

Optimering af biofilter for lugt reduktion

- Masseoverførsels
 - koefficienter i porøst biofilter materiale

Afgangsprojekt i Miljøteknologi Sebastian Ravn Juni 2012



Aalborg Universitet Det Teknisk - Naturvidenskabelige Fakultet

AALBORG UNIVERSITET

The Faculties of Engineering, Science and Medicine Sohngaardsholmsvej 49 and 57 Tlf. nr. 99 40 84 91 http://www.bio.aau.dk

Synopsis:

Title: Optimering af biofilter for lugt reduktion - Masseoverførselskoefficienter i porøst biofilter materiale

Theme: Speciale projekt

Projekt periode: K9-10M, efterår 2011 - forsår 2012

Projekt gruppe: D222 A **Studerende:**

Sebastian Ravn

Supervisor: Tjalfe Gorm Poulsen og Rune Røjgaard Andreasen

Antal sider: 65 Bilag: Bilag 1, vedlagt CD Afleverings dato: 21-05-2012 Dette projekt omhandler fjernelse af lugtstoffer fra ventilationsluft fra f.eks. svineproduktioner. Lugtgenerne i det omkringliggende miljø er et stigende problem, så tiltag er nødvendige for at reducere disse gener. Dette studie arbejder med optimering af biofilter. Masseoverførslen i gasfasen er undersøgt for to filtermaterialer, 36 LECA fraktioner og Munters cellulose filter. Forsøg er udført i et simpelt opstillet biofilter med CO₂ som indikator gas og med tilsætning af NaOH til væskefasen. Masseoverførslen er undersøgt ift. partikelstørrelsesfordeling, overfladeareal og gas hastighed. Forsøg har vist, at hastigheden ikke har en indflydelse på masseoverførslen i et LECA filter i det undersøgte interval 1000 - 4000 $\frac{m}{t}$. For Munters cellulose filteret har forsøg vist en stigende masseoverførsel med stigende hastigheden i intervallet 0 - 1000 $\frac{m}{t}$ og derudover ingen signifikant effekt. Masseoverførslen er fundet mulig at modellere ud fra overfladearealet med en lineær tendens og ud fra partikel diameteren og intervalet mellem mindste og største diameter i en fraktion i form af Deq (ækvivalent partikel diameter). Der er fremstillet en model til beskrivelse af den optimale dimension af selve filteret samt den optimale LECA fraktion ift. omkostninger pr. år, hvilket har vist at LECA fraktioner med en minimums diameter på 2 mm og et interval på over 6 mm er at foretrække som fraktion i et biofilter.

Forord

Dette studie er produceret af Sebastian Ravn, speciale studerende i Miljøteknologi under fakultetet Engineering, Science and Medicine på Aalborg Universitet. Studiet er udført i perioden 1. september 2011 til 18. maj 2012.

Studiets tema er Masseoverførsels koefficienter i porøse filtermaterialer i biofilter til fjernelse af lugtstoffer fra ventilations luft fra svinestalde.

Studiet indeholder et hoved studie, appendiks og bilag i form af en CD. Henvisninger til bilag i rapporten er beskrevet med "bilag 1". Bilag 1 indeholder rå data fra udført forsøg, kilder brugt i studiet samt en digital version af studiet.

Studiet er udført med formålet at give læseren et overblik omkring emnet, problemer og løsninger på dette. Appendiks og bilag er supplement til hoved studiet.

Metoden anvendt som kildehenvisning i studiet er efternavn på forfatter og året for udgivelsen vist i firkantede parenteser, [Efternavn, år] i rapporten. Alle referencer kan ses i litteraturlisten bagerst i studiet.

English summary

Pig production is a large industry in Denmark. Unfortunately, it is also an industry which results in significant odour problems to its surroundings. Due to an increase in both numbers and size of Danish pig farms and also urbanisation of land areas, the odour problems are increasing. Solutions to the problem have to be found, in orders to preserve the opportunity for increases in pig productions for the future and just to overcome the problem. One of the solutions to the problem is to clean the ventilation air using a bio filter, but the impact on the odour is still not optimal and there is major cost involved because of the large amounts of air that have to be cleaned. This project will focus on the effect of gas velocity, surface area and particle size distribution on mass transfer coefficients in the gas phase.

Experiments are made in a constructed model of a bio filter where the gas phase used is CO_2 in atmospheric concentration and the liquid phase is water added sodium hydroxide to a 1 M concentration. The filter medium used is 36 LECA fractions with uniform particle size distribution and different surface area and a Munter's cellulose filter. Experiments are performed to study the effect of gas velocity, surface area and the particle size distribution on the mass transfer in the gas phase.

Result for experiments with LECA as filter medium showed that in the studied area of gas velocity $1000 - 4000 \frac{m}{t}$, there are no significant effect on the mass transfer. Result for Munter's filter showed that the gas velocity in the range $0 - 1000 \frac{m}{t}$ had an increasing effect on the mass transfer with an increasing velocity. Above 1000 no significant effect was observed.

Experiments with 36 LECA fractions have shown that the mass transfer can be described on the basis of the surface area with a linear regression. Results have also shown that the mass transfer can be described from the Range and particle diameter in the form of D_{eq} , equivalent particle diameter, with the model $k_G a_w = 157.85 \cdot D_{eq}^{-0.75}$. The models are only valid for uniform particle size distribution and with LECA as filter medium.

Experiments with LECA as filter medium show that the smallest fractions, 2-4 mm have the highest mass transfer. In a bio filter, not only a good mass transfer describes a good filter medium, but also a low pressure drop across the filter. If the mass transfer as well as the pressure drop is taken into account, there is no significant difference between the 36 fractions in proportion to be the best fraction for filter medium.

A model is constructed to describe the most cost effective construction of a bio filter with LECA as filter medium with regards to $\frac{kr}{year}$ during a 10 year period. The model takes the removal efficiency, constructions cost and running costs into account and it shows that the most cost efficient filter can be made from LECA with a minimum diameter of 2 mm and a range above 6 mm. The model is only valid for LECA with uniform particle size distribution and for compounds with the resistance in the gas phase. There are also uncertainties related to the constructions costs and running costs.

Indholdsfortegnelse

1	Intr	oduktion	1
	1.1	Udviklingen i Dansk landbrug	1
	1.2	Forebyggelse af lugtgener	4
	1.3	Formål	7
2	Rap	portopbygning	8
3	Teor	i	9
	3.1	Filtermaterialet som et trefasesystem	9
	3.2	Biofiltre	10
		3.2.1 To film teori	10
4	Mat	erialer og metoder	14
	4.1	Anvendte filtermaterialer	14
		4.1.1 LECA	14
		4.1.2 Munters cellulose filter	15
	4.2	Karakterisering af filtermaterialer	16
	4.3	Forsøgsopstilling og forberedelse	17
		4.3.1 CO_2 som indikator gas	17
		4.3.2 Præparering af LECA og Munters filter	18
		4.3.3 Forsøgsopstilling	19
		4.3.4 Måling af masseoverførsel	19
	4.4	Blindprøver	21
	4.5	Databehandling	22
5	Resu	iltater og diskussion	23
	5.1	Udførte blindprøver	23
	5.2	Resultater for forsøg med LECA som filtermateriale	24
		5.2.1 Effekten af gas hastigheden på masseoverførslen	24
		5.2.2 Masseoverførslens sammenhæng mellem partikelfordeling og overfladeareal	26
	5.3	Resultater for Munters cellulose filter som filtermateriale	34
	5.4	Sammenholdning af LECA og Munters cellulose filter	35
	5.5	Sammenholdning af masseoverførsel og tryktab	35
	5.6		38
6	Kon	klusion	43
7	Pers	pektivering	44
A	Real	ktion mellem CO ₂ og basiske væsker	Ι

V

INDHOLDSFORTEGNELSE

B	Fysiske værdier for 36 LECA fraktioner	Ш
С	Blindprøver	IV
D	Tryktab for 36 LECA fraktioner	V
E	Model til mest økonomisk biofilter	VII

Introduktion

1

I dette afsnit vil landbrugets udvikling ift. problemer med lugt gener for det omkringliggende miljø blive beskrevet. Derudover vil der kort blive beskrevet metoder til reduktion af disse problemer. Der vil ligeledes blive beskrevet, hvad der idag har været fokus på ift. optimering af biofiltre og hvad der mangler at blive fokuseret på. Til sidst vil formålet med dette studie blive beskrevet

1.1 Udviklingen i Dansk landbrug

Med den stigende effektivisering af animalsk produktion ved at samle produktionen, stiger påvirkningen af det omkringliggende miljø. Figur 1.1 viser udviklingen af danske landbrug med hensyn til antallet (a) og størrelsen ift. antallet af hektar (b) [Dansk Landbrug, udat.]. Det ses tydeligt, at antallet af danske landbrug er faldende mens størrelsen er stigende.



Figur 1.1: Udviklingen for danske landbrug [Dansk Landbrug, udat.].

I stalden dannes der ved mikrobiel nedbrydning af husdyrgødning gasser som f.eks. metan CH₄, hydrogensulfid H₂S, kuldioxid CO₂, ammoniak NH₃ og flygtige organiske stoffer VOC hvoraf mange er stærkt lugtene. Disse gasser er hovedårsagen for luft forurening i og uden for stalden [Arogo et al., 2009]. Lugtgener for personer, som lever i nærheden af husdyrbrug, er et stigende problem, som dels skyldes, at brugene er blevet større samtidig med en tendens til udflytning fra by til land af personer, som gerne vil have lidt mere plads. Herudover sker der en urbanisering af bynære landområder, som medfører, at land og by kommer tætteret på hinanden. Disse faktorer er med til at øge lugtproblemet [Chen og Hoff, 1999]. Sammen med effektiviseringen af husdyrbrugene betyder den stigende størrelse en stigende husdyrproduktion, se tabel 1.1 [The National Committee for Pig Production, 2005].

Tabel 1.1:	Udviklingen	ı i dansk	svineproduktion	fra 1	1999 ti	l 2005	[The	National	Committee	for 1	Pig
	Production,	2005].									

År	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Søer, 1000 stk.	1080	1070	1130	1128	1141	1144	1150
Total produktion i mio.	22,5	22,4	22,9	24,0	24,3	24,7	25,2
Slagtet vægt, kg.	76,6	77,1	77,9	78,1	77,7	78,5	80,0

Denne stigning er med til at øge udledningen af lugtstoffer til omgivelserne yderligere. Tabel 1.2 viser den gennemsnitlige lugtudledning fra forskellige typer svinebrug.

Tabel 1.2: Lugtemission fra integreret svineproduktion med ca. 100 søer [Miljoeministeriet, Skovog Naturstyrelsen, 2006].

Dyregruppe	Antal dyr	Lugt OU _E /s/dyr	Fordeling af lugtemission i procent
Søer i farestald, delvist fast gulv	22	1584	9,5%
Søer i løbe-/drægtigstald	78	1248	7,5%
Smågrise, 7 – 30 kg	350	2474	14,8%
Slagtesvin, 30 – 102 kg, del- vist fast gulv	575	11385	68,2%
Samlet besætning	1025	16691	100%

Miljøministeriet og Skov- og Naturstyrelsen har fremlagt en ny lugtvejledning for husdyrhold. I denne vejledning er vejledende værdier for geneniveau ved etablering, udvidelse eller ændring af eksisterende svinehold. Tabel 1.3 viser vejledende grænser for lugtgeneniveauet og figur 1.2 viser den tilsvarende lugtintensitet [Miljoeministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, 2006].

Tabel 1.3:	Genekriterier	for lugt ved	etablering,	udvidelse	eller	ændring	af husdyrbrug	, herunder
	stalde o.lign. [Miljoeminist	eriet, Skov-	og Naturs	tyrels	en, 2006]	7.	

Kategori	Vejledende			
	geneniveau			
Eksisterende eller, ifølge kommuneplanens rammedel, fremtidigt	$5 \text{ OU}_E/\text{m}_3$			
byzone- eller sommerhusområde.				
Samlet bebyggelse i landzone ifølge definitionen fastsat i bekendtgørel-	7 OU _E /m ₃			
se om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning og ensilage eller om-				
råde i landzone, der i lokalplan er udlagt til boligformål, blandet bolig				
og erhverv eller til offentlige formål med henblik på beboelse, institu-				
tioner, rekreative formål og lignende.				
Etablering, udvidelse eller ændring ved enkeltboliger.	15 OU _E /m ₃			



Figur 1.2: Lugtintensitet i forhold til lugtkoncentration [Miljoeministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, 2006].

Størrelsen af lugtgenerne afhænger af forskellige parametre f.eks. årstiden, vindretningen og afstanden fra kilden. Om sommeren vil påvirkningen være størst pga. øget ventilationsbehov i staldene. Desuden vil den biologiske aktivitet være højere hvilket betyder øget produktion af lugtstoffer. Figur 1.3 viser geneniveauet som funktion af afstanden til kilden [Miljoeministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, 2006].



Figur 1.3: Afstand fra kilde ift. lugtemission [Miljoeministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, 2006].

Udviklingen med øget lugtemission fra husdyrbrug ser ud til at ville fortsætte og der skal derfor gøres noget aktivt for at mindske generne.

1.2 Forebyggelse af lugtgener

Der findes flere metoder, der kan anvendes til at reducere lugtemissioner fra husdyrbrug. Tabel 1.4 viser en oversigt over forskellige teknikker til fjernelse af lugt, deres virkemåde, effektivitet samt hvilke ulemper de har.

