Udvendige kanaler isoleres
2. Afkast fra filter føres til ventilationsaggregat på tag hvor afkast tilføres friskluftindtag. Udvendige kanaler isoleres.

Potentialet i recirkulering fra filteret (som ikke er isoleret) i de 4 koldeste måneder kan beregnes til ca. 73.600 kWh årligt, svarende til en besparelse på ca. 30.000 kr./år.

Investeringen i løsning nr. 2 er den billigste, - dog tapes ca. 20% ved at køre luften gennem genvindingen.

Det antages, at investeringen i at etablere recirkulering vil være ca. kr. 400.000,-, hvilket medfører en simpel tilbagebetalingstid for projektet på ca. 13 år. Tilbagebetalingstider i den størrelsesorden er normalt ikke interessante for industrivirksomheder.

9.4.5.2 Case DS Smith, Grenaa

Hos DS Smith, Grenaa, hvor der blandt andet produceres bølgepap blev en af processerne udtaget til nærmere undersøgelse. Den udvalgte proces tilretter (tilskærer) store papstykker, så

der er tale om en tør proces, hvor udsugningsluften indeholder tørt støv og mindre papstykker. Procesluften renses i et Moldow posefiltersystem og afkastes herefter ud til det fri. Der er ikke varmegenvinding på systemet. Luftstrømmen er omkring 55.000 m³/h og en driftstid på omkring 65%. Regnestykket ser således ud:

Luftmængde	55000 [m ³ /h]		
Opvarmningsfaktor	110 [kWh/(liter/s)]	{**}	
Driftstid	65 [%]		
Energipris	0,44 [kr/kWh]		
	480639 [kr/år]		
{**} Energiforbrug til opvarmning af 1 liter/s til 18 oC uden gvg. Driftstid 8760 timer			

Procesudsugningsanlægget er faktisk ombygget til at kunne håndtere recirkulation, men på daværende tidspunkt blev det ændrede anlæg desværre ikke godkendt af Arbejdstilsynet grundet en kommunikationsfejl omhandlende en dispensation fra det generelle recirkulationsforbud. Dette forhold kan sandsynligvis ændre sig, hvis Arbejdstilsynet kommer med en generel lempelse for tørre processer uden dannelse af gasser/dampe.





Figur 9.4.7 Recirkuleringsarrangement hos DS Smith.

Billedet øverst til venstre viser procesmaskinen inklusiv indkapslingsvægge, billedet øverst til højre viser indblæsningssektionen med F7 filtre, billedet nederst til venstre viser filteranlægget og billedet nederst til højre viser recirkulationsspjældet.



Figur 9.4.8 DS Smith, papmaskine.

De to ovenstående billeder viser et udsnit af papmaskinen, hvor store papstykker skæres til og skæres i mindre stykker. Procesluften anvendes til flytning af papstykker og udsugning af paprester fra tilskæringen.



Figur 9.4.9 Recirkuleringsarrangement hos DS Smith.

Recirkulationsarrangement fra DS Smith, Grenaa, som desværre ikke er godkendt af Arbejdstilsynet. Den principielle opbygning minder meget om det svenske eksempel, se kapitel 9.4.3. Om sommeren kan procesluften ledes til det fri, hvilket er vist med gule pile.

Procesudsugningen fra DS Smith har følgende dataoplysninger:

$$p_{\text{Tot}} = 1.305 \text{ Pa}$$

$$q_v = 36.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P_{\text{ventilator}} = 17 \text{ kW}$$

$$P_{\text{motor}} = 22 \text{ kW}$$

Den årlige driftstid er: $(7 \cdot 24 - 36) \cdot 50 = 6.600$ timer/år

Lokaletemperatur (i opvarmningsperiode): 18°C

$$\text{Årligt varmeforbrug} = 110 \cdot (36.000/3,6) \cdot (6.600/8.760) = 828.767 \text{ kWh/år}$$

Den årlige varmeudgift er ca. kr. 410.000,- ved en varmepris på 500 kr./MWh. Der vil ikke være nogen investering forbundet med at etablere recirkulering, da denne allerede er etableret.

