

CHALMERS



Energisnål avfuktning av biogas

Marcus Benzon
Aryan Dawody
Olle Gunnarsson
Pontus Gustafson
Johan Götvall
Niklas Persson

Institutionen för Energi och miljö
Avdelningen för Värmeteknik och maskinlära
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012

Kandidatarbete/rapport nr ENMX02-12-12

KANDIDATARBETE

Energisnål avfuktning av biogas

Kandidatarbete i Energi och miljö

MARCUS BENZON

ARYAN DAWODY

OLLE GUNNARSSON

PONTUS GUSTAFSON

JOHAN GÖTVALL

NIKLAS PERSSON

HANDLEDARE

Viktor Andersson

EXAMINATOR

Lennart Vamling

Institutionen för Energi och miljö
Avdelningen för Värmeteknik och Maskinlära
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012

Energisnål avfuktning av biogas

Kandidatarbete

MARCUS BENZON

ARYAN DAWODY

OLLE GUNNARSSON

PONTUS GUSTAFSON

JOHAN GÖTVALL

NIKLAS PERSSON

© MARCUS BENZON, ARYAN DAWODY, OLLE GUNNARSSON, PONTUS
GUSTAFSON, JOHAN GÖTVALL, NIKLAS PERSSON
2012

Kandidatarbete ENMX02-12-12
Institutionen för Energi och miljö
Avdelningen för Värmeteknik och Maskinlära
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46(0)31-772 1000

Chalmers Reproservice
Göteborg, 2012

Energy efficient dehumidification of biogas

Bachelor Thesis ENMX02-12-12

MARCUS BENZON, ARYAN DAWODY, OLLE GUNNARSSON, PONTUS
GUSTAFSON, JOHAN GÖTVALL, NIKLAS PERSSON

Department of Energy and Environment

Division of Heat and Power Technology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The demand for more energy efficient and environmentally friendly processes is great in the society today. The aim of the project was to find alternative methods to, as energy efficient as possible, dehumidify biogas that would eventually replace natural gas. Furthermore, it was desirable to analyse the possibility to further dehumidify the gas to avoid condensation in the pipe during transportation.

Energy demands for each method has been calculated and compared to today's consumption. Furthermore, the equipment necessary to accomplish the dehumidification was dimensioned and the purchase cost estimated. The environmental impact of each method was also taken into consideration.

The report shows the possibility to not only increase the efficiency but also the dehumidification. When performed with silica gel, the energy demands of the process can be reduced by 84 %. The energy saved, 6.1 kW, and the possibility to increase the dehumidification, however, comes with larger investment costs, 41000 \$.

Energisnål avfuktning av biogas

Kandidatarbete ENMX02-12-12

MARCUS BENZON, ARYAN DAWODY, OLLE GUNNARSSON, PONTUS

GUSTAFSON, JOHAN GÖTVALL, NIKLAS PERSSON

Institutionen för Energi och miljö

Avdelningen för Värmeteknik och maskinlära

Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Behovet av energisnålare och miljövänligare processer är stort i samhället i dag. Syftet med projektet var att ta fram energisnålare avfuktningsmetoder för biogas, som sedermera ersätter naturgas. Vidare var det önskvärt att undersöka möjligheten att avfukta gasen ytterligare för att undvika kondensering i ledningen under transporter.

Energiberäkningar har genomförts, där nuvarande förbrukning ställts mot undersökta alternativ. Vidare beräknades, för alternativen, såväl dimensionering som preliminära investeringskostnader för nödvändig utrustning. Även miljöpåverkan undersöktes för varje metod.

Rapporten visar på möjligheten att energieffektivisera processen och dessutom öka avfuktningen. Genomförs avfuktningen med silikagel kan energibehovet minskas med 84 %. Den insparade energin, 6.1 kW, och möjlig möjligheten till ökad avfuktningen ställs dock mot större investeringskostnader, 41000 \$.

ERKÄNNANDE

Projektet har utförts av sex studenter vid avdelningen för Värmeteknik och Maskinlära, våren 2012. Det har genomförts i ett samarbete mellan Göteborg Energi och Chalmers Tekniska Högskola. Samtliga studenter läser Kemiteknik.