Tabel 1.4: Teknikker til reduktion af lugtgener fra animalske produktioner [Miljoeministeriet, Skovog Naturstyrelsen, 2006].

Teknik	Effekt overfor	Virkemåde	Begrænsninger	
	lugt			
Biologisk luftrensning, flade filtre, dvs. biobed af : halm + flis kokosnødde- skaller, bark, kompostblan- ding eller lign. organisk	Sikker effekt (60-90 % reduktion).	Lugtstoffer fanges i biofilm på materiale, hvor afgangsluft le- des igennem. Filteret holdes fugtigt ved forstøvning af vand i afgangsluften eller ved overris- ling af selve biobedet. Fjernel- se af lugtstoffer ved mikrobiel nedbrydning. Har typisk god ef- fekt mht. lugtreduktion. Ændrer lugtkarakteren til mindre gene- rende lugt.	Oftest meget dyrt at samle luft til central luftrensning uden for stald. Optager megen plads (ca $\frac{1m^2}{250\frac{m^3 luft}{t}}$) og kan derfor ikke passes ind al- le steder. Tykkere filterlag betyder mindre arealkrav men større mod- tryk og dermed store udgifter til el. Usikker effekt over for ammoniak. Nogle undersøgelser viser, at der kan udvikles lattergas (drivhusgas) i filtre med tykke biobede af kompost o.lign. Filtermateriale skal skiftes ofte (hvis halm mindst 1 gang om året). Meget dyrt at rense al afgang- sluften.	
Biologiske luftvaskere/tri- cklefiltre.	Sikker effekt (60-90 % reduktion).	Lugtstoffer fanges i biofilm på såkaldte "pads"af papir eller plast. Afgangsluft ledes igen- nem materialet. Filteret hol- des fugtigt ved overbrusning af pads. Fjernelse af lugtstof- fer ved mikrobiel nedbrydning. Har typisk god effekt mht. lug- treduktion ændrer lugtkarakte- ren til mindre generende lugt.	Oftest meget dyrt at samle luft til central luftrensning uden for stald. Løsningen er vindpåvirkelig så skal helst monteres i lukket sektion, hvilket er dyrt. Effektive decen- trale enheder er pt. kun udviklet til nybyggeri (disse optager plads i stalden). Ved fjerkræstalde kræ- ves en forudgående rensning for støv. Store ammoniakkoncentratio- ner kan forgifte filteret. Meget dyrt at rense al afgangsluften.	
Kemiske luftvaskere (syrescrubber).	Usikker effekt.	Luft ledes gennem renseenhe- der, som evt. kan være decen- tral og placeret direkte på tag. Luften kommer i kontakt med en svovlsyreopløsning, således ammoniak reagerer med syren – der dannes svovlsur ammo- niumsulfid, som kan anvendes som gødning.	Fjerner kun en meget lille del af lugtstoffer. Meget dyrt at rense al afgangsluften. Ved central rensning kan den ændrede placering af afkast i sig selv mindske lugtgener.	

Teknik	Effekt overfor lugt	Virkemåde	Begrænsninger
Forhøjede ven- tilationsafkast.	Sikker effekt (60-90 % reduktion) / usikker effekt.	Bedre opblanding af luft så koncentrationen fortyndes. Størst effekt tæt på stald. Effekten vil afhænge af meteo- rologiske forhold.	Hvis der kræves store forhøjelser af skorstene, kan det kræve ændring af tagkonstruktion og afstivning. Af- kast kan samles centralt og dermed forhøjes yderligere og placeres læn- gere væk fra naboer. Det er dyrt, hvis luft skal samles i centrale af- kast. Mindsker ikke ammoniakned- fald.
Skraber i gød- ning kanaler, evt. kombineret med køling.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Begrænser ammoniakemission.	Kan kun anvendes ved nye stalde.
Gyllekøling.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Mindre mikrobiel aktivitet.	Kølingen skal foregå i overfladen af gyllen (alternativt kan tilstræbes en lille gyllemængde i kanalerne f.eks. ved daglig udslusning). Vanskeligt at anvende ved renoveringer. Køle- behovet er størst, når der ikke er brug for den indvundne varme.
Overbrusning.	Ingen eller lille effekt på lugt / Usikker effekt.	Køler luft, dyr og overflader kortvarigt, binder støv og styrer dyrs gøde adfærd. Færre tilsvi- nede lejearealer. Kan have god effekt sammen med god mana- gement i øvrigt.	Relativ billig teknik, der er imple- menteret i mange svinestalde.
Naturlig venti- lation.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Lavere temperatur, åbne stalde.	Risiko for svineri på meget varme dage uden vind. Ikke muligt at rense luft, hvis det viser sig at være nød- vendigt.
Begrænset gylleoverfla- de, Hyppig udslusning af gylle.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Mindre fordampnings areal. In- gen gammel gylle i stalden.	Kan medføre større lugttoppe ved udslusning og kan derfor ikke an- befales til løsning af lugtproblemer med mindre udslusningstidspunk- terne vælges omhyggeligt med hen- blik på at reducere nabogenerne.
Mindre protein i foder.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Færre unedbrudte aminosyrer, som er substrat for mikroorga- nismerne i gødningen.	Er oftest allerede taget i brug. Yder- ligere reduktion vil kræve ekstra dyre syntetiske aminosyrer.
En større sam- menhængende beplantning mellem kilde og omboende.	Ingen eller lille effekt på lugt.	Større ruhedsgrad, hvilket gi- ver en bedre opblanding af luft. Kan i visse situationer og- så virke negativt. "Ude af sy- ne"–effekt.	Mangler viden, der kan føre til kon- krete anvisninger på den bedste pla- cering af beplantning.
Færre dyr i stal- den.	usikker effekt.	Sikker effekt. Der er mindre emission, såfremt der er samme ventilationsgrad pr. dyr og sam- me belægningsgrad som før. Anvendt staldareal skal altså begrænses (evt. kun om som- meren).	Mindre produktion er et dyrt virke- middel. Ingen virkning, hvis lugt- gener for nogle naboer kun stam- mer fra enkelte ventilationsafkast, og disse fortsat kører uændret. Van- skeligt at få lov til at gå tilbage til tidligere produktion pga. kontinui- tetsbrud.

Biofiltre er den mest brugte metode til fjernelse af lugt fra husdyrbrug og det er også denne metode, der har vist sig mest effektiv ift. fjernelse af lugt. Ulemperne ved biofilterne er domineret af prisen for at rense ventilationsluften som er høj og ligger på 30 - 50 kr. pr. produceret slagtesvin [Kai, udat].

Biofiltre kan spores helt tilbage til 1923 som ide til at kontrollere emissioner af H_2S fra rensningsanlæg. Det var dog først i 1950, at det første biofilter kørte med succes. Biofiltre blev først i 1967 indført til kontrol af lugtproblemer fra svinefarme. Udviklingen af effektive og billige biofiltre til husdyrbrug er først startet inden for de sidste årtier [Chen og Hoff, 1999].

Biofiltre er levende systemer, som fungerer ved at mikroorganismer gror på et medium inde i filteret. Disse mikroorganismer nedbryder lugtstoffer som f.eks. H_2S og NH^3 , som adsorberes i biofilmen. Biofilteret er derfor afhængig af to processer, sorption af stoffer i biofilmen og mikrobiologisk nedbrydning af lugtstofferne [Chen og Hoff, 1999].

For at biofiltre kan blive en gevinst for den enkelte landmand, skal driftsomkostningerne reduceres og effekten skal forhøjes. Dette kræver et filtermateriale, som har en stor kontaktflade med lugtstofferne, hvilket vil resulterer i et mindre filter. Filtermaterialet skal samtidig ikke have et stort tryktab, da det vil øge driftsomkostningerne. Filtermaterialet skal kunne holde i lang tid uden udskiftning og være billigt for igen at mindske omkostninger.

Der er mange parametre, der påvirker sorptionen af stoffer i biofilmen og nedbrydningen og derved effekten af biofiltre. Dette kan være gas flow, væske flow, pH, temperatur og filtermateriale. For at optimere biofilteranlæg er det derfor vigtigt at kende effekten af de forskellige parametre.

Janni et al., (2001) og Bohn (1996) har beskrevet vigtige parametre for et effektivt filtermateriale, som giver grobund for god mikrobiologisk aktivitet. Disse er specifikt overfladeareal, porøsitet, densitet, tilbageholdelse af fugt, tilgængelighed af næringsstoffer og partikel størrelse. Adu and Otten (1996) har rapporteret at partikel størrelsen i et biofilter har mere indflydelse på effekten end gas flowet gennem filteret [Delhomenie et al., 2002]. Barton et al. (1999) har vist, at fjernelse dybt i biofilmen var hæmmet af substrat mangel. Krichner et al. (1992) konkluderede, at et biofilter med kontinueret væske flow er hæmmet af ilt diffusion i biofilmen, mikrobiologisk nedbrydning og ekstern masseoverførsel. Picioreanu et al. (2000) udviklede en 2-D model til beskrivelse af fluxen af substrat ind i biofilmen og fandt derved, at denne proces var meget afhængig af den eksterne masseoverførsel. Kim and Deshusses (2003) observerede, at biofiltre med kontinueret væske flow, som operere med lave koncentrationer af H₂S og med kort opholdstid, var afhængig af gasflowet. Dette kan indikere, at den eksterne masseoverførsel var en hæmmende faktor. Kim and Deshusses (2006) udviklede filtermateriale med et stort overflade areal og opnåede en 2 – 1000 gange højre fjernelse end andre biofiltre [Kim og Deshusses, 2007a].

Eitner and Gethke (1987) og Leson and Winer (1991) har foreslået en minimal partikel størrelse på 4 mm for at minimere tryktabet over filteret, men samtidig opnå et tilstrækkeligt overfladeareal [Delhomenie et al., 2002].

Ud fra overstående er der i litteraturen meget information om processer, der har effekt på den biologiske del af biofilteret samt hvad effekten af væske flowet har på masseoverførslen. Der mangler til gengæld viden omkring, hvordan masseoverførslen bliver påvirket af partikelstørrelsesfordelingen, overfladearealet og af gas flowet.

1.3 Formål

Dette studie vil derfor fokusere på sammenhængen mellem masseoverførsel, gasflow rate, overfladeareal og partikelstørrelsesfordeling. Dette gøres i et simple opstillet biofilter system ved at måle gaskoncentrationer før og efter filteret som funktion af gasflow, overfladearealet og partikelstørrelsesfordeling. Biofilteret vil under forsøgene være befugtet for således at skabe forhold, der er så tæt på et virkeligt biofilter som muligt uden en opbygget biofilm. Filtermaterialet som anvendes er LECA i 36 fraktioner med forskellig overfladeareal og partikelfordeling og et Munters cellulose filter. Valget af disse filter skyldes, at LECA er et mere og mere anerkendt filtermateriale og har mange af de kvaliteter, der kræves af et filtermateriale. De 36 LECA fraktioner giver også mulighed for at undersøge effekten af overfladearealet og partikelstørrelsefordelingen på masseoverførslen. Munters cellulose filter bliver idag brugt i mange biofilter pga. et meget lille tryktab hen over filteret. Målinger vil blive udført i en PVC kolonne, indeholdende 30 cm filtermateriale, der er tilsat en ventilationspumpe, hvor flowet kan reguleres og monitoreres. Gasstrømmen gennem filtermaterialet vil blive tilført over filteret, hvor væsketilførslen også sker. Koncentrationen måles lige før og lige efter filtermaterialtet.

 CO_2 vil blive anvendt som indikator gas for lugtstofferne ved atmosfærisk koncentration. Valget af CO_2 som indikator gas skyldes, at det er muligt, at kontrolere i hvilken fase, gas eller væskefasen, modstanden for masseoverførslen skal ligge. For at se på påvirkningen af overfladearealet og partikelstørrelsefordelingen skal modstanden ligge i gasfasen. Dette kan gøres ved at anvende NaOH som væskefase.

Ud fra disse undersøgelser opnåes en større viden om masseoverførslen i biofiltre og hvordan de derudfra kan optimeres og derved gøres mere effiktive og økonomiske.

Rapportopbygning



Dette afsnit beskriver kort rapportens opbygning og indhold. Rapporten indeholder foruden indledningen 5 afsnit. Det første afsnit er et teoriafsnit, der beskriver karaterseringen af porøse midier samt teorien for masseoverførsel mellem to faser i form af to film teori. Afsnittet beskriver ligeledes, hvordan et biofilter fungerer. Derudover beskriver afsnittet, hvordan masseoverførslen findes teoretisk.

Det efterfølgende afsnit giver en gennemgang af materialer og metoder brugt i den praktiske forsøgsdel. Der bliver beskrevet hvilke filtermaterialer, der er valgt og hvilke parametre der ændres på for de pågældende filtermaterialer. Derudover vises forsøgsopstillingen og der gives en detalieret gennemgang af forsøgene.

Derefter følger et resultatafsnit, som viser data og resultater fra de udførte forsøg. Resultaterne bliver vist, diskuteret og sammenlignet. Derudover præsenteres flere modeller til forudsigelse af masseoverførslen ud fra forskellige parametre. Resultatafsnittet afsluttes med en model til forudsigelse af det mest kost effiktive filter i forhold til omkostninger pr år.