10 Cases

I dette projekt har virksomhederne Novenco Building & Industry A/S og Tvilum A/S har indgået som demonstrationsvirksomheder med det formål, at stille nogle udvalgte procesventilationsanlæg til rådighed som cases for projektet. De udvalgte systemer er blevet målt før og efter implementering af én eller flere af de udviklede løsninger. Desuden er der besigtiget og undersøgt procesventilationssystemer hos RPC Superfos A/S, DS Smith og Stibo, og resultaterne heraf er beskrevet i kapitel 7.4.5.

10.1 Novenco Building & Industry A/S

Novenco Building & Industry er en del af Schako gruppen, der er en international koncern som beskæftiger sig med ventilationsudstyr til bygninger og industri har produceret ventilatorer siden 1947 i Næstved.

Virksomheden er kendetegnet ved at producere højeffektive blæsere og ventilatorer i høj kvalitet og med meget lang levetid. Virksomheden udvikler og fremstiller selv produkterne, der sælges overalt i verden.

Virksomheden svejser bl.a. selv blæserhjul og har indstillet fire svejserobotter og omkring 16 svejsestationer. Svejserobotterne er af nyere dato og anvendes til standardiserede svejseoperationer. Svejserobotterne har forbedret arbejdsmiljøet betydeligt og at medvirket til øget produktivitet. Udsugningen fra svejserobotterne sker ved opblandingsventilation, idet robotterne er placeret bag afskærmninger af plastforhæng og udsugningen foretages gennem kanalmonterede riste under loftet. Udsugningen er aktiv for de svejserobotter, der er i funktion. Når en svejserobot står stille er der lukket for udsugningen.

Svejsestationerne er helt traditionelle med svejseværker og punktudsugning. Der er etableret styring af punktudsugene ved at udsug og svejseværker er elektrisk sammenkoblede for hver station, så der kun er udsugning når et givet svejseværk er i anvendelse. Denne styring fungerer efter det oplyste ikke altid, hvorfor svejserne ofte slår styringen fra og i stedet benytter det manuelle afspærringsspjæld. Derfor er udsugningen aktiv med mindre at svejseren lukker det manuelle afspærringsspjæld ved sugehoven.

Der er foretaget en undersøgelse af ét af de i alt tre udsugningssystemer for svejsning. Systemet er benævnt P2.2 og betjener to svejserobotter (én i brug ved besigtigelsen) og syv svejsestationer (ét i brug). Desuden suges (permanent) fra udsugninger placeret ved tagfladens rytterlys. Udsugningssystemerne er trykstyrede således at det holdes et fastsat undertryk i udsugningskanalerne. Udsugningsblæseren samt indblæsnings- og udsugningsventilatorerne i det nedenfor beskrevne ventilationsaggregat er alle forsynet med frekvensomformere for trinløs kapacitetstilpasning.

Udsugningsblæseren er en Novenco CNB-630BD med remtræk, der kører 961 omdr./min.. Udsugningen ledes derefter til et Novenco ZL-32 CL ventilationsaggregat, hvor udsugningen varmeveksles med indblæsningsluft (erstatningsluft) til produktionshallen. Udsugningsventilatoren i aggregatet er en Novenco C2FA-350. Den udsugede luftmængde er målt til ca. 8.700 m³/h, og trykket ved udsugningsblæserens tilgangsside var -1.500 Pa ved besigtigelsen. Trykstigningen over udsugningsblæseren var 990 Pa, og trykstigningen over udsugningsventilatoren i ventilationsaggregatet var ca. 650 Pa. Udsugningsblæseren kørte med 49,8 Hz og udsugningsventilatoren i ventilationsaggregatet kørte 45,8 Hz.

Der blev foretaget målinger af udsugningsmængden fra to svejseudsug, hvor luftmængden blev målt til henholdsvis ca. 1.270 m³/h og ca. 1.090 m³/h.

På baggrund af besigtigelsen, der varede ca. 1½ time, vurderes det, at der normalt vil være én svejserobot og én svejsestation i brug foruden den konstante udsugning ved rytterlysene.

