



Linnéuniversitetet
Sjöfartshögskolan

Driftsingeniøruddannelsen
Selvstændigt arbejde

Varmegenvinding af luft i kyllingestalde

Genbrug af energien i udsugningsluften til luftforvarmning



Alexander Anaje
Georg Alegrim
2019-03-22
Omfang: 15 point
Kursuskode:
2SJ52E

Abstrakt

I Sverige er forbruget af kylling pr. indbygger steget de seneste år og i dag indtages der 23,2 kg pr. person om året. Da væksten for svensk kylling er høj, øges også virksomhedernes bevidsthed om at investere i klimasmarte alternativer for at reducere energibehovet, som giver reduceret omkostning til opvarmning.

Den udvalgte dyrestald opvarmes med flisfyr, hvor vandbårne varmeelementer forsyner stalden med varme langs væggene. Formålet med studiet er at undersøge, hvor meget varmeenergi, der kan spares ved at bruge den udsugede luft til at opvarme den luft, der suges ind ved hjælp af en varmeveksler. Det har været anset for problematisk at bruge staldens aftræksluft til at give energi i form af varme, fordi det normalt er støvet, og det leder til tilstopning af filtre og kanaler. I dag findes der en række luftvarmevekslere, som kan håndtere denne type støv og partikler.

To forskellige varmevekslere er blevet sammenlignet, en rekuperativ (pladevarmeveksler) og en regenerativ (roterende varmeveksler). Stalden skal holde en lav CO₂-værdi, og kyllingernes strøelse skal holdes tørt ved hjælp af lav luftfugtighed. Ventilationens volumenflow er en beregnet teoretisk værdi. Resultaterne af de to sammenlignede varmevekslere viser, at den regenerative (roterende) varmeveksler returnerer fugt, hvilket bidrager til en vådere strøelse sammenlignet med den rekuperative (pladevarmeveksler), som ikke returnerer fugt. Undersøgelsen er foretaget i kyllingernes opvækstperiode, som varede fra 1. januar i 34 dage fremefter. Dagene 28–30 bliver stalden selvforsynende med varme, og varmeveksleren kan så generere den nødvendige varme uden anlæggets tilhørende flisfyr.

Af hensyn til staldklimaet er det at foretrække at have en pladevarmeveksler, da den roterende varmeveksler returnerer vand på tre gram pr. kg tør luft. Undersøgelsen viser, at det samlede varmebehov, som i dag er cirka 48,2 MWh i en opdrætscyklus, kan reduceres med 24,8 MWh ved hjælp af en varmeveksler i denne cyklus.

Abstrakt

I Sverige er forbruget af kylling pr. indbygger steget de seneste år og i dag indtages der 23,2 kg pr. person om året. Da væksten i forbruget af svensk kylling er steget, er virksomhedernes bevidsthed om at investere i klimasmarte alternativer ligeledes steget. Virksomhederne reducerer den nødvendige energi under produktionen, hvilket i sidste ende fører til mindskede omkostninger til opvarmning.

Dyrestalden opvarmes af en kedel, hvor vandbaserede varmeelementer forsyner dyrestalden med varme langs væggene.

Det har været anset for problematisk at opvarme dyrestalden ved at genbruge luften inde fra stalden, på grund af den omstændighed, at denne luft ofte er for støvet, hvilket bidrager til tilstopning af filtre og kanaler. Der findes en række forskellige varmevekslere, som kan håndtere denne form for støv og partikler i dag.

To forskellige varmevekslere vil blive sammenlignet, en rekuperativ pladevarmeveksler og en regenerativ roterende varmeveksler.

Dyrestalden skal holde en lav CO₂ værdi, og det er vigtigt at holde kyllingernes strøelse tørt ved lav luftfugtighed inde i stalden.

Undersøgelsen viser, at den samlede varme for én opdrætscyklus, som i dag er cirka 48,2MWh, giver en besparelse på 24,8MWh ved at bruge en luftvarmeveksler. Resultatet af sammenligningen af de to varmevekslere har vist, at den regenerativ (roterende) varmeveksler genindfører fugt i båsen, hvilket den rekuperative (pladevarmeveksleren) ikke gør. Perioden for denne undersøgelse var 34 dage fra kyllingernes fødsel til slagtning. I løbet af dagene 28-30 bliver dyrestalden selvforsynende med hensyn til varme, hvilket betyder, at varmeveksleren vil kunne generere den varme, der kræves til anlægget uden brug af staldens flisfy.

Undersøgelsen gennemføres med et beregnet volumenflow grundet en kort udløbskanal på anlægget, dette kan medføre risiko for en mindre fejlværdi.

Af hensyn til staldklimaet er det at foretrække at bruge en pladevarmeveksler, da den roterende varmeveksler returnerer vand på 3 gram pr. kg tør luft.

Nøgleord

Varmegenvinding, varmeveksler, Rokkedahl, Rokkedahl-Energi, Munters, staldventilation, staldmiljø, staldklima, fugtgenvinding, rekuperativ, regenerativ, Heat-X-Rotate, Big Dutchman, kyllingestald.

Forord

I løbet af studiet fik vi råd, støtte og mange interessante diskussioner med folk i kyllingeb Branchen. Vi vil derfor gerne takke Ölands Kylling og andre hønseavlere, som har deltaget i undersøgelsen, for et godt samarbejde.

Vi vil også gerne takke vores vejledere Magnus Nilsson og Stefan Fagergren for al den hjælp de har bidraget med.

Ordliste

VVX= Varmevekslere, overfører energi fra et medium til et andet medium

Rekuperativ varmeveksler = Varmen strømmer gennem en varmevekslende overflade

Regenerativ = varmeveksler, der via roterende materiale overfører varme fra den varme til den kolde luftkanal eller omvendt

Strøelse = Kyllingernes gulvunderlag i stalden (halm, spåner, tørv eller gødning)

Aftræksluft = Luft fra hønsehusets ventilation

Indblæsningsluft = Udeluft til stalden

Opdræts cyklus = Dagene fra kyllingerne kommer ind i stalden til slagting

Kondensering = Vandbundfældning fra luften

Indholdsfortegnelse

1 Baggrund	1
Kyllingeavl	1
Beskrivelse af anlægget	1
2 Spørgsmål og formål	4
Formål	4
Spørgsmål	4
Afgrænsning	4
Etiske og miljømæssige spørgsmål og holdninger	4
Etiske holdninger	4
Miljøspørgsmål	5
3 Teori	6
Tidligere undersøgelser	6
Matematiske formler	6
4 Metode	8
Aflæsning og beregningsproces	8
Vurdering af forskellige varmeveksleres påvirkning af klimaet i stalden	9
Måleudstyret	10
Fejlkilder	10
5 Resultat	12
Brugbar varmeenergi i aftræksluft og varmebehov	12
Vurdering af forskellige varmeveksleres påvirkning af klimaet i stalden	18
6 Diskussion	20
Metodediskussion	20
Resultatdiskussion	20
7 Referencer	24
8 Liste over figurer og tabeller	25
Figurer	25
Tabeller	25

Bilag

Bilag 1. Aflæs temperaturer og luftfugtighed (januar/februar -18)

Bilag 2. Beregnede ventilationsparametre (januar/februar -18) Bilag

3. Genberegning af aflæste værdier

Bilag 4. Energiværdier

Bilag 5. Målte værdier af varmevekslere Bilag 6.

Kastlösa (stalden hvor undersøgelsen udføres)

Bilag 7. Rekuperativ varmeveksler med tilhørende ventilatorer

Bilag 8. Regenerativ varmeveksler med tilhørende ventilatorer

1 Baggrund

Kyllingeavl

Forbruget af svensk fjerkrækød er gennem længere tid steget, i 2017 spiste vi 23,2 kilo per person/år. Svensk fågels medlemmer producerer årligt cirka 99 millioner kyllinger (Svensk fågel, 2018).

På trods af at opdræt af kylling belaster miljøet mindre i forhold til udledning af kuldioxid end både svin og oksekød (Svensk fågel, 2018), er der løsninger, der gør, at der kan bruges mindre energi til at opvarme og ventilere staldene, hvor kyllingerne tilbringer deres 35 dages liv. Kyllingerne er ikke større end et normalt æg (ca. 50–70 gram), når de ankommer til stalden, og før slagting vejer de omkring 2 kg.

Dyrestaldene opvarmes normalt med halm eller flisfyre, i mange tilfælde kommer energien fra egen gård.

En stor del af varmen til stalden bruges til at ventilere fugt fra stalden for at holde strøelsen tør og til at holde kuldioxidniveauet nede. Hvis den energi, der udluftes, kunne genvindes til opvarmning af den indkommende luft, vil der sandsynligvis kunne spares meget energi.

Det har længe været anset for problematisk at bruge den varme aftræksluft fra hønsegårde til varmegenvinding, da den indeholder meget støv, og brugen af filtre har ikke virket realistisk, eftersom det involverer store luftstrømme. Det er nu en del systemer, der kan klare dette, med en dokumenteret energibesparelse på i bedste fald omkring 80 % (Johansen, 2019).