Efter resultatafsnittet følger en konklusion. Dette afsnit udtager de vigtigste konklutioner gjort gennem forsøgene og resultatbehandling.

Rapporten afsluttes med en perspektivering. I perspektivering ses på hvilke forsøg der, yderligere kan fortages for at belyse emnet bedre samt hvordan modellen til forudsigelse af det mest kosteffiktive biofilter kan udbygges og gøres mere præcis.

Teori

I dette afsnit beskrives de styrende processer og parametre for gastransport og gas-væske masseoverførsel i et porøst filtermateriale. Derudover vil processerne i et biofilter blive beskrevet

3.1 Filtermaterialet som et trefasesystem

Ved brug af et porøst medie i et biofilter som filtermateriale kan de fysiske processer beskrives som et tre fasesystem, med faserne gas, væske (biofilmen) og partikler. Figur 3.1 viser sammenhængen mellem de tre faser. Tabel 3.1 viser de fysiske parametre, der beskriver faserne.



Figur 3.1: Trefasesystem for porøst filtermateriale.

Parametrene i tabel 3.1 beskriver de fysiske processer i et porøst medie. I de små pore vil der forekomme væske, mens der i de større pore vil være mulighed for gas strømning. Porøsiteten af mediet, er summen af porøsiteten i de enkelte partikler (for så vidt de er porøse) og den interpartikulære porøsitet (porøsiteten mellem partiklerne). Den effektive porøsitet er det pore volumen, hvor der er mulighed for gasstrømning. I befugtede medier bestående af porøse partikler med små porer (der vil være væskefyldte) eller porer der ikke er forbundet til omgivelserne, vil den effektive porøsitet, hvor der vil være gas flow. Det ydre overfladeareal beskriver overfladearealet på ydersiden af partiklerne under antagelse af, at de er ellipseformede og medtager ikke den indre overflade, som er tilstede ved porøse partikler.

	Symbol	Ligning	Enhed
Middel densitet partikler	ρ_p	$\frac{M_s}{V_s}$	kgpartikel m ³ partikel
Middel bukl densitet	ρ_b	$\frac{M_s}{V_t}$	$\frac{kgpartikel}{m^3}$
Porøsitet	φ	$\frac{V_w + V_a}{V_t}$	$\frac{m^3}{m^3}$
Volumetrisk vandindhold	θ	$\frac{V_w}{V_t}$	$\frac{m^3 vand}{m^3 filtermateriale}$
Gravimetrisk vandindhold	W	$\frac{M_{W}}{M_{S}}$	<u>kgvand</u> kgpartikel
Luftfyldt porøsitet	ε	$rac{V_a}{V_t} = \mathbf{\phi} \cdot \mathbf{\theta}$	$\frac{m^3 luft}{m^3 filtermateriale}$
Effektive porøsitet	ϵ_{ex}	$1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$	m ³ Aktivluft m ³ filtermateriale
Inaktiv luft indhold	ϵ_{in}	$\varepsilon - \varepsilon_{ex}$	$\frac{m^3 Inaktivluft}{m^3 filtermateriale}$
Darcy hastighed	ν	$\frac{Q}{A}$	$\frac{m}{s}$
Pore gas hastighed	u	$\frac{V}{\varepsilon_{ex}}$	$\frac{m}{s}$
Det ydre overfladeareal	S	$S = 4\pi \left(\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3}\right)^{\frac{1}{p}}$	m ²

Tabel 3.1: Fysiske parametre for porøse filtermaterialer.

3.2 Biofiltre

Biofiltre er som nævnt i afsnit 1 levende systemer der nedbryder evt. lugtstoffer, der kommer gennem filteret. Når luften passerer gennem filteret diffunderer stofferne over i væskefasen og derfra ind i biofilmen. Mikroorganismer absorberer stofferne og nedbryder dem. Stofferen kan også adsorbere til partiklerne. Ilt og næringsstoffer skal ligeledes diffundere ind til mikroorganismerne for at opnå nedbrydning af stofferne. På figur 3.2 ses de forskellige processer, der forgår i biofiltret [Devinny og Ramesh, 2005].



Figur 3.2: Processer i en biofilm, frit efter [Devinny og Ramesh, 2005].

3.2.1 To film teori

For at stoffer i gasfasen kan nedbrydes af mikroorganismerne, der befinder sig i væskefasen (biofilmen), skal der ske en diffusion af stofferne over i væskefasen. Det, der trækker denne diffusion, er en koncentrationsgradient, som skabes mellem de to faser. Denne flux kan beskrives med en to films teori. På figur 3.3 er vist mekanismen for to film teorien.



Figur 3.3: Grænsefladen mellem gas og væskefasen med flux af stof fra gasfasen til væskefasen.

Mellem de to faser, gas- og væskefasen, vil der dannes et grænselag, hvor der vil være en stillestående gasfasen og en stillestående væskefase. Hen over disse faser vil der skal en diffusion, som er drevet af en koncentrationsgradient som også ses på figur 3.3. Med henvisning til figur 3.3 kan fluxen af et stof (A) gennem denne grænseflade, beskrives som to individuelle masseoverførsler med hver deres masseoverførsels konstanter og koncentrationsgradienter se ligning 3.1 og 3.2. Der opskrives en ligning for fluxen af stof (A) gennem grænselaget i gasfasen og en ligning for fluxen af stof (A) gennem grænselaget.

$$J_A = k_G \left(p_{1,G} - p_{1,i} \right) \tag{3.1}$$

$$J_A = k_L (c_{1,i} - c_{1,L}) \tag{3.2}$$

Hvor

J_A	Fluxen
k_G	Masseoverførselskoefficient for gasfasen
$p_{1,G}$	Partialtryk af stof i bulk gasfasen
$p_{1,i}$	Partialtryk af stof i grænsefladen
k_L	Masseoverførselskoefficient for væskefasen
$c_{1,i}$	Koncentrationen af stof i grænsefladen
$c_{1,L}$	Koncentrationen af stof i bulk væskefasen

Da det ikke er muligt at bestemme grænselags komponenterne og beskrive masseoverførslen ved hjælp af bulk koncentrationerne (koncentrationerne i den ikke stillestående gas- og væskefase), opskrives der derfor et udtryk for en overordnet masseoverførsel, se ligning 3.4 og 3.3. Dette er baseret på en overordnet koncentrationsgradient, hvor der indføres en ikke eksisterende gasfase koncentration p_1 * og en ikke eksisterende væskefase koncentration c_1 *, som er i ligevægt med hhv. koncentrationen i bulk væskefasen og bulk gasfasen.

$$J_A = K_G \left(p_{1,G} - p_1^* \right) \tag{3.3}$$

$$J_A = K_L \left(c_1^* - c_{1,L} \right) \tag{3.4}$$

Hvor

 K_G Overordnet masseoverførselskoefficient for gasfasen p_1^* Ligevægtskoncentration i gasfasen K_L Overordnet masseoverførselskoefficient for væskefasen c_1^* Ligevægtskoncentration i væskefasen

Dette medfører også følgende ligninger ud fra ligevægt betragtningen.

$$p_{1,i} = H_G \cdot c_{1,i} \tag{3.5}$$

$$p_1^* = H_L \cdot c_{1,L} \tag{3.6}$$

Hvor

H_G	Henry's lov konstant $\left[\frac{C_G}{C_L}\right]$
H_L	Henry's lov konstant $\begin{bmatrix} C_{\overline{G}} \\ C_L \end{bmatrix}$

Ved antagelse af at der ikke sker nogen akkumulering af stof i grænselaget, kan der ud fra overstående udledes ligninger for den totale masseoverførsel på væske og gas siden som følger:

$$K_G = \left(\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}\right)^{-1} \tag{3.7}$$

$$K_L = \left(\frac{1}{k_G \cdot H} + \frac{1}{k_L}\right)^{-1} \tag{3.8}$$

Alt efter hvilke stoffer der arbejdes med, vil modstanden være dominerende i enten væskefasen eller gasfasen. For stoffer med en høj Henry's konstant vil modstanden primært ligge i væskefasen, hvilket medfører at disse stoffer nemt kan strippes fra væskefasen. Modsat vil stoffer med lav Henry's konstant primært være begrænset i gasfasen, hvilket medfører at stoffer nemt opløses [Dvorak et al., 1996].

Grunden til dette skyldes den koncentrationsgradient den opstår og som er den drivende kraft. For stoffer med høj Henry's konstant vil det ikke være muligt at opbygge en stor koncentrationsgradient over væske grænselaget, som vil medvirke til at denne bliver den begrænsende modstand. Det modsatte gør sig gældende for stoffer med lav Henry's konstant.

Modstandens størrelse i enten gasfasen eller væskefasen afhænger hovedsagligt af grænselagets tykkelse. Tykkelsen af væske grænselaget påvirkes af forskellige faktorer som væske flowet og viskositeten, hvor gas grænselaget påvirkes af faktorer som gas flowet og partikelfordelingen. Ved at ændre på disse parametre kan modstanden øges eller sænkes [Lewis og Whitman, 1924].

Til beskrivelse af masseoverførslen benyttes Onda korrelationen foreslået af Onda et al. [1968], da det er den mest brugte og mest præcise til fit af data. Onda korrelationen for gasfasen kan ses i ligning 3.9.

$$k_G = 5,23 \left(\frac{Q_L \rho_L}{A a_T \mu_L}\right)^{0,7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G}\right)^{\frac{1}{3}} (a_T d_p)^{-2} a_T D_G$$
(3.9)

Hvor

- Masseoverførselskonstanten for gasfasen $\left[\frac{1}{t}\right]$ k_G
- Q_G
- Gas flowet $[\frac{m^3}{t}]$ Densiteten af gasfasen $[\frac{kg}{m^3}]$ Tværsnitsarealet $[m^2]$ ρ_G
- Α
- Total effektive overfladeareal $[\frac{m^2}{m^3}]$ Viskusiteten af gasfasen $[\frac{kg}{m^3 \cdot t}]$ Diffusiviteten i gasfasen $[\frac{m^2}{t}]$ a_T
- μ_G
- D_G
- Partikelfordelingen [m] d_p

Kim og Deshusses [2007b] har simplificeret Onda korrelationen til ligning 3.10.

$$k_G a_w = C_2 U_G^{i2} \tag{3.10}$$

Hvor

Vådt effektive overfladeareal $[\frac{m^2}{m^3}]$ a_w Konstant C_2 Hastigheden i gasfasen $[\frac{m^2}{t}]$ U_G i2 Konstant

Ud fra ligning 3.10 kan masseoverførslen bestemmes ud fra hastigheden, ved hjælp af konstanter.

Materialer og metoder

4

I dette afsnit beskrives metoden til bestemmelse af effekten af overfladearealet, partikelfordelingen og gas flowet på masseoverførslen. De valgte filtermaterialer vil blive beskrevet samt en detalieret gennemgang af de udførte forsøg. Der vil ligeledes blive beskrevet formler og modeller brugt til databehandling.

4.1 Anvendte filtermaterialer

I dette studie er der anvendt to filtermaterialer LECA og et Munters cellulose filter. LECA'en anvendt i dette studie er leveret af Weber A/S Randers, Danmark og Munters filteret er leveret af Skov A/S.

4.1.1 LECA

Hovedfiltermaterialet benyttet i dette studie var LECA (Light Expanded Clay Aggregates). LECA er et uorganisk filtermateriale, som benyttes mere og mere. LECA er fremstillet ud fra ler, som er pelleteret og derefter brændt i en roterende ovn ved meget høj varme. Under brændingen ekspandere kuglen og ydersiden smelter og der sker en sintring se figur 4.1.



Figur 4.1: LECA kugler.

Dette medfører, at kuglerne bliver lette, porøse og modstandsdygtige overfor tryk. Det er et uskadeligt materiale, som er inert og med en neutral pH. Det er modstandsdygtig overfor frost, kemikalier og opløses ikke i vand. Derudover nedbrydes det ikke biologisk. Disse egenskaber gør det optimalt som filtermateriale i et biofilter [Claytek, 2011].

8 LECA fraktioner med uniform partikelfordeling blev leveret. Hver af de 8 LECA fraktioner har et interval (R) på 2 mm svarende til afvigelsen mellem den største og mindste partikel diameter i hver fraktion. Afstanden mellem den mindste og største partikel diameter i en fraktion vil i det efterfølgende blive benævnt som interval. De 8 fraktioner havde en middel diameter (D_m) på hhv. 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 og 17 mm. Ud fra de 8 fraktioner blev der yderligere fremstillet 28 fraktioner, 4 af de 36 fraktioner kan ses på figur 4.2.



Figur 4.2: 4 fraktioner af LECA, 2-4 mm, 4-14 mm, 2-8 mm og 16-18 mm.

For at fremstille en fraktion med R = 4 og Dm = 4, blev lige store mængder (målt som masse) af fraktionerne 2-4 mm og 4-6 mm blandet. Denne fremgangsmåde blev benyttet til at generere 7 fraktioner med R = 4 mm og Dm = 4, 6, 8, 10, 12, 14 og 16 mm. En del af disse fraktioner blev herefter benyttet til fremstilling af 6 fraktioner med R = 6 og så fremdeles. Alle 36 fraktioner kan ses i figur 4.3 ift. interval og middel diameter.



Figur 4.3: De 36 LECA fraktioner med interval og middel diameter.