Ved besigtigelsen var anlægget indstillet til at være i drift mellem kl. 5:30 – 15:30. Der er mulighed for at øge den daglige driftstid indtil kl. 23:00 eller for forlænget drift i 3 timer.

10.2 Tvilum A/S

Tvilum er en af verdens største producenter af plademøbler med i alt fire fabrikker. Både fabrikker og administration er lokalt placeret i Danmark. Tvilum producerer plademøbler til alle husets rum i forskellige stilarter og designs. I 2011 begyndte Tvilum ligeledes at sælge produkter fra andre producenter for at kunne tilbyde kunderne et komplet sortiment til spise- og opholdsstuen.

Tvilums produkter er hovedsageligt fremstillet med en kerne i spånplade, som blandt andet fremstilles af genbrugstræ (25%) samt overskydende træspåner fra savværker. 42% af Tvilums

samlede energiforbrug CO₂-neutralt, hvilket bl.a. skyldes at bygningerne opvarmes med varme fra eget varmekværk, hvor varmen fremstilles ved at brænde restprodukter fra produktionen.

I dette projekt har der været fokus på både udsugningshøve og styring af udsugningsanlæg, idet der er taget udgangspunkt i et udsugningsanlæg for én af de i alt 10 primære produktionslinjer. Udsugningsanlægget har en samlet kapacitet på 60.000 m³/h. Cirka halvdelen af luftmængde tilføres lukkede kabinetter hvori produktionsmaskinerne er anbragt. Denne luftmængde recirkuleres over et udendørs opstillet posefilter. Den anden halvdel tilføres lokalet omkring maskinerne af udsugningsanlæggets indblæsningsdel, hvorfra den suges ind i maskinernes kabinetter. Denne luft er friskluft, der forvarmes med den halvdel af den udsugede luft, der ikke recirkuleres. Forvarmningen sker i en krydsveksler. Hvis rumtemperaturen indendøre når setpunktet bypass'es veksleren hel eller delvist.

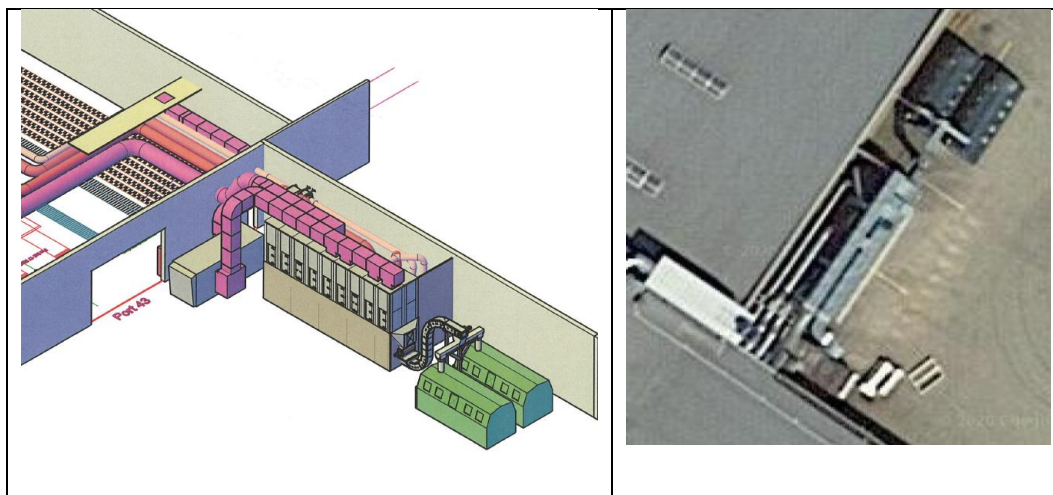
Møbelvirksomheden Tvilum ligger på Egon Kristiansens Allé 2, 8882 Fårvang, og har over 500 ansatte.

Tvilum har 14 proceslinjer og 10 procesventilationsanlæg. I projektet er valgt en proceslinje og det tilhørende procesventilationsanlæg (nr. 10 opført år 2015).