Vi vill tacka vår handledare, Viktor Andersson, för din tillgänglighet och hjälp med svar på våra frågor. Vi vill tacka vår examinator, Lennart Vamling, för tips och vägledning i vår strävan att förbättra rapporten. Tack även till Göteborg Energi, Lennart Hjalmarsson och Rolf Eklund för studiebesök och information om dagens anläggning.

Avslutningsvis, ett tack till Dr. Alireza Bahadori. Ditt tidigare arbete, dina snabba svar på våra frågor och din tillåtelse att använda dina grafer har varit till stor hjälp genom arbetet.

Chalmers, maj 2012
Aryan, Johan, Marcus, Niklas, Olle och Pontus

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Bakgrund	1
1.2.1	Problemformulering	1
1.2.2	Avfuktningssalternativ	2
1.2.3	Luftkonditionering	2
1.2.4	Koppling till avfuktning av biogas	2
2	Anläggningen i dag	3
2.1	Energibehov	3
3	Membranteknik	7
4	Torkmedel	9
4.1	Flytande torkmedel	9
4.1.1	Avfuktning med salt	10
4.1.2	Trietylglykol	12
4.2	Fasta torkmedel	13
4.2.1	Silikagel	13
4.2.2	Aktiverad aluminiumoxid	14
4.2.3	Molekylsikt	14
4.2.4	Jämförelse av torkmedel	14
4.2.5	Anläggningar	15
4.3	Regenerering	15
4.3.1	Regenerering av flytande torkmedel	16
4.3.2	Regenerering av fasta torkmedel	19
5	Dimensionering av utrustning	21
5.1	Dimensionering av kolonn för flytande torkmedel	21
5.2	Dimensionering av packad bädd för fasta torkmedel	22
6	Resultat av energiberäkningar	23
7	Investeringskostnader	25
7.1	För avfuktning med TEG	25
7.2	För avfuktning med silikagel	26
8	Utvärdering	27
8.1	Energibehov och investeringskostnad	27
8.2	Miljö- och hälsopåverkan	27
8.2.1	TEG	27
8.2.2	Silikagel	28
9	Diskussion	29
10	Slutsats	33

Referenser	35
A Dimensioneringsvariabler	I
B Regenereringsdiagram	III
C Kostnadsvariabler	V
D Antaganden	VII
D.1 För TEG	VII
D.2 För fasta torkmedel	VII
E MATLAB-kod	IX
F Bidragsrapport	XIX

Nomenklaturlista

ΔH_{vap}	Förångningsentalpi, vatten	[kJ/kg]
ΔT_{lm}	Logaritmisk medeltemperatur	[K]
δ	Vägg tjocklek, kolonn	[m]
$\dot{m}$	Massflöde	[kg/s]
ψ	Flödesförhållande	[kg/m ³]
ρ_D	Densitet, torkmedel	[kg/m ³]
A	Värmeväxlarens area	[m ²]
c	Torkcykelns längd	[h]
C_b	Koefficient för kolonn med klockbotten	[m/h]
$C_p b$	Koefficient för kolonn med packning	[m/h]
C_e	Inköpskostnad	[\$]
C_P	Värmekapacitet	[kJ/(kgK)]
D_B	Bäddiameter	[m]
D_b	Diameter, klockbotten	[m]
D_p	Diameter, packad kolonn	[m]
D_k	Diameter, kolonn	[m]
E	Gemensam effektivitet	
G	Gasflöde	[kg/s]
g	Gravitationskonstant	[m/s ²]
G_V	Gasvolym	[m ³]
G_v	Masshastighet	[kg/(m ² h)]
H	Höjd	[m]
h	Extra kolonnhöjd	[m]
H_k	Höjd, kolonn	[m]
I_{07}	Konsumentprisindex, 2007	
I_{11}	Konsumentprisindex, 2012	
L	Vätskeflöde	[kg/s]