4.1.2 Munters cellulose filter

Filteret er fremstillet af cellulose pap. Det er et fikseret filter, hvor pappet er bølget og sat sammen, så der dannes luftkanaler ned gennem filteret og for at opnå en stor overflade. Munters cellulose filter kan ses på figur 4.4.



Figur 4.4: Munters cellulose filter.

4.2 Karakterisering af filtermaterialer

Middel rumvægten, ρ_b , for tørret Leca blev tredobbelt bestemt ved at fylde en 20 L spand helt med LECA, hvorefter spanden blev tabt fra 3 – 5 cm højde for at sikre en ensformig pakning. Spanden blev herefter fyldt med ekstra LECA for at fylde det volumen op, der fremkom af pakningen, hvorefter den blev vejet og rumvægten beregnet som:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \tag{4.1}$$

Hvor

$$\begin{array}{l}\rho_b & \text{Middel rumvægten } \left[\frac{g}{cm^3}\right]\\ M_s & \text{Massen af LECA partikler } \left[g\right]\end{array}$$

$$M_s$$
 [Massell at LECA particle

$$V_t$$
 | Total volumen $[m^3]$

Middel partikeldensiteten for LECA, ρ_p , er fundet ved at der for hver fraktion med R = 2 mm, blev udtaget 10 partikler tilfældigt og disse blev vejet. For hver partikel blev den længste diameter målt. Herefter måltes den længste diamete vinkelret herpå og endelig diameteren vinkelret på de to første. Volumen af hver partikel blev herefter bestemt under antagelse af elliptisk form og udregnet ud fra de 3 målinger af diameteren. Se ligning 4.2 for bestemmelse af ρ_p .

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \tag{4.2}$$

Hvor

 $\begin{array}{l} \rho_p & \text{Middel partikel densiteten } \left[\frac{g}{cm^3}\right] \\ V_s & \text{Volumen partikel } \left[m^3\right] \end{array}$

For fraktioner med R > 2 mm blev ρ_p udregnet som et vægtet gennemsnit af middel partikel densiteten for alle R = 2 mm fraktionerne brugt til fremstilling af R > 2 mm fraktionerne.

Den effektive porøsitet ε_{ex} er udregnet ud fra middel rumvægten og middel partikel densiteten, se ligning 4.3.

$$\varepsilon_{ex} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \tag{4.3}$$

Det ydre overfladeareale, S, er fundet ud fra antagelse af ellipseformede partikler og ved en tilnærmet ligning for overfladearealet af en ellipse, se ligning 4.4. Arealet blev bestemt ud fra de målte partikeldiametre.

$$S = 4\pi \left(\frac{a^{p}b^{p} + a^{p}c^{p} + b^{p}c^{p}}{3}\right)^{\frac{1}{p}}$$
(4.4)

Hvor

S | Det ydre overfladeareal $[m^3]$

$$a$$
 Længste diameter $[m]$

b | Diameter vinkelret på a [m]

- c Diameter vinkelret på a [m]
- p | Konstant = 1,6075 [-]

Det er kun den ydre overflade, der antages at have betydning for masseoverførslen og det er derfor kun den, der omtales, hvis andet ikke nævnes. Grunden til denne antagelse skyldes, at gas strømmen vil strømme i de eksterne pore og da det antages, at de interne pore er væske fyldte. Middel rumvægten, middel partikel densiteten, den effektive porøsitet og det ydre overfladeareale kan ses i appendiks B for hver LECA fraktion.

Overfladearealet for Munters cellulose filteret er opgivet fra Skov A/S.

4.3 Forsøgsopstilling og forberedelse

4.3.1 CO₂ som indikator gas

 CO_2 blev i dette studie brugt som indikator for lugtstofferne fra f.eks. svinestalde. CO_2 har en høj Henry's konstant, 29 $\frac{atm}{M}$ [Rolf Sander, 1999] og modstanden for masseoverførslen vil derfor ligge i væskefasen. For at undersøge sammenhængen mellem partikelstørrelsesfordelingen, overfladearealet og gas flowet, skal modstanden ligge i gasfasen, da væskefasen ikke vil ændres synderligt ved ændringer i disse parametre. Ved at fjerne modstanden i væskefasen kan masseoverførselskoefficienten bestemmes for gasfasen og det kan undersøges, hvordan denne har en sammenhæng med partikelfordelingen, overfladearealet og gas flowet. Dette gøres ved at anvende 1 M NaOH som væske, som vil bevirke, at der skabes en stor koncentrationsgradient i væskefasen, som vil medføre, at transporten af stof i væskegrænselaget bliver stor. Dette sker, da reaktionen mellem NaOH og CO_2 er meget hurtig, hvilket betyder, at modstanden flyttes til gasfasen. Reaktionsmekanismen for reaktionen mellem CO_2 og basiske opløsninger kan ses i appendiks A.

4.3.2 Præparering af LECA og Munters filter

Den lufttørre LECA blev iblødsat i en særlig fremstillet beholder i en time i en i 1M NaOH opløsning fremstillet via fortynding fra 32,5 % ren NaOH fra Bie & Berntsen. Se figur 4.5(a) for beholder og figur 4.5(b) for iblødsætning.



(a) Beholder til iblødsætning af Leca.

(b) Iblødsætning af LECA i 1 M NaOH.

Figur 4.5: Iblødsætning af LECA før kørsel af forsøg.

Ved gentagne forsøg med den samme fraktion blev der anvendt en iblødsætningstid på 10 min mellem hvert forsøg. Før LECA'en blev påfyldt kolonnen efter iblødsætning afdryppede den i 10 min. Figur 4.6 viser proceduren for iblødsætningen for en fraktion der analyseres ved flere flow hastigheder. Grunden til iblødsætningen var for at sikre en ens væskeoverflade på LECA'en gennem de forskellige forsøg.



Figur 4.6: Proceslinje over iblødsætning proceduren for LECA fraktion der analyseres ved flere gas flow.

Munters cellulose filter gennemgik samme procedure som LECA'en, dog blev den kun iblødsat 10 før første måling og ikke en time som for LECA'ens vedkommende. Dette antages, at skabe en ensartet væskeoverflade på overfladen svarende til den væskeoverflade der skabes på LECA'en.

4.3.3 Forsøgsopstilling

Masseoverførslen blev bestemt i følgende forsøgsopstilling, se figur 4.7



Figur 4.7: Forsøgsopstilling af simpelt biofilter brugt under de udførte forsøg.

På figur 4.7 ses forsøgsopstillingen brugt til masseoverførselsforsøgene. Der placeres et 30 cm filter i kolonnen, som overrisles med NaOH og det ønskede flow indstilles. CO₂ målinger tages over og under filteret. Prøverne pumpes ud og føres gennem en aerosol fanger og derefter over i et målekammer indeholdende CO₂ sencoren.

4.3.4 Måling af masseoverførsel

Masseoverførslen blev undersøgt i forhold til overfladeareal og partikelstørrelsesfordeling med konstant gas flow, 30 $\frac{m^3}{t}$, og NaOH tilsætning, 1 $\frac{l}{t}$ for alle 36 LECA fraktioner. CO₂ blev tilsat i form af atmosfærisk luft. For 4 udvalgte LECA fraktioner (2-4, 16-18,6-14 og 2-18 mm) blev der foretaget målinger for flere forskellige gas flow, 10, 20, 30, 40 og 50 $\frac{m^3}{t}$. Disse 4 fraktioner er valgt på bagrund af, at det er de tre yderpunkter og midtpunktet i fraktions opdelingen, se figur 4.3. Disse antages derfor at være representative for hele dataserien med hensyn til flow afhængighed.

For Munters filteret blev der ligeledes kørt med forskellige gas flowet, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 250 og 400 $\frac{m^3}{t}$, for at se effekten af masseoverførslen ift. flow hastigheden.

Efter iblødsætning og afdrypning blev en LECA fraktion hældt i en 100 cm høj PVC kolonne, indre

diameter 23,4 cm. I kolonnen var der monteret en vandret skillevæg, af rustfri hulplade, huldiameter 2 mm, 37 cm nede i filteret. Mængden af LECA der blev påfyldt svarede til en filterdybde på 30 cm. Efter første påfyldning blev hele kolonnen tabt 5 cm over gulvet for at opnå ens pakning og der blev påfyldt ekstra LECA hvis nødvendigt for at opnå 30 cm filter. Se figur 4.8 for PVC kolonne med og uden LECA.



Figur 4.8: PVC kolonne til masseoverførsels analyse med og uden 30 cm LECA filter.

Efter pakning blev kolonnen tilsluttet systemet, hvor gas flowet blev leveret af en CUBUFAN 160 EC ventilationspumpe (Jenk, Brøndby Denmark). 42 cm over filter toppen var monteret en dyse til tilsætning af 1 M NaOH under forsøget. For at opnå optimal fordeling af NaOH'en over toppen af filteret var dysen opadvendt og et tryk på 1 atm. var tilsat for at opnå forstøvning. Tilsætningen af 1 M NaOH blev gjort for at opretholde en væskeoverflade på LECA'en og for at undgå udtørring. NaOH'en blev tilsat med et flow på 1 $\frac{L}{h}$ med en Iwaki Målepumpe med en max kapacitet på 100 ml/min og en slag frekvens mellem 12 og 120 spm. Flowet er kontinuert men lavt, og det vil derfor ikke virke som en biovasker men et biofilter trods den kontinuere tilsætning.

Efter tilslutning af kolonnen til systemet blev tilsætningen af NaOH tændt og gas flowet blev indstillet til det ønskede for den pågældende fraktion. For de 32 fraktioner hvor der kun blev undersøgt ved et flow, blev flowet indstillet til 30 $\frac{m^3}{t}$. Ved opnået flow blev målingen af CO₂ masseoverførslen startet.

For de 4 fraktioner hvor masseoverførslen blev bestemt ved flere flow, blev flowet først indstillet på 30 $\frac{m^3}{t}$. Efter måling ved 30 $\frac{m^3}{t}$ blev LECA'en iblødsat, se afsnit 4.3.2, hvorefter fraktionerne igen blev analyseret, her ved 10 $\frac{m^3}{t}$. Derefter blev fraktionerne analyseret ved hhv. 20, 40 og 50 $\frac{m^3}{t}$.

Munters cellulose filter gennemgik samme procedure som for fraktioner der blev analyseret ved flere flow. Her blev der dog også analyseret ved flowene 100, 250 og 400 $\frac{m^3}{t}$.

 CO_2 koncentrationen blev målt med en CO_2 /luftfugtighed/temperatur datalogger med en (non-dispersive infrarød) CO_2 sensor. Målingen blev først taget over filteret, hvorefter en måling blev taget under filteret. Dette blev gentaget 5 gange. Prøven til CO_2 målingen blev udtaget gennem en udtagnings dyse, som var placeret i midten af kolonnen hhv. 2 cm over og 8 cm under filteret. Prøven blev udsuget med en vacum pumpe med et flow på 0,18 $\frac{m^3}{t}$, som sugede luft ind hhv. over og under filteret

og førte luften gennem en aerosol fjerner, bestående af vat, hvorefter luften blev pumpet ind i et udskiftnings kammer indeholdende CO_2 sensoren. Målingen blev aflæst ved stabil CO_2 koncentration, svarende til ca. 2 min efter pumpen blev tændt. Figur 4.9(a) og 4.9(b) viser aerosol fjerner og kammer med CO_2 sensor.



(a) Aerosol fjerner. (b) Kammer med CO₂ sensor.

Figur 4.9: Behandling af luften til CO₂ målingen.

Efter første analyse af CO_2 masseoverførslen i en fraktion blev LECA'en hældt af kolonnen og iblødsat, se afsnit 4.3.2 for iblødsætnings procedure. Efter iblødsætningen og afdrypningen blev LECA'en igen hældt på kolonnen og der blev udført en dobbeltbestemmelse.

Under hele forsøgsperioden blev pH kontrolleret med MERCK pH indikator strips for at opretholde pH over 14 i NaOH opløsningerne. Hvis dette ikke var tilfældet blev den pågældende NaOH opløsning udbyttet. Derudover blev flowet logget under hele forsøget med en frekvens på $\frac{1}{sek}$.

4.4 Blindprøver

Der blev udført Blind prøver (tom kolonne) for at beskrive, størrelse af masseoverførslen som selve kolonnen bidrager med og ikke selve filteret. Blind prøverne blev udført ved forskellige flow hhv. 10, 20, 30, 40 og 50 $\frac{m^3}{t}$. Kolonne uden filtermateriale blev tilsluttet systemet og det ønskede flow blev indstillet. Herefter blev sprinkleren tændt og kørte i 2 min, hvorefter den blev slukket og CO₂ koncentration blev målt før filteret. Herefter blev sprinkleren igen tændt i 1 min, hvorefter CO₂ koncentrationen blev målt efter filteret. Herefter blev sprinkleren igen tændt i 2 min hvorefter CO₂ koncentrationen blev målt før filteret osv. Denne ferkvens blev gentaget 5 gange.