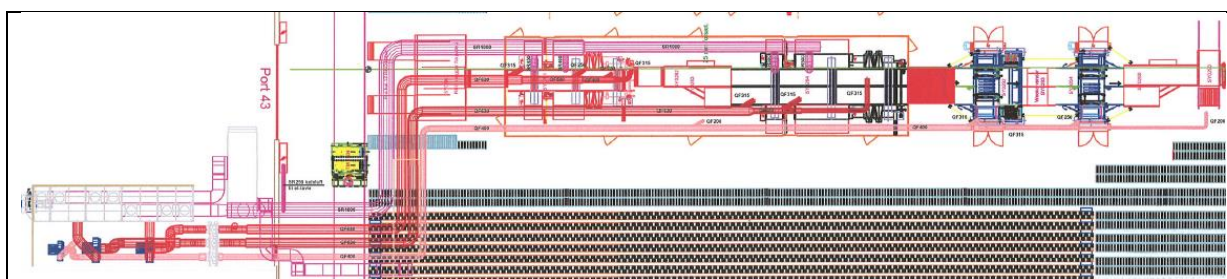
Procesventilationsanlægget har posefiltrering. En delluftmængde af den filtrerede luft bliver recirkuleret direkte til procesmaskinerne. En anden delluftmængde overfører omkring 50% af energien til et indblæsningsanlæg (ca. 30.000 m³/h) via krydsveksler. Der er også mulighed for at en delluftmængde fra udsugningen kan afkastes direkte til det fri udenom varmegenvindingen.



Figur 10.2.1 Filteranlæg (tv) og tre procesudsugningsventilatorer (th).



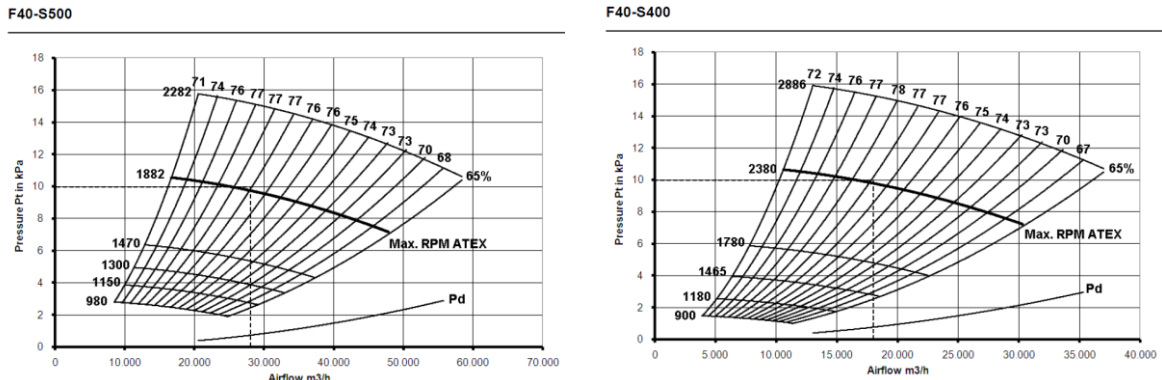
Figur 10.2.2 3D CAD-tegning (tv) og Google Maps luftfoto (th).



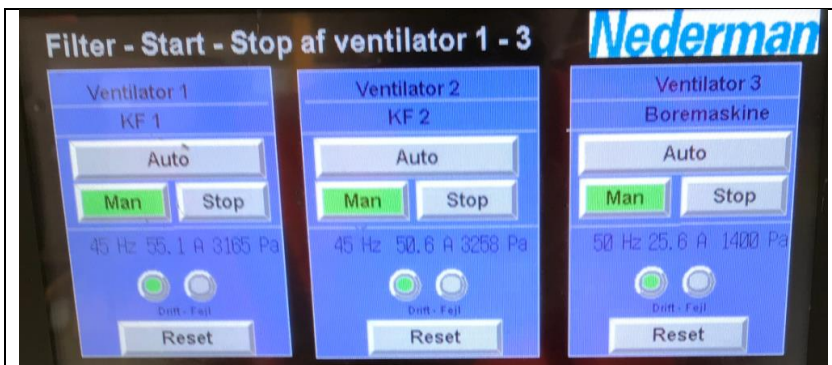
Figur 10.2.3 2D CAD-tegning som viser tre procesudsugningskanaler og én recirkulationskanal (violet).