L_B	Bäddlängd	[m]
M	Massa adsorberat vatten	[kg]
m_D	Massa, bädd	[kg]
m_V	Massa, kolonn	[kg]
M_{H_2O}	Molmassa för vatten	[g/mol]
m_{TEG}	Massflöde, TEG	[kg/h]
N	Antal ideala bottnar	
P	Tryck	[MPa]
Q	Energibehov	[W]
q	Energibehov	[W]
q_{reg}	Energibehov, regenerering	[W]
R	Avfuktningseffektivitet	
S	Tillåten spänning	[MPa]
S_{enhet}	Storleksenhet	
$T_{G,K}$	Gastemperatur	[K]
U	Värmeöverföringskoefficient	[W/(m ² K)]
u	Användbar kapacitet	
V	Gasflöde	[10 ⁶ Nm ³ /dag]
v	Ytgashastigheten	[m/min]
V_D	Torkmedelsvolym	[m ³]
W_v	Kärlväggens tjocklek	[m]
W_{in}	Vätskemängd hos ingående gas	[kg/m ³]
W_{ut}	Vätskemängd hos utgående gas	[kg/m ³]
X	Massfraktion	
Y	Desorptionsenergi	[kJ/kg]
Z	Kompressibilitetsfaktor	
T_{kolonn}	Temperatur på torkmedlet ut ur avfuktningsskolonnen	[°C]

1 Inledning

Intresset för att ersätta fossilt bränsle med grönare alternativ har på senare tid ökat. Metoder att framställa biogas har utvecklats och möjliggjort en viss ersättning av naturgas. Naturgas används i dag bland annat som bränsle i fordon och energikälla i fjärrvärmenät. Göteborg Energi har som vision att ersätta all sin naturgasanvändning med biogas.

Göteborg Energi har, under de senaste fem åren, byggt upp ett samarbete med Gryaab, ett företag som svarar för reningen av avloppsvattnet i Göteborgsregionen. En rötgasanläggning vid Gryaab rötar slam för att bilda biogas som Göteborg Energi senare förädlar till naturgaskvalitet. De två anläggningarna förbinds av en tre kilometer lång ledning genom vilken gasen transporteras. Ledningen är ligger på frostfritt djup men är inte helt oberoende av förändringar i lufttemperaturen.

Innan gasen transporteras måste den avfuktas, detta för att undvika att vatten från den fuktiga gasen kondenserar i ledningen och orsakar driftstopp. Kondensering av vattenånga är ett stort problem.

1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka avfuktningsalternativ för biogas utifrån energiförbrukning, kostnad samt miljö- och hälsopåverkan. Alternativa metoder för avfuktning utvärderas och ställs mot nuvarande för att utreda huruvida dagens metod är den mest energieffektiva. Skulle en alternativ metod ses som fördelaktig gentemot den nuvarande lösningen presenteras ett förslag på hur avfuktningen på detta sätt kan möjliggöras.

1.2 Bakgrund

Biogas och naturgas består båda till största del av metan. Den huvudsakliga skillnaden mellan dem ligger istället i deras respektive ursprung. Naturgas är en ändlig resurs då den kommer från antingen en naturgaskälla eller genom utvinning från råolja. Biogas kommer från biomassa, vilket inte ger något nettotillskott av koldioxid i atmosfären då kolet redan är i omlopp ovan jordskorpan, och är således en fondresurs [1]. För att bilda biogas utnyttjas en rötningsprocess som sker under anaeroba förhållanden. Med hjälp av anaeroba organismer med tillgång till metaboliserande näringsämnen, såsom kväve och fosfor, kan det organiska materialet brytas ner. I detta steg frigörs kol i form av metan och koldioxid, som tillsammans är den efterfrågade rötgasen [2].

1.2.1 Problemformulering

I dag sker avfuktningen genom att en trycksättning av gasen i en eldriven kompressor sänker daggpunkten för gasen och underlättar kondenseringen, vilken då kan ske vid en högre temperatur. Kylan produceras i ett kylaggregat och det kondenserade vattnet bortförs genom en kondensatfälla. Metoden är lättreglerad, vanligt förekommande och välutvecklad. Problemet är metodens oförmåga att möta de högt ställda avfuktningskraven.

En överskådlig bild över tillgängliga alternativ och möjligheten att ersätta eller komplettera den befintliga anläggningen presenteras i rapporten. Processerna utvärderas med avseende på energibehov, kostnad samt miljö- och hälsopåverkan.

1.2.2 Avfuktningsalternativ

Vid mekanisk kylning utnyttjas värmeväxling mellan olika strömmar. Såväl tryck som temperatur är relevanta parametrar att justera för att uppnå en effektiv kondensering. Den kalla ström som kyler gasströmmen kan produceras på olika sätt. Hos Gryaab i dag görs detta med ett vanligt kylaggregat.