4.5 Databehandling

Masseoverførslen i gasfasen blev fundet ud fra ligning 4.5 [Kim og Deshusses, 2007a].

$$k_G a_w = \frac{Q_G}{V_e} ln \frac{C_{G,ind}}{C_{G,ud}}$$
(4.5)

Hvor

$$K_G$$
Masseoverførselskonstanten i gasfasen $[\frac{1}{t}]$ a_w Det våde aktive overfladeareal $[\frac{m^2}{m^3}]$ Q_G Gas flowet $[\frac{m^3}{t}]$ V_e Effektive filtervolumen $[m^3]$ $C_{G,ind}$ Koncentrationen i gasfasen lige før filteret [ppm] $C_{G,ud}$ Koncentrationen i gasfasen lige efter filteret [ppm]

Masseoverførslen fundet blev ligeledes forsøgt forudsagt ud fra forskellige parametre ved at fitte modeller til de fundende data. Modeller brugt kan ses i ligning 4.6.

$$k_G a_w = C \cdot Y^X \tag{4.6}$$

Hvor

- C Konstant
- *Y* Parameter til forudsigelse af masseoverførsle

X Konstant

De bedste fit af modellerne blev fundet ved at finde den midnste fejl i form af RMSE (Root Mean Squared Error) mellem de modelleret data og de målte data.

Resultater og diskussion

I dette afsnit vil resultaterne for de udførte forsøg blive præsenteret og diskuteret. Først vil blindprøverne kort blive beskrevet, hvorefter resultaterne med LECA som filtermateriale vil blive præsenteret og diskuteret. Resultaterne Munters cellulose filteret som filtermaterialet vil herefter blive præsenteret og diskuteret. Til sidst vil der blive præsenteret en sammenligning af de to filtermaterialer og en sammenligning af tryktab og masseoverførsel, samt en model til forudsigelse af mest kost effektive biofilter.

De 5 sammenhørende målinger af CO_2 koncentrationerne før og efter filteret ved hvert forsøg viste, at der sker et fald i fjernelsesraten i løbet af forsøget. Dette kan skyldes, at modstanden i væskefasen stiger, selvom den er minimeret ved tilsætning af NaOH til vandingsvandet. Dette skyldes formentlig, at mængden af natruimhydroxid der tilføres, ikke er helt stor nok til at sikre en CO_2 koncentration på 0 overalt i væskefasen, specielt nær luft-væske overfladen. Dette betyder, at modstanden i gasfasen er større end 0. Da det ønskes, at undersøge effekten af de forskellige parametre i gasfasen benyttes gennemsnittet derfor af den del af de første koncentrationsmålinger, som afviger mindre end 10 % fra den første måling under antagelse af, at denne måling repræsenterer det bedste bud på masseoverførslen. Rådata for alle forsøg kan ses i bilag 1.

5.1 Udførte blindprøver

Blindprøverne (tom kolonne) viste ingen nævneværdig fjernelse af CO_2 og det antages derfor, at kolonnens eget areal er ubetydeligt i forhold til arealet af filtermaterialet. Kolonnens areal udgør i gennemsnit 4 % af overfladarealet for de 36 LECA fraktioner. Resultaterne præsenteret i det følgende er derfor ikke korrigeret for CO_2 fjernelse på kolonnevæggene. Resultater for blindprøver kan ses i appendiks C.

5.2 Resultater for forsøg med LECA som filtermateriale

5.2.1 Effekten af gas hastigheden på masseoverførslen

I figur 5.1 er den relative fjernelse af CO_2 plottet som funktion af pore gas hastigheden for 4 LECA fraktioner 2-4 mm, 16-18 mm, 6-14 mm og 2-18 mm.



Figur 5.1: Relativ fjernelse af CO₂ i 4 LECA fraktioner som funktion af pore gas hastigheden.

De 4 fraktioner er valgt på baggrund af at opnå et billede af effekten på masseoverførslen for alle 36 LECA fraktioner. Derfor er de 3 fraktioner i hjørnerne valgt samt fraktionen i midten, se figur 4.3 for placering af de 4 fraktioner.

I figur 5.1 ses det, at for alle 4 fraktioner falder den relative CO_2 fjernelse med stigende pore gas hastighed, i det undersøgte område. Dette var ventet, da opholdstiden reduceres og mængden af CO_2 der skal fjernes øges ved øget pore gas hastighed. Tendensen for alle 4 fraktioner er, at fjernelses procenten er mindre og mindre påvirket af pore gas hastigheden. For fraktion 2-18 og 16-18 mm ser det ud til, at punkt nr. 3 ligger lidt højre end tendensen for de resterende punkter. Dette kan skyldes, at det er ved denne hastighed målingerne er foretaget først, hvor LECA'en har været iblødsat i 1 time, hvorimod LECA'en kun har været iblødsat i 10 min. mellem de andre målinger. Dette kan tyde på, at 10 min. ikke har været nok for igen at kunne opnå den samme aktivitet af natriumhydroxiden. Den samme tendens ses dog ikke for de resterende to fraktioner 2-4 og 6-14 mm og det tyder på, at 10 min iblødsætning mellem målinger har vært tilstrækligt.



I figur 5.2 er masseoverførslen for de 4 LECA fraktioner plottet som funktion af pore gas hastigheden.

Figur 5.2: Masseoverførslen af CO₂ i LECA som funktion af pore hastigheden.

Massenoverførslen er fundet for de 4 fraktioner ud fra ligning 4.5 og er plottet som funktion af pore gas hastigheden. De to første punkter for 2-4 mm fraktionen ligger på en minimum masseoverførsel og er formentlig højere, hvilket er indikeret med pile. Dette skyldes, at masseoverførslen ikke kan bestemmes ved 100 % fjernelse som figur 5.1 viser. Den målte koncentration efter filteret er derfor sat til detektionsgrænsen for CO₂ censoren på 1 ppm. Herudfra er masseoverførslen så regnet.

Figur 5.2 viser, at masseoverførslen af CO_2 ikke påvirkes i nogen bestemt retning af pore gas hastigheden i det målte interval. Dette skyldes formentlig at hastigheden er oppe på et niveau, hvor den ikke længere har en effekt. Det formodes, at ved lavere hastigheder vil den have en effekt, idet tykkelsen af det stationære gas grænselag nær væskeoverfladen er afhængig af gashastigheden ved lave gashastigheder. Stigende hastighed betyder tyndere grænselag, som vil medføre mindre modstand og derfor en højere masseoverførsel. I det undersøgte hastighedsinterval er grænselagets tykkelse formentlig så lav, at det kun vanskeligt kan gøres tyndere ved at øge hastigheden.

Kim og Deshusses [2007b] har undersøgt sammenhængen mellem masseoverførslen og pore gas hastigheden og har fundet, at hastigheden har en effekt svarende til pore gas hastigheden , $V^{0,4}$. Materialet anvendt er porøse keramiske kugler med en størrelse på 4 mm og pore gas hastigheden ligger i samme interval 500 - 3500 $\frac{m}{t}$. Dette antages, at kunne sammenlignes med LECA forsøgene. Der er opstillet en simpel model for sammenhængen mellem masseoverførsel og pore gas hastighed, se ligning 5.1. Modellen er opstillet ved at finde det bedste fit til målte værdier for masseoverførslen ved forskellige hastigheder ved at ændre på hhv. C og x. Modellen er fittet til resultater fra forsøg med LECA fraktioner 16-18 mm, 6-14 mm og 2-18 mm.

$$k_G a_w = C \cdot V^x \tag{5.1}$$

Hvor

$$k_G a_w$$
Masseoverførslen $\begin{bmatrix} 1 \\ t \end{bmatrix}$ C Konstant $\begin{bmatrix} - \end{bmatrix}$ V Pore gas hastighed $\begin{bmatrix} m \\ t \end{bmatrix}$ x Potens $\begin{bmatrix} - \end{bmatrix}$

I figur 5.3 er modelleret data af masseoverførslen ud fra hastigheden plottet som funktion af målte værdier af masseoverførslen ved forskellig hastigheder for de tre LECA fraktioner.



Figur 5.3: Model der beskriver masseoverførslen modelleret ud fra hastigheden for 3 LECA fraktioner.

Masseoverførslens sammenhæng med pore gas hastigheden er fundet til, for LECA fraktion 16-18 mm, 6-14 mm og 2-18 mm at være hhv. $V^{0,3}$, V^0 og $V^{0,2}$. Det viser ikke en tydelig sammenhæng, hvilket figur 5.2 også viser. Grunden til at modellen ikke viser det sammen som fundet af Kim og Deshusses [2007b] kan skyldes, at det ikke er det sammen filtermateriale, som benyttes. Det er ikke sikkert at masseoverførslens sammenhæng med hastigheden er den sammen for forskellige filtermaterialer. Det kan også skyldes størrelsen af filtermaterialet og partikelfordelingen, da det for de tre LECA fraktioner ses at der mellem dem ikke er en tydelig sammenhæng mellem masseoverførslen og hastigheden. Yderligere forsøg skal udføres for at beskrive dette nærmere.

5.2.2 Masseoverførslens sammenhæng mellem partikelfordeling og overfladeareal

I figur 5.4 og figur 5.5 ses et plot af hhv. den relative fjernelse af CO₂ som funktion af interval og middel diameter og den relative fjernelse som funktion af middel diameter og minimums diameter for de 36 LECA fraktioner ved et gas flow på 30 $\frac{m^3}{t}$.



Figur 5.4: Relativ fjernelse af CO₂ ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.



*Figur 5.5: Relativ fjernelse af CO*₂ *ift. minimums diameter og middel diameter for 36 LECA fraktioner.*

Figur 5.4 viser, at den relative CO_2 fjernelse stiger med faldende middel diameter. Dette skyldes at, overflarealet stiger men faldende middel diameter og derved større fjernelse. For intervallet gør det sig gældende, at den relative CO_2 fjernelse stiger svagt med stigende interval. Dette skyldes, at overfladearealet stiger med stigende interval. Derudover kan det skyldes, at ved større partikelfordelingen stiger turbulensen gennem filteret og derved større fjernelse. Det ses dog, at middel diameteren har en større indflydelse på fjernelsen. Grunden til dette skyldes, at intervallet ikke har den sammen indflydelse på overfladearealet som middel diameteren.

I figur 5.5 ses det at den relative CO_2 fjernelse stiger med faldende minimums diameter, hvilket skyldes at, overfladearealet stiger med faldende minimums diameter. Det sammen gør sig gældende for middel diameteren.



I figur 5.6 og figur 5.7 er fjernelsesprocenten omregnet til en masseoverførsel via ligning 4.5.

Figur 5.6: Masseoverførslen af CO2 ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.



Figur 5.7: Masseoverførslen af CO₂ ift. minimums diameter og middel diameter for 36 LECA fraktioner.

Figur 5.6 og 5.7 viser den sammen tendens som hhv. figur 5.4 og 5.5 bare ift. masseoverførslen. Dette skyldes de sammen forhold som nævnt ovenfor. Fraktionen 2-4 mm, interval = 2 mm og middel diameter = 3 mm, skiller sig lidt ud fra de resterende fraktioner, med en lidt højere masseoverførsel.

I figur 5.15 er masseoverførslen for de 36 LECA fraktioner plottet som funktion af overfladearealet, overfladearealet for de 36 fraktioner kan ses i appendiks B.



Figur 5.8: Masseoverførslen ift. det yder overfladeareal for de 36 LECA fraktioner.

I figur 5.15 ses, at masseoverførslen stiger med stigende areal. Sammenhængen mellem masseoverførslen og overfladearealet ser ud til at være lineær. Der er opstillet en simpel model for beskrivelse af masseoverførslen som funktion af overfladearealet, se ligning 5.2. Modellen er opstillet ud fra målte data af masseoverførslen ift. overfladearealet for de 36 LECA fraktioner, som er fittet til modelleret data.

$$k_G a_w = C \cdot a^x \tag{5.2}$$

Hvor

$$k_G a_w \quad Masseoverførsten \left[\frac{1}{t}\right] \\ C \quad Konstant \left[-\right] \\ a \quad Det ydre overfladearel \left[\frac{m^2}{t^3}\right] \\ x \quad Potens \left[-\right]$$

I figur 5.9 er modellen plottet ift. modelleret data som funktion af målte værdier. I figur 5.9(a) ses en lineær sammenhæng (x = 1) og i figur 5.9(b) ses det bedste fit af resultaterne.



Figur 5.9: Model til forudsigelse af masseoverførslen ud fra det ydre overfladeareal.

Det ses ud fra figur 5.9 at der ikke er den store forskel mellem en linær antagelse og det bedste fit af modellen. x-værdien for den bedst fitted model antager 1,06, hvilket ligeledes indikerer, at variationen er lille. Denne variation kan skyldes måleusikkerhed, hvis det antages, at forholdet skal være linæært. Det kan også skyldes, at ved at øge overfladearealet øges turbulens inden i filteret, som kan medvirker til et tyndere grænselag og derved større masseoverførsel. Da det bedste fit af modellen ligger meget tæt på en linæær tendens, antages det dog, at en linæær model kan bruges til at beskrive masseoverførslen ud fra overfladearealet. Nøjagtigheden af de to variationer af modellen indikerer også, at sammenhængen kan antages linæær, da der ikke er den store forskel i nøjagtigheden. RMSE og den relative fejl antager hhv. 1061 og 9,1 % for det linære fit og 1044 og 9 % for det bedste fit.