Nederman		Nederman		Nederman	
Nazwa / Name	COMBIFAB	Nazwa / Name	COMBIFAB	Nazwa / Name	COMBIFAB
Typ / Type	FZ 40-S 500 D04 LG0	Typ / Type	FZ 40-S 500 D04 LG0	Typ / Type	FZ 40-S 400 D04 LG0
Nr ref. / Ref. No.	S11995	Nr ref. / Ref. No.	S11995	Nr ref. / Ref. No.	S11995
Nr zam. / Order No.	5359551-1	Nr zam. / Order No.	5359551-1	Nr zam. / Order No.	5359551-1
Strumien obj. / Air volume	[m ³ h]	25000	Strumien obj. / Air volume	[m ³ h]	25000
Cisnienie / Total pressure	[Pa]	4078	Cisnienie / Total pressure	[Pa]	4078
Fan rpm / rpm max.	[min-1]	1290 / 1882	Fan rpm / rpm max.	[min-1]	1290 / 1882
Moc / Power	[kW]	45	Moc / Power	[kW]	45
Waga / Weight *	[Kg]	435	Waga / Weight *	[Kg]	435
* Waga bez silnika / Weight excl. motor		* Waga bez silnika / Weight excl. motor		* Waga bez silnika / Weight excl. motor	
Nr seryjny - Rok prod. / Serial No. - Prod. Year 1842981 - 2015		Nr seryjny - Rok prod. / Serial No. - Prod. Year 1842980 - 2015		Nr seryjny - Rok prod. / Serial No. - Prod. Year 1843010 - 2015	
CE Ex II 2 / - D T4		CE Ex II 2 / - D T4		CE Ex II 2 / - D T4	

Figur 10.2.4 Mærkeplader for de tre procesudsugningsventilatorer.



Figur 10.2.5 Ventilatorarbejdskurver for de tre procesudsugningsventilatorer.



De tre procesudsugningsventilatorer kører stort set kun i manuel mode (45 Hz, 45 Hz og 50 Hz). Det skyldes stadigvæk problemer med for sen start af procesudsugningen i forhold til start af træbearbejdningsmaskiner, hvis procesudsugningen driftes i auto mode. Herved ophobes træspåner og -støv ved maskinerne. Dette behov for justering af de indbyrdes starttider er prioriteret lavere end andre "problemer".



Figur 10.2.6 Billeder af proceslinjen med procesudsug og recirkulationsindblæsning.

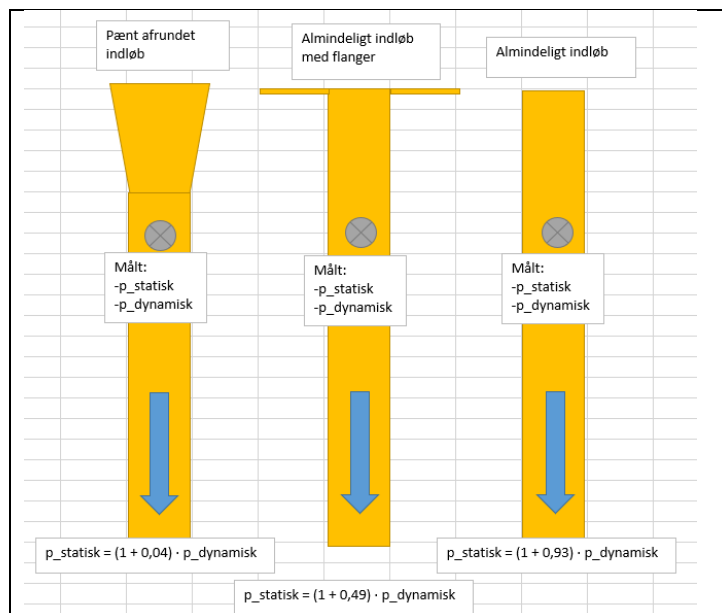
Det bemærkes, at alle procesudsug kanalmæssigt afsluttes med flexslange. Det skyldes til dels at procesmaskinerne kan bevæge sig i én retning og hermed tilpasse sig forskellige produktstørrelser.