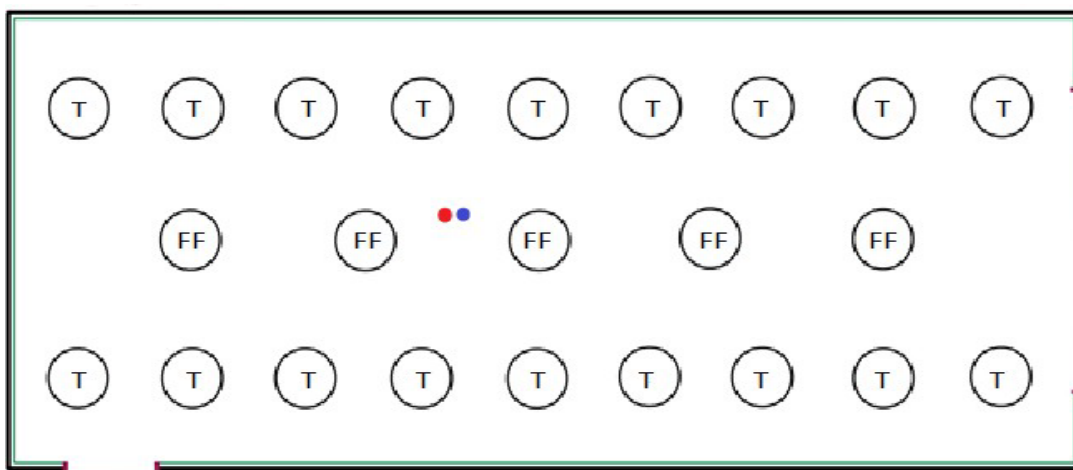
Ejerne af Ölands kylling har planer om at investere i varmegenvinding fra ventilationen.

Beskrivelse af anlægget

På Ölands kyllingeanlæg "Kastlösa" opvarmes staldene ved hjælp af et 600 kW flisfyre fra REKA og et vandbårent varmeanlæg, hvor varmen afgives i staldene via varmerør langs væggene. Dyr, der dør i kyllingestaldene, forbrændes også i dette fyre. Når der ikke er behov for varme, slukkes fyret, og da skal den forbrænding af døde dyr, der normalt sker i fyret, behandles på en anden måde. Fejning og eventuel vedligeholdelse af fyret udføres, når fyret er slukket, hvilket er ca. 8 gange årligt (mellem opvækstperioder).

Det samlede opdrætsareal er 8384 m², stalden, hvor målingen skal foretages (se bilag 6) har et gulvareal på 958 m² og rummer ca. 18.000 kyllinger (ved slagtning er dækningen ca. 36 kg/m²). Ölands kylling har desuden et anlæg på næsten 11.000 kvadratmeter, der opvarmes med et 1 MW flisfyr.

Staldene ved Kastlösa ventileres blandt andet med fem udsugningsventilatorer mærket "FF" i figur 1 nedenfor, som hver har en kapacitet på 18.328 m³/h ved 20 Pa (Munters, 2019) undertryk (stald 6), hvilket giver en samlet ventilationskapacitet på 91.645 m³/h. Ventilatorerne reguleres i procent (i procent af staldens samlede ventilationskapacitet). Indblæsningsluften suges ind gennem luftindtagene mærket "T" på figuren, luftindtagene har ingen ventilatorer og åbningsgraden reguleres ved hjælp af et hydraulisk stempel. Ventilationsstyringen arbejder mod målet på 20 Pa undertryk, det betyder, at hvis undertrykket er større end 20 Pa (plus hysteres), åbnes indblæsningsventilerne, og hvis det er mindre end 20 (minus hysteres) lukkes indblæsningsventilerne.



Figur 1. Oversigt kyllingestald 958 m² viser indblæsningsluft (T) og udsugningsventilatorer (FF). Placeringen af fugt- og temperatursensoren er markeret med to prikker (rød og blå)

Stalden har desuden en ekstra sommerventilation bestående af to ventilatorer, hver med en kapacitet på ca. 40.000 m³/t (ikke tegnet på figuren). De ventilatorer, der bruges som sommerventilation, skal startes manuelt, når der er behov for dem, derefter fungerer de ved at tænde og slukke afhængigt af afvigelsen fra temperaturmålet. Disse har derfor kun to indstillinger på (40.000 m³/h) eller slukket (0 m³/h)

De ventilatorer, der arbejder i procent, har en offset, der kan ses i tabel 1, mellem anlæggets ventilationskapacitet (det der vises i displayet på kontrolheden) og den faktiske ventilationskapacitet.

Tabel 1. Offset ventilationskapacitet

Offset	
Kontrolsystemets ventilationskapacitet (%)	Reel ventilationskapacitet (%)
0	0
10	5
20	10
30	20
40	30
50	40
60	50
70	60
80	70
90	85
100	100

Idéen med at have en offset er at få en mere lineær regulering af temperaturen, når temperaturen udenfor stalden er lav og temperaturmålet i stalden er høj, kører ventilationen normalt med en lavere kapacitet. Når kontrolenheden ønsker at øge ventilationen med eksempelvis 1 %, øges det kun med 0,5 % (0–20 %), men køleeffekten er alligevel stor på grund af den store temperaturforskel inde/udenfor. Når forskellen mellem staldens temperaturmål og udetemperaturen er mindre (højere udetemperatur og lavere temperatur i stalden), bliver forholdet det modsatte, og så svarer 1 % på kontrolenheden til 1,5 % i virkeligheden (90–100 %).

Temperaturmålet i staldene varierer mellem omkring 35 grader for nyudklækkede kyllinger til omkring 20 grader ved 35-dages alderen. Fugtighedsmål og minimumsventilationsindstilling justeres efter kvaliteten af strøelsen og kuldioxidniveauet i stalden.

Placeringen af temperaturføleren og fugtføleren kan ses på figur 1, de er markeret med to prikker (røde og blå). Kuldioxidniveau måles i forbindelse med husdyrhold med et separat instrument, der flyttes mellem afdelingerne.

2 Spørgsmål og formål

Formål

Formålet med undersøgelsen er at kortlægge, hvor meget energi der er til rådighed i udsugningsluften, og hvor meget af den energi, der kan bruges til at forvarme indsugningsluften i forhold til, hvordan varmebehovet ser ud, samt at undersøge, hvordan kyllingestaldens klima påvirkes afhængigt af valg af varmevekslertype.

Spørgsmål

- Hvor meget varmeenergi kan der genvindes i afgangsluften fra stalden?
- På hvilken opvækst dag bliver stalden selvforsynende med varmeenergi under hensyntagen til det faktiske klima?
- Hvordan vil det påvirke luftfugtigheden i stalden og effektiviteten af varmegenvindingen med forskellige tekniske løsninger?

Afgrænsning

Der er ikke foretaget en økonomisk vurdering af brugen af varmevekslere til varmegenvinding. Årsagen til dette er, at det ikke er muligt at beregne, hvordan elforbruget til ventilationsbehov påvirkes ved brug af varmevekslere.

Det er ikke blevet undersøgt, hvordan en eventuel varmeveksler kommunikerer med den eksisterende kontrolenhed for staldventilation. Det er ikke blevet vurderet, om styresystemet skal suppleres eller ombygges for at fungere optimalt med forskellige varmevekslere. Grunden til det er, at det kan variere mellem forskellige fabrikater og typer varmevekslere.

Etiske og miljømæssige spørgsmål og holdninger

Etiske holdninger

I nutidens samfund kan dyrehold og opdræt af slagtedyr være et følsomt emne, og der er opdrættere som ønsker at være anonyme for at undgå mulig chikane fra forskellige organisationer. Derfor vil der ikke blive offentliggjort følsomme oplysninger, der kan medføre gener for de personer eller virksomheder, der har deltaget i undersøgelsen, i denne rapport.

Miljøspørgsmål

Varmegenvinding af energi i udsugningsluften kan være med til at reducere udledningen af kuldioxid ved at reducere den energi, der kræves til at opvarme og ventilere fugt fra stalden. Det afhænger af, hvilket varmesystem der bruges til formålet. På det anlæg, hvor undersøgelsen udføres, anvendes flis, som er en form for biomasse, der anses for at være vedvarende og nærmest kulstofneutral (bioenergiportalen, 2019). Nogle anlæg bruger stadig fyringsolie til opvarmning og så kan kuldioxidudledningen reduceres markant med varmegenvinding. Et af de anlæg, hvor der blev foretaget målinger under undersøgelsen, havde et oliefyr som primær varmekilde. Der kan således opnås et reduceret bidrag til drivhuseffekten, men det afhænger af, hvilket varmesystem der anvendes på anlægget.

3 Teori

Tidligere undersøgelser

En tidligere gennemført undersøgelse viser, at energibesparelsen ved at bruge en rekuperativ varmeveksler (se bilag 7) kan være helt op til 80 % (Johansen, 2019). Der tages dog ikke højde for et eventuelt øget elforbrug.

Problemer med at roterende varmevekslere (se bilag 8) returnerer fugt, er blandt andet dokumenteret i en undersøgelse om fugtproblemer i boliger med regenerativ varmegenvinding (Jensen, 2010).