Denne afhængighed mellem masseoverførslen og overfladearealet kan sammenlignes med Onda kor-

relationen [Onda et al., 1968], se ligning 3.9. Det antages her, at alle værdier i den oprindelige Onda korrelation holdes konstante med undtagelse af a_T og at d_p omskrives til $\frac{1}{a_T}$. Det antages, at det totale effiktive overfladeareal (a_T) er befugted og indgår i masseoverførslen og betegnes (a_w). Dette medfører, at korrelationen kan reduceres til følgende.

$$k_G a_w = C \cdot a_w^{1,3} \tag{5.3}$$

Hvor

$$k_G a_w \quad Masse overførslen \left[\frac{1}{s}\right]$$

$$C \quad Konstant \left[-\right]$$

$$a \quad Det ydre overflade areal \left[\frac{m^2}{m^3}\right]$$

Dette medfører, at Onda korrelationen forudsiger en sammenhæng mellem masseoverførslen og overfladearealet svarende til $a^{1,3}$. Dette stemmer ikke overens med den funden model, som antager en lineær sammenhæng. Onda korrelationen er dog ikke fundet ud fra LECA som filtermateriale og dette kan skyldes, at der er en afvigelse.

I figur 5.10 og 5.11 er k_G plottet som funktion af interval og middel diameter og som funktion af minimums diameter og middel diameter.



Figur 5.10: Masseoverførslelskoefficienten k_G ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.



Figur 5.11: Masseoverførslelskoefficienten k_G ift. minimums diameter og middel diameter for 36 LECA fraktioner.

Det fundne overfladeareal af LECA fraktionerne er brugt til at finde k_G . k_G er fundet ved at dividere igennem i ligning 4.5 med det fundne areal.

Det ses i figur 5.10 og 5.11, at der ikke er nogen entydig sammenhæng mellem k_G og interval og middel diameter og middel diameter og minimums diameter. Der er ikke nogen sammenhæng med hvordan k_G stiger og falder og k_G er forholdsvis konstant i et stort område. Få steder er k_G højere end de resterende men der er ingen tydelig sammenhæng. Dette beskriver, at overfladearealet er den mest betydende faktor for masseoverførslen ved de undersøgte forhold, da k_G er forholdsvis konstant i det undersøgte område. Variationen i masseoverførselen i figur 5.6 og 5.7 skyldes variationen i overfladearealet for de 36 fraktioner.

Masseoverførslen afhænger af overfladearealet og overfladearealet afhænger af interval og diameter. Ud fra interval og middel diameter kan værdien D_{qe} (ækvivalent partikeldiameter) findes via formlen, se ligning 5.4, beskrevet af [Andreasen og Poulsen, 2012].

$$D_{eq} = \frac{2}{\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_m - \frac{R}{2}}}$$
(5.4)

Hvor

 $\begin{array}{l} D_{eq} \\ D_{m} \\ R \\ \end{array} \begin{array}{l} \text{AEkvivalent partikeldiameter } [mm] \\ \text{Middel diameter } [mm] \\ \text{Interval } [mm] \end{array}$

Ud fra denne betragtning er der fremstillet en model, der forudsiger masseoverførslen ud fra interval

og middel diameter, i form af D_{eq} , se ligning 5.5. Modellen er fundet ved at fitte målte data for masseoverførslen med modelleret data.

$$k_g a_w = 157,85 \cdot D_{ea}^{-0.75} \tag{5.5}$$

Figur 5.12 viser de modelleret værdier som funktion af de målte data.



Figur 5.12: Modelleret masseoverførsel ud fra D_{eq} , interval og middel diameter ift. den målte masseoverførsel for 36 LECA fraktioner.

Det ses ud fra figur 5.12, at det er muligt, at forudsige masseoverførslen ud fra interval og middel diameter. Denne forudsigelse støttes op af nøjagtigheden af modellen med en RMSE og en relativ fejl på hhv. 1341 og 9,9 %. Dette er dog kun gældende for uniform partikelfordeling. Modellen gælder for LECA fraktioner i det undersøgte interval og vil for andre filtermaterialer sandsynligvis antage samme form, dog med andre konstanter. Der skal flere undersøgelser til for at sige noget om modellens nøjagtighed for andre filtermaterialer og ved ikke uniforme fordelinger.

Denne model vil gøre det muligt at forudsige hvilket interval og middel diameter for LECA partikler der skal benyttes for at fjerne en vis mængde stof. Dette gælder kun for uniforme partikelfordelinger, men dette er normalt også tilgængeligt ved indkøb af filtermaterialer til biofiltre. Ved ikke uniform partiklestørrelsefordeling kan D_{eq} ikke beskrives ud fra den anvendte formel. Ved at ændre formlen for D_{eq} vil modellen formentlig også kunne bruges for en pågældnede ikke uniform partikkelstørrelsesfordeling.

5.3 Resultater for Munters cellulose filter som filtermateriale



I figur 5.13 er den relative CO₂ fjernelse plottet som funktion af pore gas hastigheden.

Figur 5.13: Relativ fjernelse af CO₂ ift. hastigheden for Munters cellulose filteret.

Figur 5.13 viser, at den relative fjernelse falder med stigende pore gas hastighed. Faldet er størst ved lave hastigheder, hvorefter det aftager ved højere hastigheder, hvilket også var ventet. Grunden til denne tendens skyldes, at ved højere hastigheder bliver opholdstiden for kort til at opretholde en høj relativ fjernelse.

I figur 5.14 er fremstillet et plot af masseoverførslen som funktion af pore gas hastigheden.



Figur 5.14: Masseoverførslen af CO₂ ift. hastigheden for Munters cellulose filteret.

Figur 5.14 viser, at ved lave pore gas hastigheder stiger masseoverførslen med stigende hastighed. Ved højere hastigheder har hastigheden mindre effekt på masseoverførslen. Dette skyldes formentlig, at ved lave hastigheder vil hastigheden have en effekt, idet tykkelsen af det stationære gas grænselag nær væskeoverfladen er afhængig af gashastigheden ved lave gashastigheder. Stigende hastighed betyder tyndere grænselag, som vil medføre mindre modstand og derfor en højere masseoverførsel. I det undersøgte hastighedsinterval bliver grænselagets tykkelse formentlig så lav, at det kun vanskeligt kan gøres tyndere ved at øge hastigheden og derfor ses det, at ved højere hastigheder er masseoverførslen ikke tydeligt påvirket af hastigheden.

5.4 Sammenholdning af LECA og Munters cellulose filter



I figur 5.15 er masseoverførslen plottet som funktion af overfladearealet for de to filter typer.

Figur 5.15: Masseoverførslen af CO₂ ift. det ydre overfladeareal for de 36 LECA fraktioner og Munters cellulose filteret.

For at sammenligne LECA filter med Munters cellulose filteret er de fundende masseoverførsler plottet mod overfladearealet. Det ses på figur 5.15, at masseoverførslen for Munters cellulose filteret ligger under masseoverførslen for LECA filteret ved samme overfladeareal og samme pore gas hastighed. Dette skyldes formentlig, at i Munters filteret har gas flowet en nemmere vej gennem filteret, da der i Munters filteret er fremstillet gas kanaler og gas grænsefladen vil ikke påvirkes i samme grad som i LECA filteret. Dette skyldes som nævnt, de kanaler der er i Munters filteret, som resulterer i, at der ikke forkommer den samme turbulens som i LECA filteret. I LECA filteret vil gas flowet skulle ændre retning mange gange gennem filteret, hvorimod det gennem Munters filter vil kunne komme igennem ved får retningsskift. Dette medfører, at der forkommer et større arbejde på den stationære gas grænseflade og den vil formentlig være tyndere i LECA filteret og derfor den større masseoverførsel pr. overfladeareal.

5.5 Sammenholdning af masseoverførsel og tryktab

Resultaterne viser, at for at opnå den bedste masseoverførsel skal overfladearealet være så stort som muligt, ved at anvende så små LECA fraktioner som muligt. Det er dog ikke sikkert, at det er den bedste løsning for et biofilter, da tryktabet ved små fraktioner vil være højre end for store fraktioner. Ved store tryktab stiger drift omkostningerne, hvilke ønskes reduceret.

Tryktabet er blevet bestemt af Andreasen og Poulsen [2012] for alle 36 LECA fraktioner. Ud fra tryktabsmålingerne er tryktabet ved en Darcy hastighed på 0,2 $\frac{m}{s}$, svarende til et flowet på ca. 30 $\frac{m^3}{t}$, fundet ved lineær regression, se appendiks D for metode og tryktab for de 36 LECA fraktioner og Munters cellulose filter.

Tryktabet i Munters filter er meget laverer end for de 36 LECA fraktioner, se appendiks D, og ses der på masseoverførslen pr tryktab, er forholdet mange gangere større for Munters filteret end for LECA fraktionerne. Dette er illustreret i figur 5.16.



Figur 5.16: Masseoverførslen af CO2 pr. tryktab for gennemsnittet af de 36 LECA fraktioner og Munters cellulose filteret. Fejllinier for de 36 LECA fraktioner indikerer maks og min værdi disse kan antage.

Det ses i figur 5.16, at forholdet mellem masseoverførslen og tryktabet er meget bedre for Munters filteret. Standardafvigelsen for LECA'en indikerer det maksimale og minimale masseoverførsel der kan opnås ved de testede LECA fraktioner. Dette forhold gør at Munters filteret egner sig som filtermateriale steder, hvor der skal kunne håndteres store flow som f.eks. fra en svinestald. I figur 5.17 er plottet tre figurer, der beskriver masseoverførslen, tryktabet og masseoverførslen pr. tryktab i forhold til interval og middel diameter for de 36 LECA fraktioner.



(a) Masseoverførslen ift. interval og middel diameter for 36 (b) Tryktabet ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner. LECA fraktioner.



(c) Masseoverførslen pr. tryktab ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.

Figur 5.17: Sammenholdning mellem masseoverførslen og tryktab for de 36 LECA fraktioner.

Det ses tydeligt ud fra figur 5.17, at ved kun at kigge på masseoverførslen, figur 5.17(a), er det de små fraktioner, der er bedst, hvorimod ved kun at kigge på tryktabet, figur 5.17(b), er det de store fraktioner der foretrækkes. Hvis disse kombineres, figur 5.17(c), ser billedet helt anderledes ud. Det ses, at forholdet mellem masseoverførsel og tryktab er forholdsvis konstant for fraktionerne i midten og at i hjørnerne er forholdet højere. Der viser sig dog ikke et tydeligt billede af, hvilke fraktioner der er at foretrække i et biofilter. Dette tydeliggører, at ved forudsigelse af den bedste egnede fraktion til brug i biofilter i en svinestald, skal der tages højde for både masseoverførsel og tryktab.

Modellerne der er fremstillet til forudsigelse af masseoverførslen ud fra forskellige parametre er vigtige værktøjer til design af biofiltre. De gælder som sagt kun under de undersøgte forhold. Med det antages, at de kan implementeres for andre filtermaterialer. Der er i dette studie fokuseret på effekten på gasfase modstanden for de undersøgte parametre og modellerne vil kun gælde for gasser, der har modstanden i gasfasen. Der skal flere undersøgelser, til for at kunne bestemme effekten i væskefasen.

5.6 Estimering af mest kosteffektive biofilter

Der er fremstillet en model til forudsigelse af det mest kost effektive biofilter ift. omkostninger pr. år med udgangspunkt i de 36 LECA fraktioner. Modellen er fremstillet på baggrund af data fra de udførte forsøg og den tilhørende model til beskrivelse af masseoverførslen ud fra D_{eq} . Til beskrivelse af omkostningerne ved bygning af et biofilter er data for opførsel af et BioFlex 2 filter fra SKOV A/S benyttet. Det antages, at disse data kan overføres til etablering af biofilter med LECA som filtermateriale. Ligninger for modellen og de benyttede omkostninger kan ses i appendiks E.

Masseoverførslen er fundet ud fra fra D_{eq} modellen, ligning 5.5. Ved antagelse af et flow på 10000 $\frac{m^3}{t}$ og en fjernelses procent på 95 % kan det krævede filtervolumen og den tilhørende opholdstid findes. Ved antagelse af en start filterdybde og en filterhøjde på 2 m kan tværsnitsarealet og længden af filteret findes. Ud fra filterlængden blev byggeprisen udregnet for de parametre, der er længde afhængige. Ud fra filtervolumen kan prisen på filtermateriale findes. Omkostninger for bygningen af bygningen til filteret er fundet ud fra en kvadratmeter pris og ved antagelse af, at bygningen skal være 4,05 m bredere end filteret og samme længde som filteret. Alle udgifter mht. til bygning af biofilteret og andre parametre benyttet i modellen kan ses i tabel 5.1.

	Værdi	Enhed
Flow	10000	$\frac{m^3}{t}$
Fjernelse	95	%
Filterhøjde	2	m
Omkostninger filtermateriale	1500	$\frac{kr}{m^3}$
Omkostninger filterlængde afhængige	1660	$\frac{kr}{m}$
Omkostninger bygning til filter	1000	$\frac{kr}{m^2}$
Engangsudgifter	158201	kr
El pris	2	$\frac{kr}{kWh}$
Energiforbrug ventilationspumpe	1,65	kWh pumpe
Levetid	10	år

 Tabel 5.1: Konstanter benyttet i model til beskrivelse af optimal dimension af biofilter med LECA som filtermateriale.