Der er i specifikationerne fra Nederman blandt andet angivet et kanalhastighed på 35 m/s svarende til et dynamisk tryk på hele 735 Pa. Et sugetryk omsættes i praksis til en sugehastighed (kanalluft-hastighed), men hvis der er store luftmodstande i procesudsugget, kræves et endnu

højere sugetryk for at opnå en forudbestemt sugehastighed. Det er illustreret i den efterfølgende formel.

$$p_{\text{statisk}}(\text{målt}) = (1 + \xi) \times \frac{1}{2} \rho v^2 = (1 + \xi) \times p_{\text{dynamisk}}(\text{målt})$$

Modstandstal ζ for tre kendte indløb er angivet i nedenstående figur.



Modstandstallet kan godt være lavt, hvis procesudsuget er pænt afrundet og er placeret i lang afstand fra bearbejdningsmaskinen, men så er udsugningseffektiviteten til gengæld lav. Hvis procesudsuget derimod er placeret for tæt på selve maskinen, bliver modstandstallet voldsomt stort og lufthastigheden sandsynligvis for lav selvom sugetrykket er stort. Hvis minimumskanal-lufthastigheden ligger fast fremkommer besparelsen ved at reducere modstandstallet. Det kræver viden om aerodynamik, støvsprejning fra bearbejdningsmaskiner m.m.



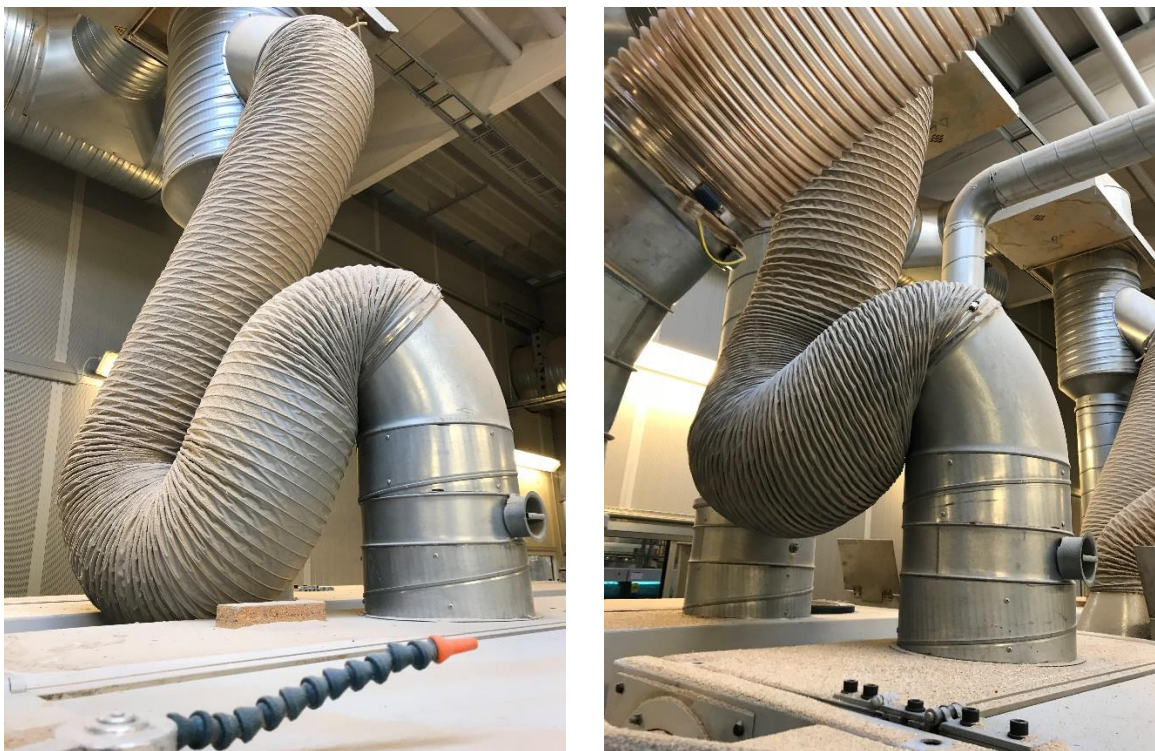
Figur 10.2.7 Flexslangehastighed lig 35 m/s og P_{statisk} lig -3200 Pa (tv). Flexslangehastighed lig 21,4 m/s og P_{statisk} lig -3400 Pa (th).