Mekanisk kylning används med fördel då fukthalten i gasen är hög. Metoden blir allt mer ineffektiv i takt med att fukthalten sjunker. Det kan då antas fördelaktigt att kombinera kylningen med en torkmedelsbaserad avfuktare, så kallad sorptionsavfuktare.

Avfuktning med torkmedel bygger på att gasen får passera genom en packad bädd eller en packad kolonn, med torkmedel, där vattnet adsorberar eller absorberar till medlet. Torkmedel förekommer både i fast form och i lösning.

Gasen kan också avfuktas med hjälp av membran. Membranteknik utnyttjar att molekyler har olika permeabilitetsförmåga. Gasen passerar ett trycksatt membran som är selektivt för vissa molekyler, i det här fallet vatten. Tidigare studerade membran har visat sig ha hög effektivitet, både vad gäller energi och separation [3]. Små fraktioner av metan och koldioxid riskerar dock att följa med vattnet genom membranet.

1.2.3 Luftkonditionering

Traditionella luftkonditioneringssystem reglerar fukthalt och temperatur i en luftström med hjälp av ett kylaggregat. Systemet måste kunna hantera två belastningar, variationer i temperatur och fukthalt hos den ingående gasen [4].

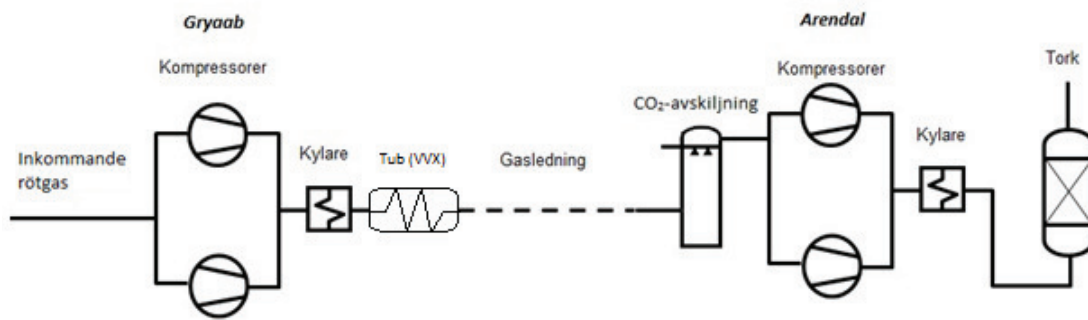
För att möjliggöra energibesparingar har luftkonditioneringsanläggningar integrerade med torkmedel tagits fram. Dessa anläggningar är en kombination av två system. Det ena delsystemet kontrollerar, med hjälp av värmeväxlare och kompressorer, temperaturändringar och det andra tar hand om den latent delen, det vill säga avfuktar luften genom sorption [4]. Det har visats att system med oberoende avfuktningsdel kan energibespara upp till 35 % jämfört med mekaniska avfuktningssystem som saknar värmeåtervinning [5].

1.2.4 Koppling till avfuktning av biogas

Vattenånga i biogasen kan leda till ansamling av vatten i gasledningen. Till följd av detta ökar drifttrycket i ledningarna. Vid fortsatt kondensering täpps rören igen och orsakar driftstopp. Korrosion kan uppstå som även det ökar risken att skada rören, särskilt om biogasen innehåller koldioxid och vätesulfid [6][7][8]. Detta leder till att avfuktning av biogas är nödvändigt.

2 Anläggningen i dag

Gryaabbs nuvarande avfuktningssprocess bygger på mekanisk kylning. Då rötgasen kommer in i anläggningen håller den 1 bars tryck och 30 °C. gasen förs in i två parallella kompressorer där de trycksätts till 3.5 bar. Som en följd av tryckhöjningen ökar även temperaturen till ca 130 °C. En schematisk bild av anläggningen visas i figur 1.



Figur 1: Schematisk bild av dagens avfuktningsanläggning.