Matematiske formler

For at beregne staldens ventilationsflow er undersøgelsen baseret på aflæste værdier, som ved hjælp af tabel 1 gav en procentværdi. Denne værdi blev brugt i formlen nedenfor:

Volumenflow=Procentværdi*Total ventilationskapacitet:

Eksempel, volumenflow (2 %): $0,02 \cdot 91\,645 = 1833 \text{ m}^3/\text{h}$

For at beregne luftens tørre massefylde blev følgende formel brugt (Alvares, 2014):

ρ_t = massefylde (kg tør luft/m³ fugtig luft)

p = lufttrykket ($1,01325 \times 10^5$ Pa)

Ψ = relativ luftfugtighed

$$\rho = \frac{p - \Psi \times p''_{H_2O}}{R_L \times T}$$

T = absolut temperatur (K)

p''_{H_2O} = fordampningstrykket (Pa)

R_L = konstant for luft (287)

For at konvertere volumenflow til masseflow blev følgende formel brugt (Fagergren, 2018):

\dot{m} = masseflow (kg/h)

\dot{V} = volumenflow (m³/h)

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho_t$$

ρ_t = densitet tør luft (kg/m³)

For at beregne mængden af energi (forskell i energi mellem udsugningsluft og indblæsningsluft) pr. dag, blev følgende formel brugt (Fagergren, 2016)

Q = Energimængde (kJ)

m = mængden af tør luft (kg)

$$Q = m(i_1 - i_2)$$

i_1 = udblæsningsluftens entalpi (J/kg tør luft)

i_2 = indblæsningsluftens entalpi (J/kg tør luft)

Faktoren, der bruges til at beskrive "effektiviteten" er et mål for, hvor meget energi der returneres ($i_{\text{indblæsningsluft}} - i_{\text{løde}}$) i forhold til den samlede energiforskel ($i_{\text{aftræksluft}} - i_{\text{løde}}$).

4 Metode

Aflæsning og beregningsproces

I denne undersøgelse er der indsamlet data fra en vækstperiode (35 dage af kyllingernes liv) i januar/februar, fordi det er en af årets koldeste vækstperioder. Denne periode blev valgt for at indhente fakta, der kan bruges til at dimensionere varmevekslerne efter den koldeste periode, hvor varmebehovet er stort, og desuden fordi temperaturen udenfor ikke varierer så meget mellem dag og nat på denne årstid, hvilket letter aflæsningen.

I undersøgelsen blev løbende dokumenteret temperatur, luftfugtighed og procentuel ventilationsflow af udsugningsluften i stalden samt temperatur og luftfugtighed udenfor under opvækstperiodens 34 dage. Aflæsningen har fundet sted én gang dagligt kl. 07.30 om morgenen samtidig med den almindelige aflæsning (personalet læser data til eget brug). Alle værdier undtagen den udendørs luftfugtighed er taget fra staldens styrecomputer til ventilationen. Luftfugtigheden blev taget fra målestationen på Ölands sydspids (SMHI, 2019). Dette er sammen med Ölands Kylling dokumenteret på et specifikt dokument (se bilag 1).

Staldens aflæste procentvise ventilationsflow (procent af maksimal ventilation, eksklusiv sommerventilation) blev herefter omregnet til et reelt ventilationsflow under hensyntagen til offset i tabel 1. Genberegningen af procentuel ventilationsflow er illustreret i bilag 3.

Det reelle ventilationsflow blev omdannet til et masseflow (se bilag 2) ved hjælp af luftens densitet.

Et Mollier-diagram for fugtig luft (Fagergren, 2016) blev brugt til at opnå luftentalpiforskellen (Δi) mellem temperaturen udenfor og inde i stalden.

Masseflowet og Δi blev brugt til at få den daglige energi (forskellen inde/ude), der via udsugningsventilatorerne ventileres ud af stalden (kJ/døgn), som så blev omregnet til MWh/døgn for at kunne sammenlignes med staldens varmebehov. Energiværdier kan ses i bilag 4.

For at vurdere staldens daglige varmebehov forestiller vi os en energibalance efter nedenstående model.

Tabel 2. Energibalance

Energibalance	
Varme tilføres luften	Varme fjernes fra luften
Fyr (opvarmning)	Varmeledning gennem vægge og lofter (ved udendørstemperaturer <staldens)
Dyrene (kyllingerne afgiver varme)	Ventilationen (forskellen mellem entalpien af tilført og fjernet luft)
Varme fra elektrisk udstyr (elektriske motorer, belysning osv.)	Fordampning af væske (f.eks. vandspild og fæces)
Varme fra strøelsen (kemiske reaktioner)	Varmerør til vandrør (indgående drikkevand)

Vi forestiller os, at den varmeenergi, som dyrene, det elektriske udstyr og strøelsen tilfører luften, og den varmeenergi, der fjernes gennem varmeledning og fordampning, er konstante. Med konstant menes i denne henseende, at de ikke kan reguleres eller påvirkes af kontrolsystemets klimaregulering (temperatur og luftfugtighed). Det, der reguleres for at opretholde et bestemt klima, er ventilationen og varmeenergien fra fyret. Det antages derfor, at det daglige varmebehov for at opretholde et bestemt klima i stalden er det samme som den energi, der afgives fra fyret til den pågældende stald.

Da alle staldene på opvækstanlægget er af samme konstruktion, og kyllingerne er jævnaldrende, med samme temperatur- og luftfugtighedsindstillinger, vurderes staldens varmebehov proportionalt med staldens opdrætsareal divideret med det samlede opvarmede opvækstsareal.

Tabene i varmesystemet blev negligeret. Det skete dels, fordi en væsentlig del af varmerørene i dag går gennem stalden, og en eventuel varmelækage vil komme stalden til gode, og dels, at hvis der anvendes varmeveksler, kan fyret slukkes tidligere. Det betyder, at når varmeenergien fra varmeveksleren er tilstrækkelig til at forsyne stalden med varme, slukkes fyret, og eventuelle tab i varmesystemet forsvinder.

Vurdering af forskellige varmeveksleres påvirkning af klimaet i stalden

To forskellige opdrættere, der har installeret varmevekslere for at genvinde varmeenergi fra udsugningsluften, blev besøgt i undersøgelsen. En af opdrætterne havde installeret en roterende varmeveksler (regenerativ), og den anden opdrætter havde installeret en pladevarmeveksler (rekuperativ).

Målinger udførtes på luften for at vurdere kvaliteten af indblæsningsluften (temperatur og fugtighed). Staldens temperatur og luftfugtighed blev målt for at vurdere klimaet. Kvaliteten af strøelsen blev undersøgt (personlig vurdering).

Målte temperaturer og fugtigheder i stalden blev også brugt til at beregne en faktor for, hvor meget af aftræksluftens tilgængelige entalpi, der genbruges til at forvarme indblæsningsluften.

Måleudstyret

Måleudstyret, der blev brugt til at kalibrere staldens temperatur- og fugtighedssensor, var det samme, som blev brugt ved måling hos de forskellige avlere for at kontrollere luftkvaliteten.

Figur 2 viser det instrument, der bruges til at måle temperatur og luftfugtighed i stalden. Det er et slyngesykrometer, der har et vådt og et tørt termometer, hvor forskellen på vådt og tørt termometer bestemmer luftfugtigheden. Skalaen på siden af termometeret bruges sammen med de to aflæste temperaturer til at bestemme luftfugtigheden.



Figur 2. Slyngesykrometer til måling af temperatur og luftfugtighed. Kilde Ebay

Fejlkilder

Luftflowet skulle have været målt med en varmtråds måler for at kontrollere, om den teoretiske luftmængde var i god overensstemmelse med den faktiske. Fordi der ikke var en lang nok tromle efter ventilatoren, måtte denne metode afbrydes, da det målte flow faldt, når ventilationen i stalden blev øget i begyndelsen af målingen. Det betyder, at det faktiske luftflow kan afvige fra det teoretiske luftflow.

Da målingerne af fugt og temperatur blev udført med det samme instrument, vil enhver fejlvisning påvirke resultatet ligeligt for de forskellige VVX-sammenligninger. Derimod kan aflæsningen af de analoge termometre være forkert, da det er svært at aflæse mere præcist end med 0,3 graders aflæsningsnøjagtighed.

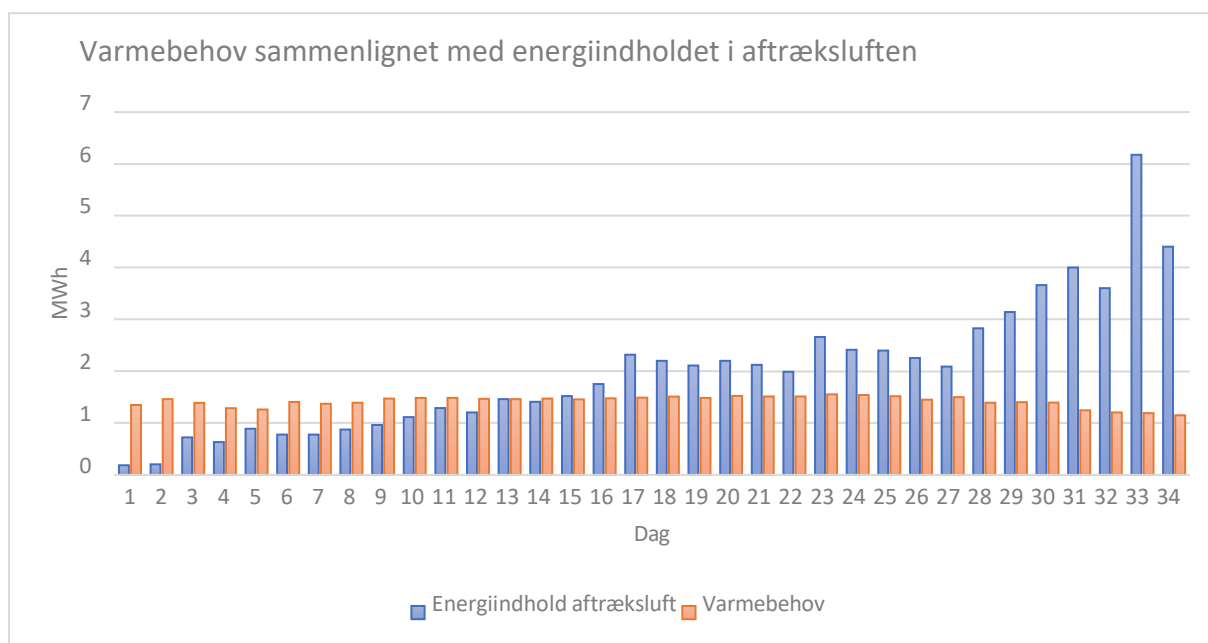
Aflæsningen af luftens entalpi lavet i Mollier-diagrammet for luften, kan aflæses forkert, hvilket kan bidrage til misvisende resultater.