Drift omkostningerne for filteret er fundet ud fra tryktabet, som er fundet ud fra D_{eq} , se ligning E.9 [Andreasen og Poulsen, 2012].

$$\frac{\Delta P}{L} = A \left(D_{eq} \left(1 + \frac{c}{\left(D_m - \frac{R}{2} \right)^3} \right) \right)^{-2} \mu V + B \left(D_{eq} \left(1 + \frac{c}{\left(D_m - \frac{R}{2} \right)^3} \right) \right)^{-1} \rho V^2 \tag{5.6}$$

Hvor

A Konstant [-] Ækvivalent partikeldiameter [mm] D_{eq} Konstant [mm³] С Middel diameter [mm] D_m R Interval [mm] Luft viskositet $\left[\frac{Pa}{s}\right]$ μ VDarcy hastighed $\left[\frac{m}{s}\right]$ В Konstant [-] Luft densitet $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ ρ

Drift omkostninger er fundet ved at antage, at der kan findes en optimal pumpe til hver situation. Der er fundet et optimalt forhold mellem flow og tryktab ud fra en pumpekaratestik fra en JUVSC 630 ventilationspumpe og er antaget den værdi, hvor multiplikationen mellem tryktab og flow antager den højeste værdi. Skal der benyttes et højre flow eller skal der overvindes et større modtryk benyttes der flere pumper, det antages, at der f.eks. kan anvendes 1,2 pumper. Mængden af pumper multipliceres med strømforbruget og med kWh prisen. Se appendiks E for pumpekaratestik og udregninger. Ud fra alle omkostningerne findes omkostningerne pr. år ved at antage, at systemet holder i f.eks. 10 år. For at finde den mest optimale filter dimension ift. tykkelse og tværsnitsareal ændres filtertykkelsen til omkostningerne pr. år bliver mindst.

I figur 5.18 og 5.19 er afbilledet pris pr. år i 10 år som funktion af filterdybden for hhv. LECA fraktioner med samme interval og middel diameter.



Figur 5.18: Omkostninger pr. år ved 10 år ift. filtertykkelse for 8 LECA fraktioner med interval = 2 mm.



Figur 5.19: Omkostninger pr. år ved 10 år ift. filtertykkelse for 4 LECA fraktioner med middel diameter = 10 mm.

Ud fra figur 5.18 ses det, at hver enkelt fraktion har en optimal filtertykkels, men at der også forekommer en optimal fraktion. Det samme gør sig gældende for figur 5.19. Det ses ligeledes, at for de små fraktioner er det optimale område smallere end for de større fraktioner, hvilket skyldes det større tryktab. Ved fit af filterdybden kan den optimale filter dimension findes ift. omkostninger pr år. I figur 5.20, 5.21 og 5.22 er hhv. tværsnitarealet, filterdybden og tryktabet plottet som funktion af interval og middel diameter for den fundne optimale filter dimension for de 36 LECA fraktioner.



Figur 5.20: Tværsnitsarealet af biofilter ved laveste omkostninger pr. år ved 10 år ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.



Figur 5.21: Filtertykkelse af biofilter ved laveste omkostninger pr. år ved 10 år ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.



Figur 5.22: Tryktabet i biofilteret ved laveste omkostninger pr. år ved 10 år ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.

Figur 5.20 viser, at for de fleste fraktioner er der ikke den store variation i tværsnitarealet. For 2-4 mm og 4-6 mm ses det, at overfladearealet skal være betydeligt større. Dette skyldes formentligt, at tryktabet bliver stort og derved større drift omkostninger. Figur 5.21 viser et tydeligt billede af, at de store LECA fraktioner har et dybere filter end de små fraktioner. Dette skyldes, at tryktabet ikke har den samme indflydelse for de store fraktioner og det kan derfor betale sig at bygge filteret tykkere ift. at udvide overfladearealet. Figur 5.22 viser, at tryktabet er betydelig større for 2-4 mm og 4-6 mm fraktionerne ift. til de resterende. Det underbygges af figur 5.20 som viser, at tværsnitarealet er stort ift. til de resterende fraktioner. Tværsnitarealet skal være stort for at modvirke tryktabet. For at få det reelle billede af, hvilken fraktion der er optimal til brug i et biofilter, er omkostningerne pr. år for 10 år plottet i figur 5.23 for de 36 LECA fraktioner.



Figur 5.23: Laveste omkostninger pr. år ved 10 år ift. interval og middel diameter for 36 LECA fraktioner.

Figur 5.23 viser, at de bedste fraktioner er dem, der indeholder 2 mm LECA kugler men også har et stort interval (6 - 16 mm). Fraktioner indeholdende 2 mm LECA kugler, men med et lille interval (2 til 4 mm) har et for stort tryktab og derved store drift omkostninger. Der skal dog tages forbehold for disse data, da priserne brugt er estimeret og ved ændringer i disse, vil der også ske ændringer i hvilke fraktioner, der er optimale, samt den estimerede levetid som ligeledes vil give ændringer i resultaterne. Ved en kortere levetid kommer selve konstruktionsomkostningerne til at betyde mere, hvilket vil bevirke, at mindre fraktioner vil være bedst, hvorimod ved længere levetid vil driftsomkostningerne have mere effekt og derved vil det være større fraktioner, der er at fortrække.

Konklusion

I dette studie er masseoverførselskoefficienter i gasfasen blevet undersøgt i forhold til partikelstørrelsesfordelingen, overfladearealet og gas flowet i et biofilter med kontinueret væske flow, dog så lavt at det antages at være et biofilter. CO₂ er anvendt som gasfase i atmosfærisk koncentration og 1 M natriumhydroxid er anvendt som væskefase. Forsøg er blevet udført med 36 LECA fraktioner for at se effekten af partikelstørrelsesfordelingen, overfladearealet og gas flowet på masseoverførselsraten. Derudover er der udført forsøg med Munters cellulose filter mht. påvirkning af gas flowet.

Det kan konkluderes ud fra de udførte forsøg med 4 LECA fraktioner, 2-4 mm, 16-18 mm, 6-14 mm og 2-18 mm, at en pore gas hastighed i intervallet 1000 - 5000 $\frac{m}{t}$ ikke har nogen betydelig indflydelse på masseoverførslen. Det ses dog for forsøg med Munters cellulose filter at ved lavere pore gas hastigheder, fra 0 - 1000 $\frac{m}{t}$, har hastigheden en indflydelse på masseoverførslen. Det antages, at dette også gør sig gældende for LECA. Det kan konkluderes, at ved lave hastigheder har pore gas hastigheden en indflydelse, men ved pore gas hastigheder over 1000 $\frac{m}{t}$ er påvirkninger minimal.

Det kan yderligere konkluderes ud fra forsøg med 36 LECA fraktioner, at partikelstørrelsesfordelingen ikke direkte har betydning for masseoverførslen, men at overfladearealet har stor betydning. Det kan konkluderes, at det er muligt at forudsige masseoverførslen ud fra overfladearealet ud fra model $k_Ga_w = 17,06 \cdot a$ og at der er en lineær sammenhæng mellem masseoverførslen og overfladearealet.

Derudover konkluderes det, at masseoverførslen er mulig at forudsige ud fra interval og diameter i form af D_{eq} ud fra model $k_G a_w = 157,85 \cdot Deq^{-0,75}$. Dette gør sig igen kun gældende for de undersøgte forhold, uniform partikelstørrelsesfordeling og konstant hastighed.

Det kan konkluderes, at kigges der kun på masseoverførslen, findes den største masseoverførsel ved 2-4 mm fraktionen, svarende til den fraktion med størst overfladeareal. Medtages tryktabet og hvor der er den største masseoverførsel pr. tryktab er det 12-14 mm fraktionen, der er mest egnet størrelse af filtermaterialet i et biofilter.

Ud fra den opstillede model til forudsigelse af den mest kost effektive konstruktion af et biofilter, ift. omkostninger pr. år, med LECA som filtermateriale kan det konkluderes, at fraktioner indeholdende 2 mm LECA partikler og med et interval på over 6 mm er at fortrække. Dette gør sig dog kun gældende for de opstillede parametre. Det kan ikke siges om dette er tilfældet for et konkret projekt, men ved indsættelse af rigtige værdier i modellen, vil det være muligt at komme med et bud på den optimale konstruktion og den optimale fraktion for det givende projekt.

Perspektivering



Dette studie har ud fra forsøg med 36 LECA fraktioner fundet sammenhængen mellem masseoverførslen i gasfasen og partikelfordelingen, det ydre overfladeareal og gas hastigheden. Dertil er fundet modeller, der forudsiger masseoverførslen ud fra det ydre overfladeareal, tryktabet og partikelstørrelsen i form af D_{eq} . Disse modeller gælder kun for uniform partikelstørrelsesfordeling og for masseoverførslen i gasfasen.

For at udvide disse modeller og gøre dem mere anvendelige til brug for design af biofiltre vil forsøg, der viser sammenhængen mellem masseoverførslen, partikelfordelingen, det ydre overfladeareal og gas hastigheden for væskefasen være optimale for det få dette ind i modellerne. Dette vil medføre, at modellerne ikke kun gælder for stoffer, der har modstanden i gasfasen. Forsøg med LECA viste ingen effekt af gas flowet på masseoverførslen i det undersøgte interval. Da det forventes, at gas flowet har en effekt i et lavere interval, vil det være oplagt at undersøgte dette. Derudover er der ikke set på effekten af væske flowet, hvilket også vil være oplagt at få med i modellerne. Der skal ligeledes laves flere forsøg med forskellige filtermaterialer for at se, hvor godt modellerne forudsiger masse-overførslen i andre filtermaterialer. Et andet filtermaterialer kunne f.eks. være det anvendte Muntres filter i forskellige størrelser, for at se effekten af overfladearealet. Undersøgelser med ikke uniforme filtermaterialer vil kortlægge om modellerne stadig giver et godt estimat for masseoverførslen for disse. Derudover kunne der udføres forsøg med andre gasser for at kortlægge om modellerne også gælder for andre gasser end CO₂.

Modellen der beskriver omkostninger pr. år for et givet biofilter med LECA som filtermateriale, kan optimeres i forhold til data modellen bruger. Her tænkes på priser for opførsel af biofilteret. Derudover kan der ses på forskellige filtermaterialer og derved finde det mest egnede filtermateriale til det givende projekt.

Litteratur

- Andreasen, R. R. og Poulsen, T. G.: 2012, Air flow characteristics in granular biofilter media, Indsendt til Journal of Environmental Engineering.
- Arogo, J., Zhang, R. H., Riskowski, G. L., Christianson, L. L. og Day, D. L.: 2009, Mass transfer coefficient of ammonia in liquid swine manure and aqueous solutions, *Agricultural Engineering*, *Vol. 73, pp* 77-86.
- Chen, L. og Hoff, S. J.: 1999, Mitigating odors from agricultural facilities: A review of literature concerning biofilters, *Engineering in Agriculture, Vol.* 25(5), pp. 751-766.
- Claytek: 2011, *LECA*, *Lightweight Expanded Clay Aggregate*. Besoegt. 25.11.2011. **URL:** http://www.claytek.co.uk/leca_home.htm
- Dansk Landbrug: udat., Landbrugets strukturudvikling.
- Delhomenie, M.-C., Bibeau, L. og Heitz, M.: 2002, A study of the ompact of particle size and adsorption phenomena in a compost-based biological filter, *Chemical Engineering Science, Vol.* 57, pp. 4999-5010.
- Devinny, J. S. og Ramesh, J.: 2005, A phenomenological review of biofilter models, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 113, pp. 187-196.
- Dvorak, B. I., Lawler, D. F., Fair, J. R. og Handler, N. E.: 1996, Evaluation on the onda correlations for mass transfer with large random packings, *Environmental Science and Technology, Vol. 30*, pp. 945-953.
- Hikita, H., Asai, S. og Takatsuka, T.: 1975, Absorption of carbon dioxide into aqueous sodium hydroxide and sodium carbonate-bicarbonate solutions, *Chemical Engineering Journal, Vol. 11, pp. 131-141*.
- Kai, P.: udat, Muligheder for at reducere lugtemissionen fra svinestalde. Landsudvalget for Svin.
- Kim, S. og Deshusses, M. A.: 2007a, Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. experimental results, *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 841-855.
- Kim, S. og Deshusses, M. A.: 2007b, Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 2. development of mass transfer coefficients correlations, *Chemical Engineering Science, Vol. 63, pp. 856-861*.
- Lewis, W. K. og Whitman, W. G.: 1924, Principles of gas absorption, *Industrial and Engineering Chemisrty, Vol. 16, pp. 1215-1220*.
- Miljoeministeriet, Skov- og Naturstyrelsen: 2006, Faglig rapport vedroerende en ny lugtvejledning for husdyrbrug.

- Onda, K., Takeuchi, H. og Okumoto, Y.: 1968, Mass transfer coefficiebts between gas and liquid phases in packed columns, *Chemical Engineering of Japan, Vol. 1, pp. 56-62*.
- Rolf Sander: 1999, Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organis Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. Air Chemistry Department Max-Planck Institute of Chemistry 55020 Mainz Germany.

The National Committee for Pig Production: 2005, Annual Report 2005. ISBN: 87-91460-07-7.