Den komprimerade gasen avfuktas i två steg. I det första steget sker detta genom kylning med renat avloppsvatten ner till ca 27 °C. Gasen förs därefter in i det andra avfuktningsssteget, en tubvärmewäxlare med kondensatfälla, där den värmewäxlas mot en 0 °C vatten/propylenglykol-blandning (~ 35 vol% glykol) ner till ca 5 °C. Den största energin går åt till att kyla glykolblandningen. Den avfuktade gasen förs därefter genom den tre kilometer långa gasledningen vidare till Arendal. Det är avfuktningssalternativ till steg två i processen rapporten ämnar undersöka.

På anläggningen i Arendal uppgraderas biogasen till naturgaskvalitet. För att uppnå naturgaskvalitet måste man i två processteg avskilja vätesulfid och koldioxid. Då gasen vid koldioxidavskiljningen blir fuktig måste den återigen avfuktas. Utöver reningen tillsätts en liten mängd propan till gasen för att erhålla samma energivärde som naturgasen som Göteborg Energi distribuerar. Som visas i figur 1 separeras vätesulfid från gasen i ett absorptionstorn, de resterande ämnena i gasblandning passerar absorptionstornet och går in i koldioxid-avskiljningen. Koldioxidavskiljningen sker, likt separationen av vätesulfid, i ett absorptionstorn.

Gasen delas därefter upp i två strömmar, för att sedan trycksättas till omkring 4 bar i två parallella kompressorer. Strömmarna sluts samman och gasen kyls innan den går in i processens sista torksteg, ett adsorptionstorn med packad silikagel.

2.1 Energibehov

Glykolblandningen som används i steg två kyls av en värmepump. I värmepumpen värmewäxlas glykolblandningen med ett köldmedium, R407C. För att möjliggöra jämförelsen med alternativa avfuktningssmetoder, och möta dagens avfuktningsskrav på 1.8 g/s,

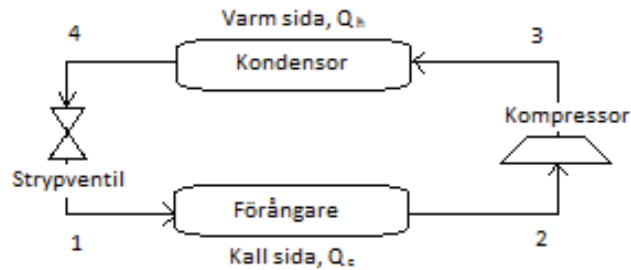
uppskattas elbehovet för den ideala värmepumpen nedan. Avfuktningskravet har först uppskattats genom att vattenångans partialtryck beräknats ur ekvation 1.

$$P_{vatten} = \frac{10^{\frac{A-B}{T+C}}}{760 \cdot 101325} \quad (1)$$

Där A, B och C är Antoineparametrar [9].

Genom allmänna gaslagen och molfraktionen vatten, som bestäms utifrån partialtrycket, uppskattas antal mol vatten i gasen in och ut från värmeväxlaren.

Figur 2 visar en schematisk bild av en värmepump. COP för värmepumpen beräknas enligt ekvation 2 där entalpierna för R407C avlästs ur diagram [10]. Entalpierna redovisas i tabell 1 och baseras på data från Göteborg Energi.



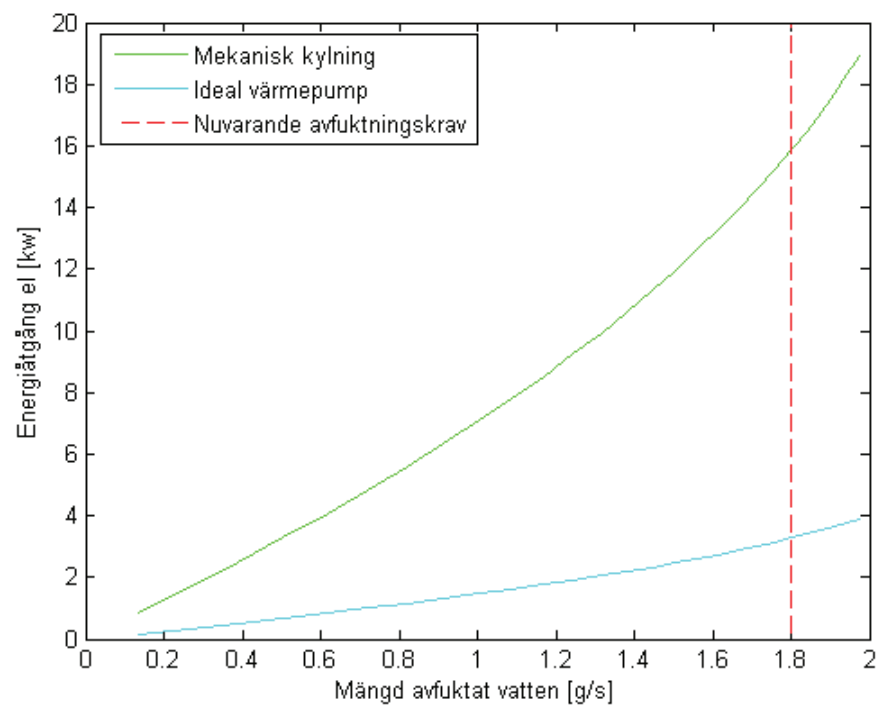
Figur 2: Schematisk bild av värmepumpen.