I de sidste dage af opdrætsperioden kan ventilationsflowet variere lidt, da ventilationen ikke er styret af en fast miniventilationsværdi. Styringen regulerer kapaciteten automatisk og kan på aflæsningstidspunktet ventilere med en kapacitet, der ikke svarer til den gennemsnitlige kapacitet for døgnet, hvilket kan gøre resultatet noget misvisende.

5 Resultat

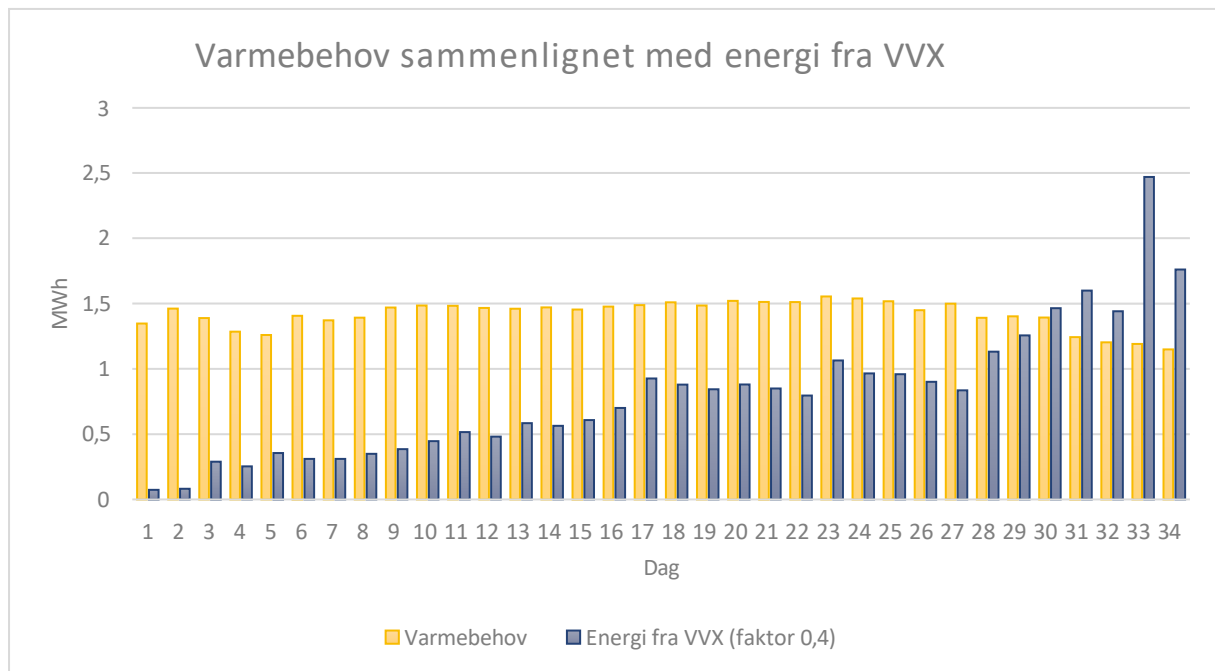
Brugbar varmeenergi i aftræksluft og varmebehov

Figur 3 viser energiindholdet i udsugningsluften sammenlignet med varmebehovet i stalden, dag for dag i den pågældende vækstcyklus. Her ses det, at allerede på opvækst dag 13 er varmebehovet (tilført energi fra fyret til den aktuelle stald) lige så stort som energiindholdet i aftræksluften (forskellen i energi mellem indblæsnings- og aftræksluft).



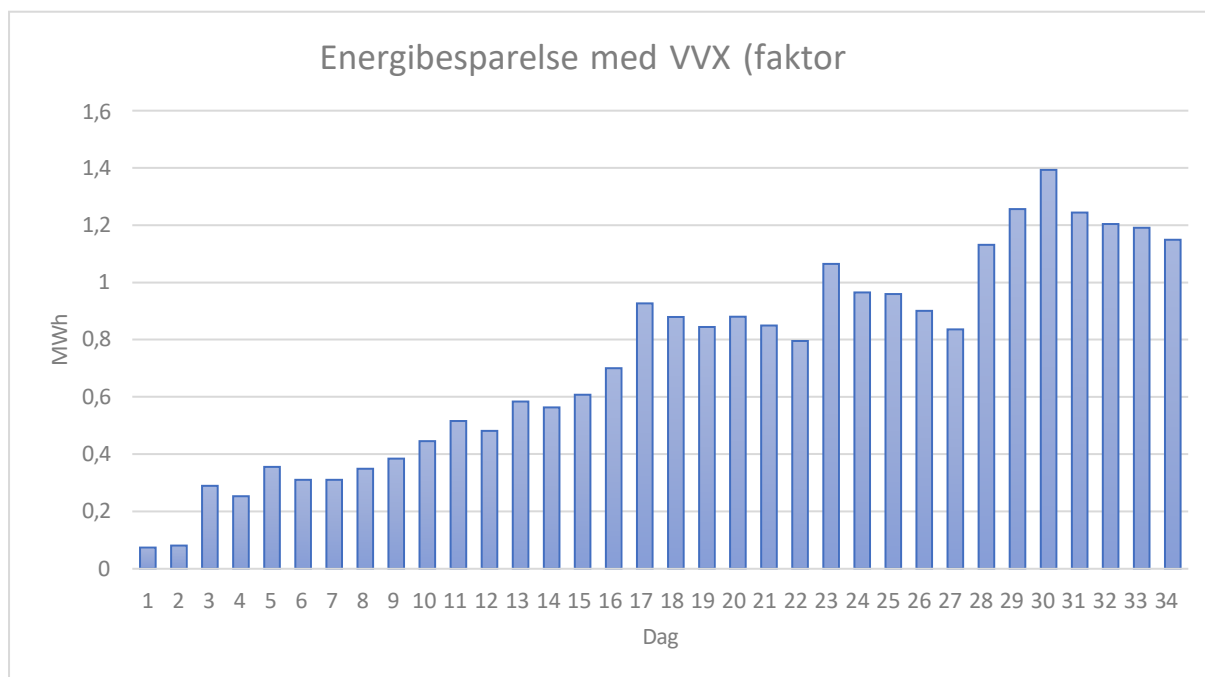
Figur 3. Varmebehov sammenlignet med energiindholdet i aftræksluften

I figur 4 har vi indtastet en faktor på 0,4, hvilket betyder, at 40 % af energien i aftræksluften bruges (se figur 3). Dette er den værdi, som den rekuperative varmeveksler fik efter måling. Læg mærke til, at der nu går indtil dag 30, før energien fra varmeveksleren overstiger behovet.



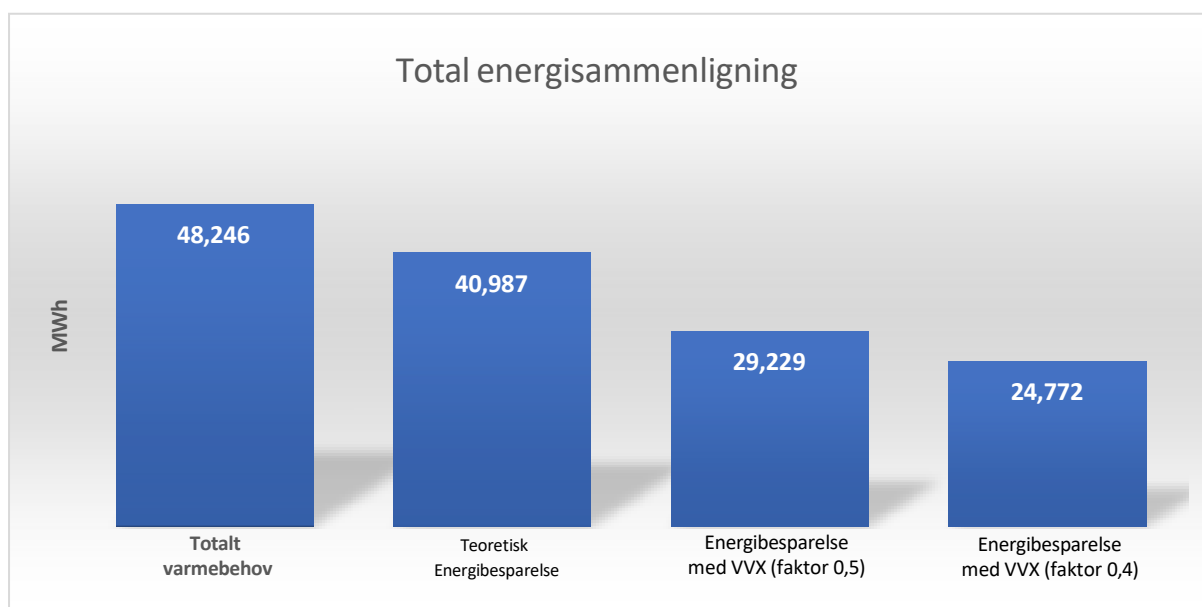
Figur 4. Varmebehov sammenlignet med energien, som varmeveksleren giver ved en faktor på 0,4

Figur 5 viser de energibesparelser, der kan opnåes med en faktor 0,4 hver dag i en opvækstcyklus. Bemærk, at besparelsen på dagene 30–34 ikke kan være større end behovet og derfor afviger i forhold til figur 4.