Reaktion mellem CO₂ og basiske væsker

A

I dette appendiks beskrives reaktionen mellem CO_2 og basiske væsker, hvilket kan sammenlignes med reaktionen mellem CO_2 og NaOH i de udførte forsøg gennem studiet.

$$CO_2 + OH^- \rightleftharpoons HCO_3^-$$
 (A.1)

$$HCO_3^- + OH^- \rightleftharpoons CO_2^{3-} + H_2O \tag{A.2}$$

Reaktion A.1 er en 2. ordens irreversibel reaktion. Reaktion A.2 er en proton overførsels reaktion og har derved en meget højre rate konstant end reaktion A.1 og kan antages som en spontan reversibel reaktion. I stærke hydroxid opløsninger kan ligevægts reaktionen for HCO23- negligeres og reaktion ser således ud:

$$CO_2 + 2OH^- \to CO_2^{3-} + H_2O$$
 (A.3)

Den kemiske reaktion kan opskrives som en to step reaktion

$$A + B \to C \tag{A.4}$$

$$C + B \to E$$
 (A.5)

Ved reaktionen mellem CO_2 og NaOH kan de to reaktioner afbildes som i figur A.1 [Hikita et al., 1975].



Figur A.1: Formen af CO₂ som den forkommer på under reaktionen med NaOH

Masse af CO_2 overført til væskefasen findes ud fra ligning A.6.

$$C_{CO_2ind} - C_{CO_2ud} = C_{CO_2fjernet} \tag{A.6}$$

Hvor

$$\begin{array}{c|c} C_{CO_2ind} & \text{Koncentrationen af CO}_2 \text{ for biofilteret } \begin{bmatrix} mg \\ L \end{bmatrix} \\ C_{CO_2ud} & \text{Koncentrationen af CO}_2 \text{ efter biofilteret } \begin{bmatrix} mg \\ L \end{bmatrix} \\ C_{CO_2f \text{ jernet}} & \text{KOncentrationen af CO}_2 \text{ fjernet } \begin{bmatrix} mg \\ L \end{bmatrix} \end{array}$$

B

Fysiske værdier for 36 LECA fraktioner

I dette afsnit vises fysiske værdier for de 36 anvendte LECA fraktioner, se tabel reftab:tryktab36.

LECA frak-	Middel	Middel par-	Effektiv por-	Det ydre
tion	rumvægten	tikel densite-	øsitet	overfladeare-
	_	ten		al $\frac{m^2}{m^3}$
2-4 mm	0,33	0,46	0,28	1084
4-6 mm	0,29	0,47	0,39	656
6-8 mm	0,25	0,40	0,37	508
8-10 mm	0,25	0,39	0,37	372
10-12 mm	0,24	0,37	0,36	339
12-14 mm	0,23	0,35	0,33	315
14-16 mm	0,22	0,32	0,32	274
16-18 mm	0,23	0,34	0,33	223
2-6 mm	0,31	0,47	0,33	866
4-8 mm	0,27	0,43	0,37	588
6-10 mm	0,25	0,39	0,37	435
8-12 mm	0,24	0,38	0,37	349
10-14 mm	0,24	0,36	0,35	325
12-16 mm	0,24	0,33	0,28	314
14-18 mm	0,22	0,33	0,32	250
2-8 mm	0,29	0,44	0,34	735
4-10 mm	0,26	0,42	0,37	506
6-12 mm	0,24	0,39	0,37	400
8-14 mm	0,24	0,37	0,34	348
10-16 mm	0,23	0,34	0,34	307
12-18 mm	0,23	0,33	0,31	274
2-10 mm	0,27	0,43	0,36	621
4-12 mm	0,26	0,40	0,37	463
6-14 mm	0,24	0,38	0,35	383
8-16 mm	0,23	0,35	0,35	320
10-18 mm	0,23	0,34	0,34	285
2-12 mm	0,27	0,41	0,35	565
4-14 mm	0,25	0,39	0,36	433
6-16 mm	0,24	0,36	0,35	356
8-18 mm	0,22	0,35	0,35	291
2-14 mm	0,26	0,40	0,35	519
4-16 mm	0,25	0,38	0,35	404
6-18 mm	0,23	0,36	0,35	331
2-16 mm	0,26	0,39	0,34	481
4-18 mm	0,24	0,37	0,34	376
2-18 mm	0,25	0,38	0,34	440

Tabel B.1: Fysiske værdier for de 36 anvendet LECA fraktioner.

Blindprøver

C

Resultaterne for de udførteblind prøver kan ses i tabel C.1.

Flow $\left[\frac{m^3}{t}\right]$	Fjernelse %	Masseoverførsel $\frac{1}{t}$
10	12,4	102,64
	-2,76	-21,12
	2,79	21,9
	3,02	23,78
	2	15,67
20	-3,13	-23,92
	0,85	6,65
	-6,49	-48,74
	-3,51	-26,73
	-3,53	-26,88
30	-2,97	70,22
	6,05	136,65
	2,51	57,73
	-0,28	-6,52
	-2,59	-61,11
40	1,40	10,87
	2,22	17,37
	-1,69	-12,99
	0,28	2,19
	3,41	26,88
50	-0,57	-4,42
	3,56	28,10
	-2,91	-22,21
	-1,14	-8,78
	-0,28	-2,21

Tabel C.1: Resultater for udførte blindprøver. Alle 5 målinger er listet ved hvert flow.

Det ses af tabel C.1, at der ikke er sammenhæng mellem fjernelsen af CO_2 for de fortaget blindprøver. Det antages, at arealet kolonnen bidrager med er ubetydelig for de udførte forsøg.

Tryktab for 36 LECA fraktioner

D

Tryktabet er fundet ud fra forsøg udført af Andreasen og Poulsen [2012] på de samme 36 LECA fraktioner som anvendt i dette studie. For at få tryktabet til den tilhørende hastighed 0,2 $\frac{m}{s}$ er der lavet en lineærregration mellem tre målepunkter i området, se figur D.1 for eksempel med LECA fraktion 2-4 mm. Tryktabet for de 36 LECA fraktioner kan ses i tabel D.1. Tryktabet for Muntres cellolose filteret er fundet ved at måle trykket før og efter et 30 cm filter i det opstillede system med en ALNOR AXD 560 manometer (Alnor, Ontario Canada) ved et flow på 30 $\frac{m^3}{t}$. Tryktabet for Muntres cellulose filteret kan ses i tabel D.1.



Figur D.1: Tryktab som funktion af hastigheden.

Fraktion	Tryktab $\frac{Pa}{m}$
2-4 mm	341,52
4-6 mm	266,61
6-8 mm	159,18
8-10 mm	132,97
10-12 mm	92,62
12-14 mm	80,47
14-16 mm	69,31
16-18 mm	63,35
2-6 mm	296,76
4-8 mm	255,16
6-10 mm	156,14
8-12 mm	142,79
10-14 mm	89,11
12-16 mm	71,49
14-18 mm	67,12
2-8 mm	325,87
4-10 mm	236,99
6-12 mm	159,42
8-14 mm	116,57
10-16 mm	96,83
12-18 mm	68,69
2-10 mm	256,82
4-12 mm	170,83
6-14 mm	140,61
8-16 mm	120,34
10-18 mm	102,66
2-12 mm	258,05
4-14 mm	179,60
6-16 mm	137,76
8-18 mm	107,92
2-14 mm	185,98
4-16 mm	163,60
6-18 mm	126,75
2-16 mm	183,04
4-18 mm	152,71
2-18 mm	171,95
Munters	1,33

Tabel D.1: LECA fraktion og Munters cellulose filter og tilhørende tryktab pr. meter.

Model til mest økonomisk biofilter

I det følgende vises udregninger bag modellen til forudsigelse af mest kosteffiktive biofilter samt benyttede parametre. Alle konstanter og parametre benyttet kan ses i tabel E.1.

Tabel E.1: Parametre og konstanter benyttet i model til forudsigelse af mest kosteffiktive biofilter med LECA som filtermateriale.

Parameter	Værdi	Enhed
Flow (Q)	10000	$\left[\frac{m^3}{t}\right]$
Fjernelse procent	95	[%]
Filterhøjde (h)	2	[m]
Konstant A	142	[-]
Konstant B	10,82	[-]
Konstant c	5,28	[mm ³]
Densitet (p)	1,204	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Viskusitet (µ)	0,00001827	$\left[\frac{\frac{Ha}{s}}{s}\right]$
Bygningsbrede	4,05 + filter dybde	[m]
Energiforbrug pumpe	1,65	$\left[\frac{kWh}{pumpe}\right]$
El pris	2	$\left[\frac{kr}{kWh}\right]$
Levetid	10	[år]

Først findes D_{eq} ud fra ligning:

$$D_{eq} = \frac{2}{\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_m - \frac{R}{2}}}$$
(E.1)

 D_{eq} benyttes til at finde masseoverførselsraten ud fra den funden model:

$$k_g a_w = 157,85 \cdot D_{eq}^{-0.75} \tag{E.2}$$

Ved antagelse af flow (Q) = 10000 $\frac{m^3}{t}$ og en fjernelses procent = 95 % kan det effiktive volumen (V_e) findes ud fra ligning:

$$k_G a_w = \frac{Q_G}{V_e} ln \frac{C_{G,ind}}{C_{G,ud}}$$
(E.3)

Ved brug af porøsiteten kan det total filter volumen (V_b) findes:

$$V_b = \frac{V_e}{\rho} \tag{E.4}$$

Herefter findes opholdstiden (O):

$$O = \frac{V_b}{Q} \tag{E.5}$$

VII

Ved gæt af en filter dybde (d) kan Darcy hastigheden (u) og tværsnitsarealet (A) af filteret findes:

$$u = \frac{d}{O} \tag{E.6}$$

$$A = \frac{V_b}{d} \tag{E.7}$$

Ved antagelse af en filter højde (h) = 2 m kan filterlængden (L) findes:

$$L = \frac{A}{h} \tag{E.8}$$

Tryktabet (P) kan findes ud fra ligning:

$$\frac{\Delta P}{L} = A \left(D_{eq} \left(1 + \frac{c}{\left(D_m - \frac{R}{2} \right)^3} \right) \right)^{-2} \mu V + B \left(D_{eq} \left(1 + \frac{c}{\left(D_m - \frac{R}{2} \right)^3} \right) \right)^{-1} \rho V^2 \tag{E.9}$$

Omkostning ved etablering af et Bio Flex 2 biofilter fra Skov A/S kan ses i tabel E.2. Det antages at disse værdie kan bruges til modellering af omkostninger i denne model med LECA som filtermateriale.

Tabel E.2:	Omkostninger for bygning af biofilter opdelt i længde og volumen afhængige udgifter og
	engangsudgifter. Priserne er ved antagelse af 2 m højt filter.

Overfladeareal afhængige udgifter	pr. x meter	Pris [kr]	Pris m [kr]
Overrisling	9	7844	872
Luftfordeling	1,8	1118	621
Befugter rør	1,8	300	167
Totab			1660
Volumen afhængige udgifter	pr. x meter	Pris [kr]	Pris pr m ³ [kr]
m ² pris	1	1000	500
Filtermateriale			1500
Engangsudgifter			Pris [kr]
Filtervasker			47803
Befugterpumpe			7488
Energikæde			792
pH pumpekit			15138
Filter start			4633
Luftfordeling start			1575
Startpakke			80772
Total			158201

Med udgangspunkt i tabel E.2 kan omkostninger (B_T) vedrørende konstunktion af filteret findes. Først findes udgifterne der er længde afhængige (B_l) :

$$B_l = 1660 \frac{kr}{m} \cdot l \tag{E.10}$$

Herefter findes prisen for filtermaterialet (B_F) :

$$B_F = 1500 \frac{kr}{m^3} \cdot V_b \tag{E.11}$$

Ved antagelse af, at bygningen skal være 4,05 m bredere end filter dybden og samme længde og højde kan omkostninger for konstruktion af bygning til selve filteret (B_k) findes:

$$B_k = (d+4,05m) \cdot h \cdot l \cdot 500 \frac{kr}{m^3}$$
(E.12)

Ved medtagning af engangsudgifter B_E kan B_T findes:

$$B_T = B_l + B_F + B_k + B_E \tag{E.13}$$

Driftomkostningerne (B_D) er fundet ud fra pumpekaraktestikken fra ventilationspumpe JUVSC 630, se figur E.1.



Figur E.1: Pumpekaraktestik for pumpe JUVSC 630.

Ud fra pumpekaraktestikken er det optimale driftpunk fundet og er antaget den værdi hvor multiplikation af tryktab og flow antager den højste værdi, svarende til Pa = 228 og flow = 10362. Skal der bruges et hjøre flow eller tryk benyttes flere pumper, det antages, at der f.eks. kan benyttes 1,2 pumper. Antalet af pumper findes ud fra det optilmale driftområde og det tryk og flow som skal anvendes for den givende LECA fraktion og filter deminsion:

$$Antal pumper = \frac{\text{Nødvendigt tryktab}}{228Pa} \cdot \frac{\text{Nøvendigt flow}}{10362\frac{m^3}{s}}$$
(E.14)

Ud fra antallet af pumper og antallet af kWh pumperne bruger og en kWh pris findes driftsomkostningerne pr. år B_D :

$$B_D = antal pumper \cdot 1,65 \frac{kWh}{pumpe} \cdot 2 \frac{kr}{kWh} \cdot 24 \cdot 365$$
(E.15)

De totale omkostninger (T) pr. år findes ved antagelse af X antal år systemte kører i, her 10 år:

$$T = \frac{B_T}{10} \cdot B_D \tag{E.16}$$

Ved sammenkobling af overstående ligninger er det muligt at ændre filterdybden til den mindste omkostning pr. år forekommer. Dette gøres for hver af de 36 LECA fraktioner og der fremkommer et billede af bedste filter diminsion for hver fraktion og hvilken fraktion der er bedst.