Figur 10.2.8 Flexslangehastighed lig 18 m/s og P_{statisk} lig -3400 Pa (tv). Flexslangehastighed lig 13 m/s og P_{statisk} lig < -3400 Pa (th).

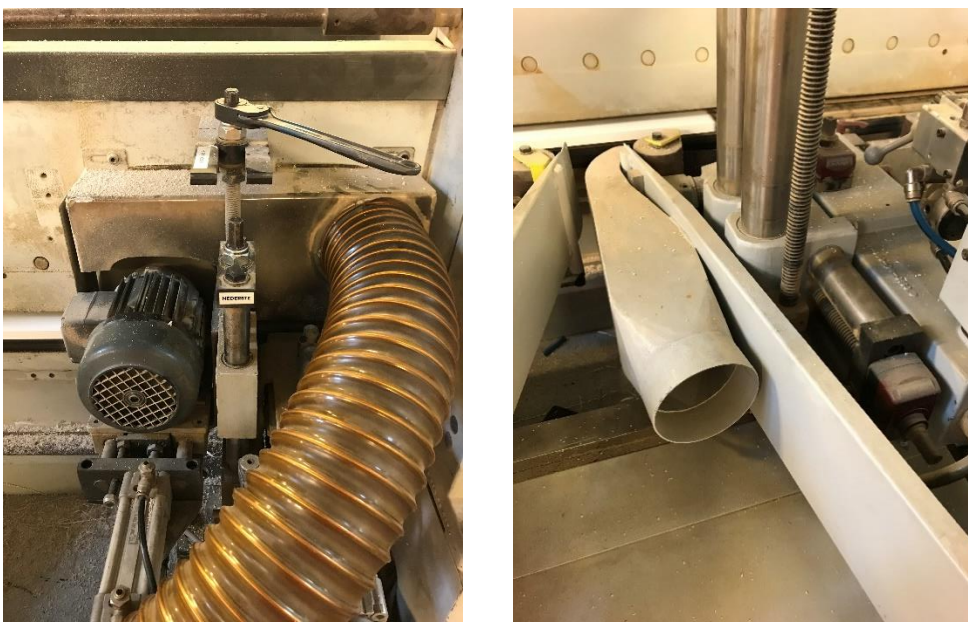
De udførte målinger i fire udvalgte procesudsug gav følgende kanalluft hastigheder: 13, 18, 21 og 35 m/s. Det procesudsug med den laveste målte kanalluft hastighed kan i princippet være bestemmende for det valgte sugetryk for hele kanalsystemet, hvilket er uheldigt.

Indblæsning (recirkulation) til procesmaskinerne kalder på udvikling af mere intelligente slangesystemer, som kan håndtere en bevægelig procesmaskine i én retning, se de nedenstående to billeder.



Figur 10.2.9 Indblæsningslanger.

Tvilum har selv fremstillet enkelte procesudsug, som forbedrer udsugningseffektiviteten.



Figur 10.2.10 Specialfremstillet indblæsning.

Speciel indblæsning (th) tilpasset en båndsliber, således at træstøvet "blæses" ind i udsuget.

Den nuværende manuelle styring af procesudsugningsanlægget giver et årligt elforbrug på omkring 700.000 kWh ved 8.760 driftstimer (til tre udsugningsventilatorer og én indblæsningsventilator). Hertil kommer energiforbrug til opvarmning af erstatningsluft.