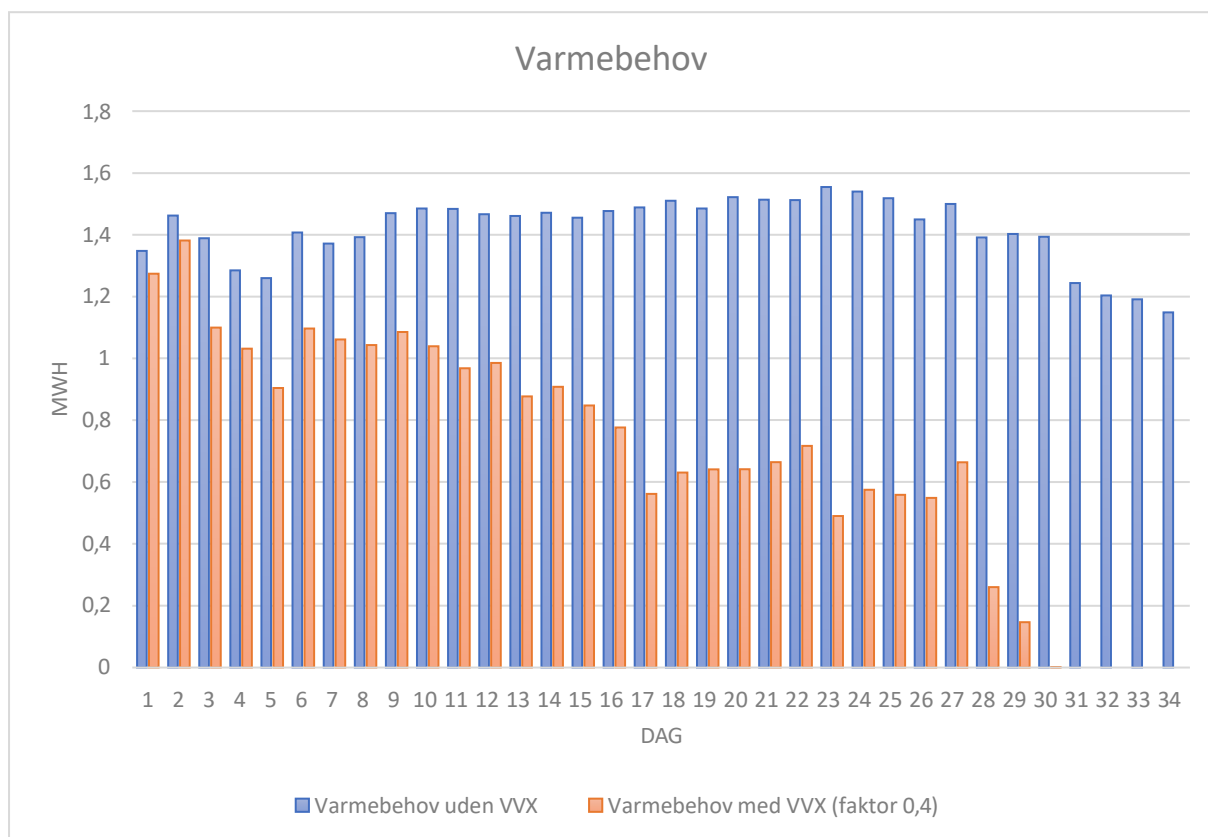
Figur 5. Energibesparelse med varmeveksler ved en faktor på 0,4

Figur 6 viser det samlede varmebehov i hele opdrætscyklussen (34 dage). Det kan sammenlignes med energibesparelsen med de to forskellige faktorer beregnet ud fra målte værdier af de to varmevekslere (regenerativ VVX faktor 0,5, rekuperativ VVX faktor 0,4). Den teoretiske energibesparelse er medtaget, så den kan sammenlignes med andre faktorer, der kan beregnes, hvis der er adgang til måleværdier på andre varmevekslere end de to, der sammenlignes med hinanden i denne undersøgelse.



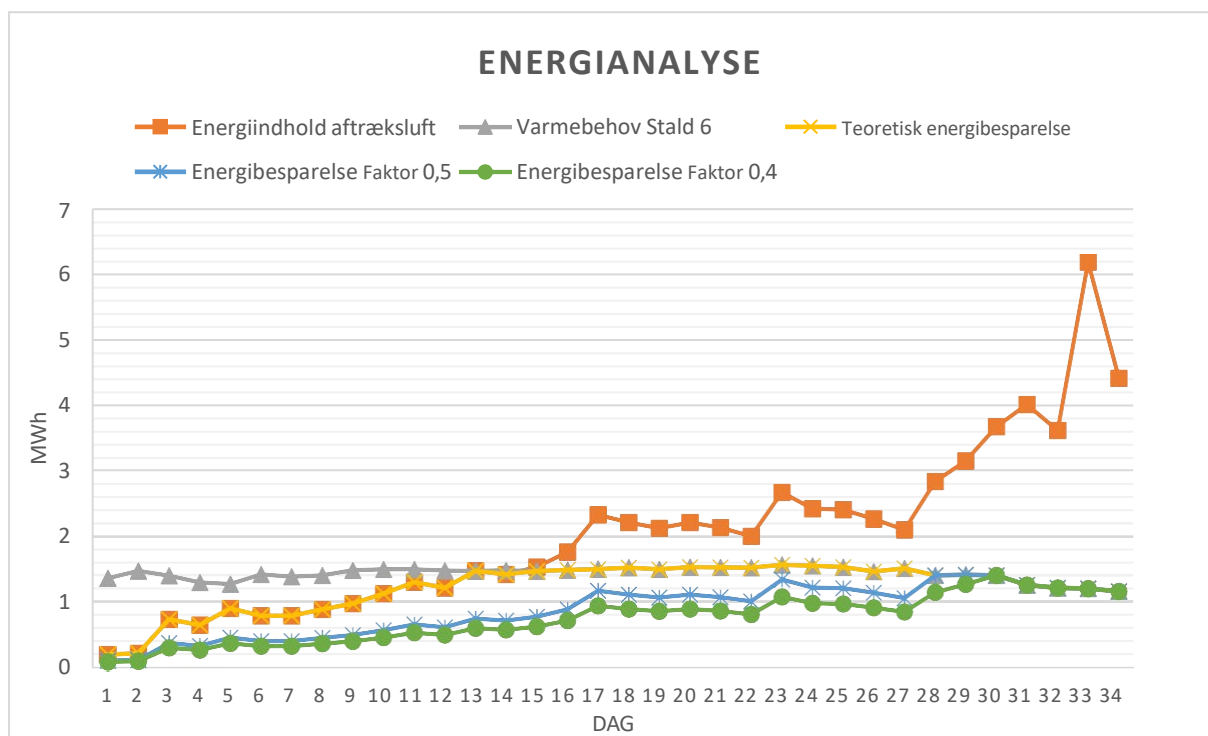
Figur 6. Total energisammenligning mellem varmebehovet og energibesparelsen

Figur 7 viser varmebehovet (fra kedlen), som det ser ud i dag uden varmeveksler, og hvordan det ser ud med luftforvarmning med varmeveksler med faktor 0,4. Hvis alle stalde havde været udstyret med denne type varmeveksler, kunne fyret have været slukket omkring dag 30 i opdrætscyklussen.



Figur 7. Varmebehov med og uden varmeveksler (faktor 0,4)

I figur 8 har vi samlet energiindholdet i aftræksluften, varmebehovet, teoretisk energibesparelse og energibesparelsen med de forskellige faktorer på varmevekslerne. Man kan se, at med en faktor 0,5 bliver stalden selvforsynende med varmeenergi omkring dag 28 og med en faktor på 0,4 er det omkring dag 30.