De tre procesudsugningsventilatorers driftspunkter ligger relativt fornuftigt i forhold til optimal virkningsgrad.

11 Formidling

11.1 Artikler

I løbet af projektforløbet har der været bragt tre artikler i ELFORSK Nyt, der er ELFORSK programmets nyhedsbrev. Desuden har der været bragt artikler i HVAC Magasinet og i Dansk Miljøteknologi's blad foruden adskillige opslag på LinkedIn.

11.2 Temadag

Som afslutning på projektet blev der afholdt et Gå'hjem møde hos Teknologisk Institut d. 11. maj 2022, hvor projektet og de resultater der er opnået blev præsenteret for deltagerne. Mødets deltagere blev desuden introduceret til Teknologisk Institut's nye Indeklimalaboratorie, hvor ventilationsbranchen kan få udviklet, afprøvet og demonstreret deres teknologier.

Gå'hjem mødet havde i alt 6 deltagere.

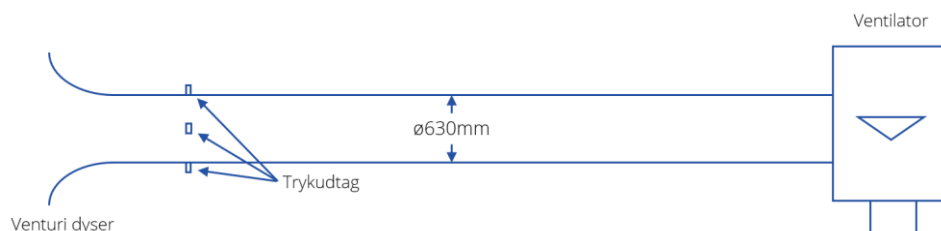
Referencer

- /1/ Kortlægning af energiforbrug i virksomheder, Energistyrelsen januar 2015.
- /2/ Energoptimering af sugehøve, ELFORSK
- /3/ Energoptimering af procesventilation og udvikling af fleksible procesudsug til store industrielle emner

Bilag 1

Testopstilling i laboratorie for afprøvning af måleudstyr

Testopstillingen bestod indledningsvis af en Nordfab So 56-500/D LG 90 radialblæser, der er tilsluttet på indløbssiden. Indløbskanalen var en $\varnothing 630\text{mm}$ med en længde på 2,5 meter. For enden af kanalen var der monteret en venturidyse, hvorpå der er placeret 4 målestudse.



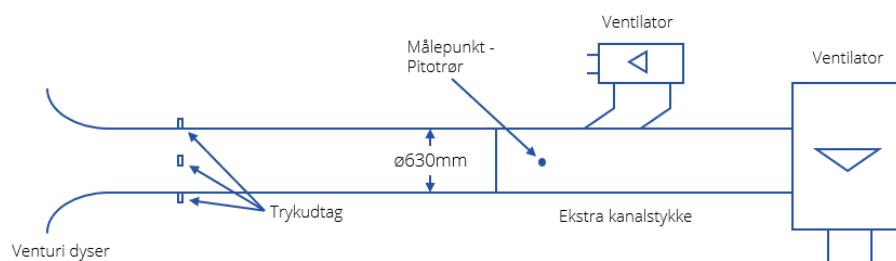
Figur 1 Principtegning af opstilling af ventilator og venturidyse.

Blæseren der blev benyttet i testopstillingen kunne samme luftmængder og hastigheder, som der forekommer i det udsugningsanlæg hos Tvilum, hvor måleudstyret efterfølgende blev afprøvet.



Figur 2 Billeder af testopstilling.

Forsøgopstillingen blev på et tidspunkt ændret, så det var muligt at påsætte en ekstra ventilator for at skabe større luftflow. Der blev monteret en afgrening til den ekstra ventilator. De to tilsluttede ventilatorer blev tilsluttet samme frekvensomformer. Princippet i den ændrede opstilling er vist med figur 3.



Figur 3 Principtegning af forsøgsopstilling med ekstra ventilator.