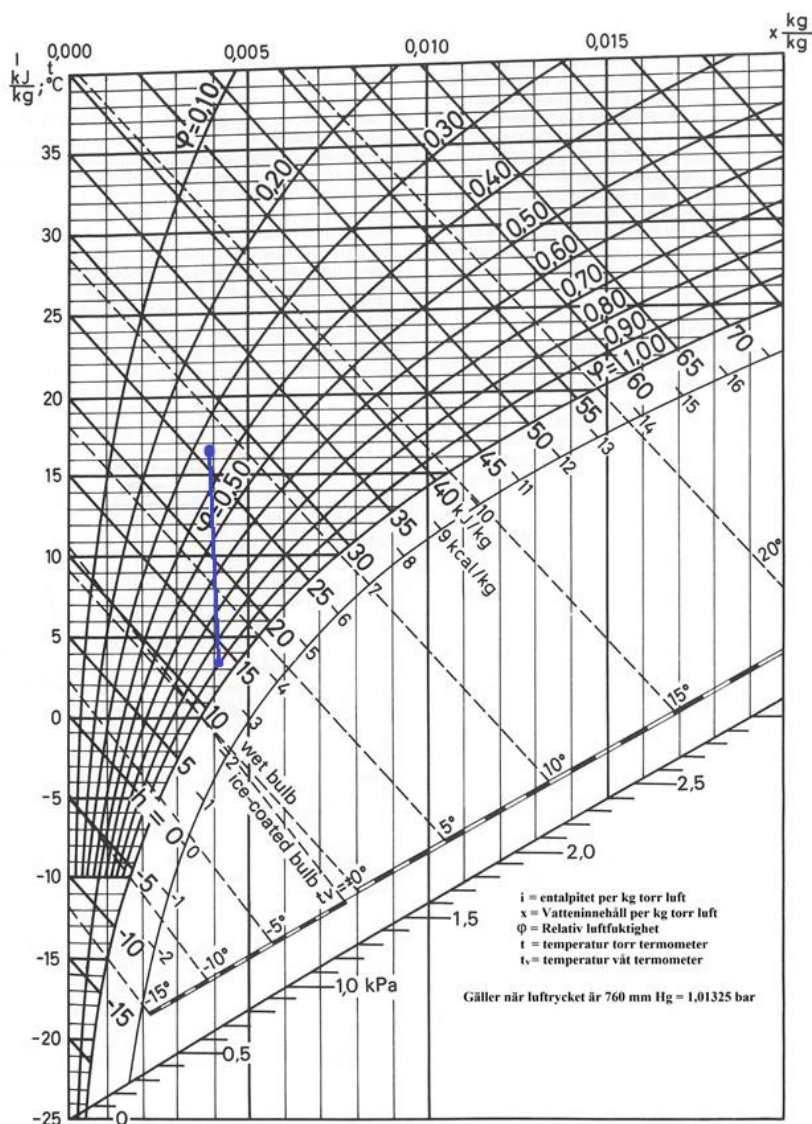


Figur 8. Energianalyse, der viser varmebehov, energiindhold i aftræksluften, teoretisk energibesparelse og energibesparelsen ved de forskellige faktorer (0,4 og 0,5)

Vurdering af forskellige varmeveksleres påvirkning af klimaet i stalden

For at vurdere, hvordan klimaet påvirkes i stalden, anvendtes bl.a. målte værdier fra de to forskellige varmevekslere. Figur 9 nedenfor viser, hvordan luftens tilstand ændrer sig på vej gennem pladevarmeveksleren (den rekuperative). Udelufttemperaturen hæves med 13°C (3,5–16,5°C), og den absolutte luftfugtighed forbliver konstant gennem varmeveksleren. Den relative luftfugtighed sænkes fra 90 % til 34 % på vej gennem varmeveksleren. Staldens relative luftfugtighed (ved aftræksluftindtag) blev målt til 53 % ved alderen 21 dage på kyllingerne.

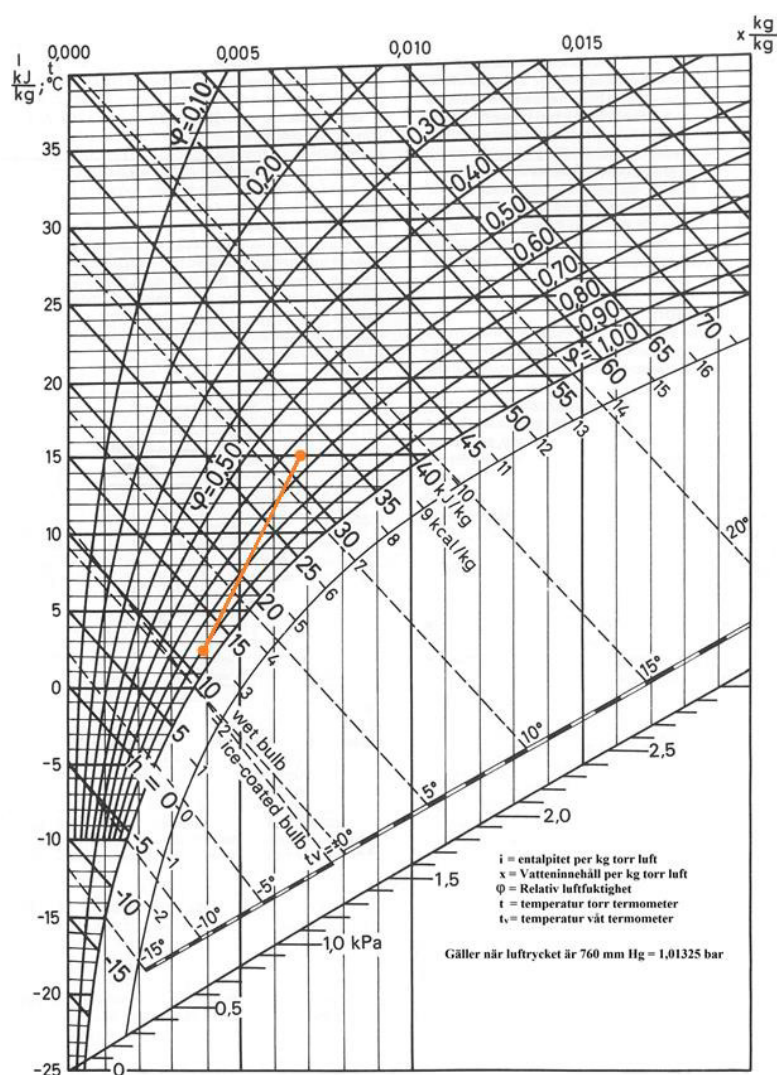
På dette aldersstadiet søger man at holde luftfugtigheden lav for at holde strøelsen tør. Den personlige vurdering af strøelsen er, at den i øjeblikket er af god kvalitet, den er tør og porøs med nogle enkelte små hårde dele, den er intetsteds klistret.



Figur 9. Rekuperativ varmeveksler (pladevarmeveksler) i luftens mollierdigram. Kilde: Fagergren, 2018

Figur 10 viser, hvordan luftens tilstand ændres gennem den roterende varmeveksler. Luftens temperatur hæves med $12,5^{\circ}\text{C}$ ($2,5\text{-}15^{\circ}\text{C}$), og luftens relative fugtighed sænkes fra 90 % til 65 %. I modsætning til den rekuperative varmeveksler i figur 8 øges den absolutte luftfugtighed her med cirka tre gram pr. kilogram tør luft. Den mere fugtige luft vil have en negativ effekt på staldens klima, da luftfugtigheden bliver højere. Den relative luftfugtighed i stalden blev målt til 72 % (ved aftræksluftindtag) ved alderen 25 dage på kyllingerne.

Allerede på dette aldersstadium søges lav luftfugtighed i stalden for at holde strøelsen tør. Den personlige vurdering af strøelsens kvalitet er, at det er mindre godt, det er hårdt på store områder og klæbrigt på enkelte mindre områder. Det er klart mere fugtigt end i tilfældet med den rekuperative varmeveksler.



Figur 10. Regenerativ varmeveksler (roterende) i luftens mollierdiagram. Kilde: Fagergren, 2018

6 Diskussion

Metodediskussion

Vi havde tænkt os at foretage en kontrolmåling af det teoretiske luftflow ved hjælp af varmetrådsmålere, der måler luftens hastighed, som så kan bruges til at beregne luftflowet. Da målingen skulle udføres, bemærkede vi, at når vi øgede ventilationsflowet, faldt vores måleværdier i tre gentagne målinger. Dette førte til, at målingen blev afbrudt, da de aflæste værdier ikke kunne passe. En sandsynlig årsag er, at vi ikke havde en lang nok ubrudt luftkanal efter den aksiale blæser, der sidder i tromlen. Lufttromlen var ikke lang nok til at udføre målingen.

Den faktor, der i undersøgelsen er brugt til at benævne varmevekslernes effektivitet, er et mål for, hvor meget energi der returneres ($\dot{m}_{\text{indsugningsluft}} \cdot \dot{t}_{\text{ute}}$) i forhold til den samlede energiforskel ($\dot{m}_{\text{aftræksluft}} \cdot \dot{t}_{\text{ute}}$). Hvilket altså ikke er det samme som temperaturvirkningsgrad.

Resultatdiskussion

Figur 3 viser, hvor meget energi der afgives fra fyret til den pågældende stald, og hvor meget energi der går tabt for at forvarme indsugetluft til samme tilstand, som den har, når den forlader stalden gennem aftrækslufttromlen. Mængden af energi, der forlader stalden, ses som en potentiel energikilde, der kan bruges, hvis der installeres en varmeveksler. Når kyllingerne har en alder på 28 dage, går der cirka dobbelt så meget energi tabt ved ventilation (ventilationstab) i forhold til den, der tilføres fra fyret. Når man tænker på varmebalancefaktorerne, kan man her se, at strøelsen, kyllingerne og det elektriske udstyr bidrager med store mængder energi. Det er tænkeligt, at kyllingerne står for størstedelen af den frigivne varmeenergi, da kyllingerne tilsammen vejer omkring 34.500 kg og har en kropstemperatur på omkring 40 °C (målt værdi).

Når vi så går videre til figur 4, forventer vi, at 40 % af den energi, der forlader stalden i aftrækslufttromlen, kan bruges til at forvarme luften. Det er denne faktor (0,4), vi målte og beregnede på et eksisterende anlæg med rekuperativ varmeveksler. Grunden til at vi ikke bruger faktor 0,5 (regenerativ VVX), er at denne varmeveksler returnerer fugt, og så er varmebalancen ikke korrekt, som vi viste tidligere. Varmebalancen forudsætter, at den samme mængde luft udveksles for at holde luftfugtighed og temperatur konstant. Når der tilføres fugt til luften, skal ventilation og varmetilførsel øges for at holde luftfugtigheden og temperaturen konstant.

Her ses det, at den energi, der kan bruges til at forvarme indblæsningsluften, først overstiger varmebehovet på dag 30.

Hvis det havde været varmere udenfor, var dette knudepunkt kommet tidligere, da bl.a. mindre energi var forsvundet gennem vægge og tag p.g.a. lavere temperaturforskel. Ved opvækst om sommeren kan det ske, at varmen til stalden slukkes allerede dag 21 (afhængig af vejret) uden brug af varmeveksler.

Når vi ser på den samlede varmeenergibesparelse (figur 6), kan vi se, at den samlede energibesparelse for cyklussen vil være omkring 50 %. Det kan virke lidt mærkeligt, når man tænker på, at vi havde en faktor på 0,4. Det, der sker, er i slutningen af avlscyklussen, der er så meget energi at bruge, at det er nok til at dække 100% af varmebehovet. Denne energibesparelse kan sammenlignes med den, der er dokumenteret i en tidligere undersøgelse (Johansen, 2012). Undersøgelsen fandt en energibesparelse på 80%, men denne undersøgelse blev udført ved en gennemsnitlig udendørstemperatur på 8,75°C, gennemsnitstemperaturen i vores undersøgelse er -0,17°C udendørs. Det er meget rimeligt at antage, at ved en højere udetemperatur er varmebehovet lavere, hvilket medfører en procentuel højere energibesparelse fra varmeveksleren. Når vi ser på de første dage i figur 4, ser vi, at vi ikke kan spare så stor en procentdel af varmebehovet sammenlignet med de sidste dage. Ved en højere udetemperatur ville det formentlig være muligt at spare procentuelt mere energi i starten af vækstcyklussen. Det er formentlig derfor, vi når frem til i vores undersøgelse, at kun omkring 50 % af varmeenergien kan spares.

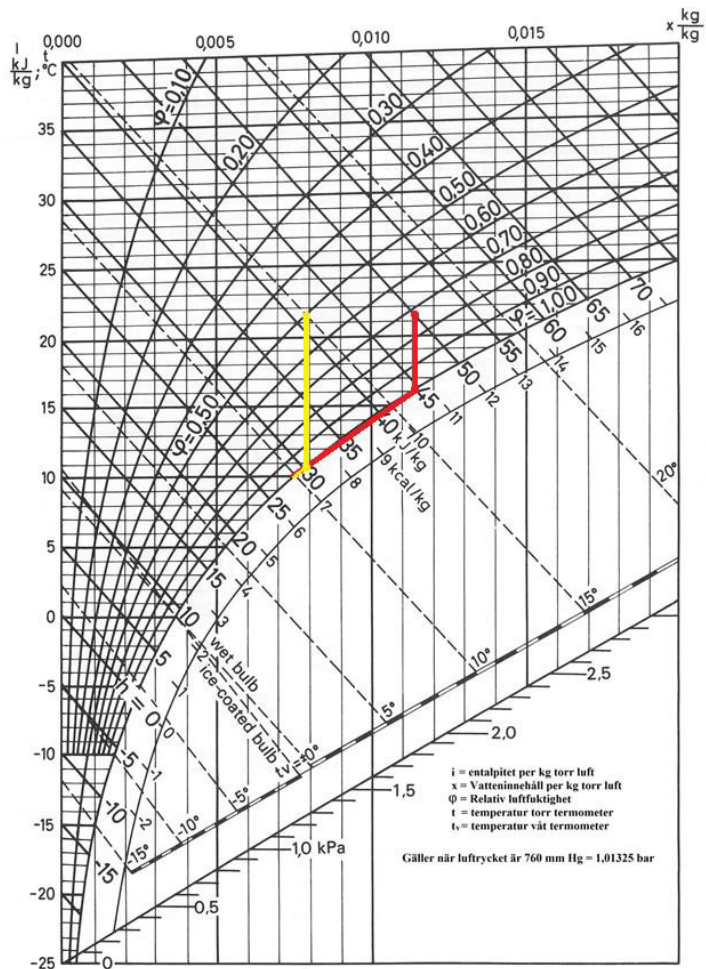
Ved henvendelse til forhandlere af den regenerative (roterende) varmeveksler blev det hævdet, at en af de største grunde til at vælge deres varmeveksler var, at der ikke var kondensvand, der skulle afledes ved lave udendørstemperaturer. Så begyndte vi at tænke lidt over, hvordan det kunne ske og besluttede at kontrollere, så fugten ikke blev sendt tilbage i stalden. Ved kontrol af deres prøvetal (mpael, 2018) lod det til, at fugt blev returneret, da tallene blev sat ind i mollier-diagrammet for luft, var punkterne ikke helt på linje, som de skulle, hvis mængden af fugt er den samme pr. kg tør luft.

Vi lavede derfor vores egne målinger, og resultatet kan ses på figur 10, det er cirka tre gram vand pr. kg tør luft, der returneres. Dette vil medføre en uønsket stigning i luftfugtighed i stalden, hvilket igen vil resultere i, at kontrolsystemet skal øge varmetilførslen og ventilationen for at "fortynde" luften med tørrere luft udefra. Dette fører til en reduktion i de samlede energibesparelser. Den tilbageførte fugt er formentlig årsagen til, at faktoren bliver bedre, da den tilbageførte fugt er med til at give luften en højere entalpi.

Da målingen blev foretaget, var den relative luftfugtighed i stalden ret høj (72%), dette vil føre til, at mere vand kondenserer på den kolde rotor og kan bidrage til, at mere fugt bliver returneret gennem henholdsvis kondensering og fordampning. Hvis luftfugtigheden havde været lavere i stalden, ville der være blevet returneret mindre fugt gennem denne proces. I figur 11 har vi illustreret forskellen på, om luftfugtigheden i stalden er 72 %, eller hvis den havde været 50 %, og luften køles ned til 10 grader af rotoren. Det er derfor vigtigt at være påpasselig med at lade luftfugtigheden i stalden stige for højt, det kan medføre en selvforstærkende effekt af fugttilbageføringen (jo mere fugtig luften bliver, jo mere fugt tilbageføres). Yderligere faktorer, der påvirker fugttilførslen, er rotorens hastighed og udetemperaturen (Enventus, 2019). Hvis rotorens hastighed reduceres, overføres mindre fugt fra udsugningsluften til aftræksluften, men samtidig reduceres temperaturvirkningsgraden. Grunden til at det sker er formentlig, at den varme luft tager noget af vandet med sig, fra den opvarmede rotor. Virkningsgraden er sandsynligvis sænket, fordi luften ikke kan frigive sin varmeenergi til rotoren, da denne del af rotoren allerede er opvarmet.

Ved måling af luften fra den rekuperative varmeveksler, ser det næsten ud som om, der går ca. 0,2 gram vand tabt på vejen gennem varmeveksleren (figur 9), men det er formentlig kun en aflæsningsfejl.

Målte temperaturer og luftfugtigheder fra de to varmevekslertyper kan også ses i bilag 5.



Figur 11. Exempel på olika luftförhållanden i värmeväxlare. Källa: Fagergren, 2018

7 Referencer

Alvarez, H. (2014). *Energiteknik*. Lund: Studentlitteratur.

Bioenergiportalen. (den 10 04 2019). Taget fra Biobränslen vår största energikälla:
http://www.bioenergiportalen.se/?p=1416&m=1656&page=biobransle_-_br_var_storsta_energikalla

Ebay. (den 1 April 2019). Taget fra <https://www.ebay.com/p/Bacharach-SpiritFilled-Sling-Psychrometer-5-to-50c/1922352730>

Enventus AB. (den 26 03 2019). *Enventus*. Taget fra Roterande värmväxlare produktkatalog: http://u236384.web01.cust.bluerange.se/wp-content/uploads/2014/11/Catalogue_compl_SE.pdf

Fagergren, S. (2016). *Teknisk formelsamling*. Kalmar.

Fagergren, S. (2018). *Teknisk formelsamling*. Kalmar.

Jensen, L. (Augusti 2010). Fuktproblem i bostäder med regenerativ ventilationsvärmeåtervinning. *Byggteknik*.

Johansen, K. (den 26 03 2019). *Rokkedahl-energi*. Taget fra Effektmåling ved brug af varmeveksler i slagtekyllingeproduktion: <http://rokkedahl-energi.dk/wp-content/uploads/2018/04/Effektm%C3%A5ling-af-varmeveksler-Energi-Nord-2.pdf>

MPA. (den 26 03 2019). Taget fra Värmväxlare:
<http://www.mpael.se/produkter/varmevaxlare/>

Munters. (den 26 03 2019). Taget fra TU800 Chimney fan:
<https://www.munters.com/en/munters/products/fans-light-filters/euroemme-tu800-chimney-fan/>

SMHI. (Januari/Februari 2019). Taget fra Senaste oservationerna:
<https://www.smhi.se/vadret/vadret-i-sverige/observationer#ws=wpt-a.proxy=wpt-a.tab=vader,param=t>

Svensk Fågel. (den 26 03 2019). Taget fra Fågel i siffror: <https://svenskfagel.se/fagel-i-siffror/>

Svensk Fågel. (den 26 03 2019). Taget fra Klimatsmart svensk kyckling:
<https://svenskfagel.se/klimatsmart-svensk-kyckling/>

8 Liste over figurer og tabeller

Figurer

Figur 1. Oversigt over kyllingestald 958 m ² , der viser aftræksindtag (T), udsugningsventilatorer (FF) og sensorplacering	2
Figur 2. Slyngepsykrometer til måling af temperatur og luftfugtighed. Kilde: Ebay	10
Figur 3. Varmebehov sammenlignet med energiindholdet i udsugningsluften	12
Figur 4. Varmebehov sammenlignet med energi leveret af varmeveksleren med faktor på 0,4	13
Figur 5. Energibesparelse med varmeveksler ved en faktor på 0,4	14
Figur 6. Total energi-sammenligning mellem varmebehovet og energibesparelsen	15
Figur 7. Varmebehov med og uden varmeveksler (faktor 0,4)	16
Figur 8. Energianalyse som viser varmebehov, energiindhold i udsugningsluften, teoretisk energibesparelse og energibesparelse ved de forskellige faktorer (0,4 og 0,5)	17
Figur 9. Rekuperativ varmeveksler (pladevarmeveksler) i luftens mollierdiagram. Kilde: Fagergren, 2018	18
Figur 10. Regenerativ varmeveksler (roterende) i luftens mollierdiagram. Kilde: Fagergren, 2018	19
Figur 11. Eksempel på forskellige luftforhold i varmevekslere. Kilde: Fagergren, 2018	23

Tabeller

Tabel 1. Offset ventilationskapacitet	3
Tabel 2. Energibalance	9

Bilag

Bilag 1. Aflæste temperaturer og luftfugtigheder (januar/februar -18)

Dag	Stald		Udendørs	
	Temp (°C)	Fugt (%)	Temp (°C)	Fugt (%)
1	33,8	29	-0,3	60
2	33,3	35,5	-1,9	78
3	32,4	36,2	0,2	88
4	31,8	37,1	3,3	91
5	31	38,3	0,1	83
6	30,3	43,5	3,2	93
7	30,1	46,2	4	98
8	29,5	47,2	0,8	95
9	29	50	-1,5	86
10	28,3	50,5	2,8	97
11	27,8	50,8	-1,4	75
12	27,8	51	0,6	98
13	27,4	53,4	-1,4	70
14	26,7	51	-0,9	64
15	27,1	51,8	-2,5	95
16	26,8	53,9	3,8	95
17	27	55,4	-4,1	79
18	26,2	54,1	-3,3	86
19	25,6	54,2	-0,4	89
20	26	52,9	-2,4	99
21	25,1	51,6	1,3	91
22	23,4	53,1	-2	82
23	24,5	57,3	-1,5	81
24	24	55	-0,7	69
25	22,1	56	-2,4	76
26	22,6	55,2	-0,2	80
27	22	55,1	2,1	99
28	22	55,5	1,9	92
29	22	57,2	-3,1	84
30	20,5	55,4	0,4	85
31	21,8	56,4	1,5	97
32	21,3	58,3	2,6	90
33	21,4	58	-0,2	91
34	20,7	59,9	-4,1	92
Gennem -snit	26,21471	50,76471	-0,16765	86,11765

Bilaga 2. Beräknade ventilationsparametrar (januari/februari -18)

Dag	Udsugningsventilation		
	Ventilation (%)	Volumenflow (m ³ /h)	Masseflow kg/h
1	0,5	458	521
2	0,5	458	520
3	2	1833	2087
4	2	1833	2090
5	2,5	2291	2617
6	2,5	2291	2618
7	2,5	2291	2617
8	2,5	2291	2621
9	2,5	2291	2622
10	3	2749	3153
11	3,5	3208	3685
12	3,5	3208	3685
13	4	3666	4212
14	4	3666	4226
15	4	3666	4220
16	6	5499	6329
17	6	5499	6321
18	6	5499	6342
19	6,5	5957	6883
20	6,5	5957	6878
21	7,5	6873	7964
22	6,5	5957	6938
23	8	7332	8493
24	8	7332	8515
25	8	7332	8566
26	8	7332	8554
27	9	8248	9644
28	12	10997	12855
29	10	9165	10706
30	15	13747	16153
31	16	14663	17145
32	16	14663	17160
33	24	21995	25736
34	15	13747	16110
Totalt		213994	248786

Bilaga 3. Omräkning av avlästa värden

Dag	Afläst ventilationskapacitet (%)	Reel ventilationskapacitet (%)
1	1	0,5
2	1	0,5
3	4	2
4	4	2
5	5	2,5
6	5	2,5
7	5	2,5
8	5	2,5
9	5	2,5
10	6	3
11	7	3,5
12	7	3,5
13	8	4
14	8	4
15	8	4
16	12	6
17	12	6
18	12	6
19	13	6,5
20	13	6,5
21	15	7,5
22	13	6,5
23	16	8
24	16	8
25	16	8
26	16	8
27	18	9
28	22	12
29	20	10
30	25	15
31	26	16
32	26	16
33	34	24
34	25	15
Slagt		

Bilaga 4. Energivärden

Dag	Δi	kJ/dag	MWh/dag	Varmebehov (MWh)	Energibesparelse (MWh)			
					Stald 6	Teoretisk	Faktor 0,5	Faktor 0,4
				Samtlige Afd.				
1	53	662712	0,184	11,79	1,347597	0,184	0,092	0,0736
2	58,5	730080	0,202	12,79	1,461897	0,202	0,101	0,0808
3	52	2604576	0,723	12,15	1,388745	0,723	0,3615	0,2892
4	45,5	2282280	0,633	11,24	1,284732	0,633	0,3165	0,2532
5	51	3203208	0,889	11,02	1,259586	0,889	0,4445	0,3556
6	44,5	2796024	0,776	12,31	1,407033	0,776	0,388	0,3104
7	44,5	2794956	0,776	12	1,3716	0,776	0,388	0,3104
8	50	3145200	0,873	12,18	1,392174	0,873	0,4365	0,3492
9	55	3461040	0,961	12,86	1,469898	0,961	0,4805	0,3844
10	53	4010616	1,114	12,99	1,484757	1,114	0,557	0,4456
11	52,5	4643100	1,289	12,98	1,483614	1,289	0,6445	0,5156
12	49	4333560	1,203	12,83	1,466469	1,203	0,6015	0,4812
13	52	5256576	1,46	12,78	1,460754	1,46	0,73	0,584
14	50	5071200	1,408	12,87	1,471041	1,408	0,704	0,5632
15	54	5469120	1,519	12,73	1,455039	1,455	0,7595	0,6076
16	41,5	6303684	1,751	12,92	1,476756	1,477	0,8755	0,7004
17	55	8343720	2,317	13,02	1,488186	1,488	1,1585	0,9268
18	52	7914816	2,198	13,21	1,509903	1,51	1,099	0,8792
19	46	7598832	2,11	12,99	1,484757	1,485	1,055	0,844
20	48	7923456	2,2	13,31	1,521333	1,521	1,1	0,88
21	40	7645440	2,123	13,24	1,513332	1,513	1,0615	0,8492
22	43	7160016	1,988	13,23	1,512189	1,512	0,994	0,7952
23	47	9580104	2,661	13,6	1,55448	1,554	1,3305	1,0644
24	42,5	8685300	2,412	13,47	1,539621	1,54	1,206	0,9648
25	42	8634528	2,398	13,28	1,517904	1,518	1,199	0,9592
26	39,5	8109192	2,252	12,68	1,449324	1,449	1,126	0,9008
27	32,5	7522320	2,089	13,12	1,499616	1,5	1,0445	0,8356
28	33	10181160	2,828	12,17	1,391031	1,391	1,391	1,1312
29	44	11305536	3,14	12,27	1,402461	1,402	1,402	1,256
30	34	13180848	3,661	12,19	1,393317	1,393	1,393	1,393
31	35	14401800	4	10,88	1,243584	1,244	1,244	1,244
32	31,5	12972960	3,603	10,53	1,203579	1,204	1,204	1,204
33	36	22235904	6,176	10,42	1,191006	1,191	1,191	1,191
34	41	15852240	4,403	10,05	1,148715	1,149	1,149	1,149
Totalt		246016104	68,32	422,1	48,24603	40,987	29,2285	24,7718

Bilaga 5. Uppmätta värden på värmeväxlare

	Regenerativ (Roterende)		Rekuperativ (PladeVVX)	
	Temperatur (°C)	Fugtighed (%)	Temperatur (°C)	Fugtighed (%)
Udendørs	2,5	90	3,5	90
Udsugningsluft	21,5	72	22,5	53
Aftræksluft	15	65	16,5	34

Bilaga 6. Kastlösa (stallet där studien utförs)



Bilag 7. Rekuperative varmevekslere med tilhørende ventilatorer



Bilaga 8. Regenerativ värmeväxlare med tillhörande fläktar