$$COP = \frac{Q_c}{W_{S,net}} = \frac{(H_2 - H_4)}{(H_3' - H_2)} \quad (2)$$

Tabell 1: Entalpier vid olika positioner i värmepumpen.

Steg	Entalpi [kJ/kg]
1	240
2	410
3	445
4	240

Q_c är energiskillnaden i biogasen innan och efter avfuktningen. $W_{S,net}$ är energin som idealt måste tillföras då värmepumpen används. De två variablerna visas i figur 3.

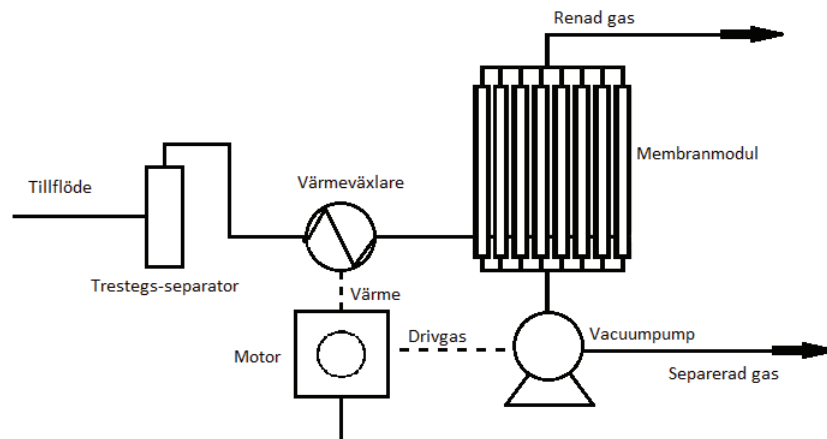


Figur 3: Elbehov för mekanisk avfuktning och avfuktning med ideal värmepump

3 Membranteknik

Vid avfuktning med membranteknik utnyttjas permeabilitetsförmågan hos olika molekyler. Membran konstrueras för att släppa igenom olika ämnen. Gasen får passera över ett trycksatt membran som enbart låter vattenmolekyler gå igenom och den övriga gasen passerar vidare. Tidigare studerade membran har visat sig ha hög effektivitet, men små fraktioner av metan och koldioxid följer med vattnet genom membranet. Avfuktning med membran har många fördelar jämfört med traditionella avfuktningstekniker som mekanisk kylning, absorption och adsorption [3].

Avfuktning med membran sker kontinuerligt, kräver inga kemikalier och således heller ingen regenerering. Likt de andra systemen uppstår dock problem i de fall gasen inte är renad från komponenter som vid reaktion med vatten bildar korrosiva substanser [3]. Figur 4 åskådliggör en schematisk bild över avfuktning av biogas med hjälp av membran.



Figur 4: Schematisk bild över avfuktning av biogas med membranteknik [3].

Först går gasen in i en trestegsseparator vilken separerar bort fasta partiklar och ämnen i vätskefas. Därefter värms gasen 5-10 °C, detta för att sänka den relativa fuktigheten och på så sätt undvika risken för kondensering på membranet. Membranet har en tryckgradient vilken konstrueras av en vakuumpump. Detta gör att vattenångan, tillsammans med små fraktioner av gasen, suges genom membranet. Molekyler som inte har permeabilitet att passera membranet tvingas då fortsätta ut på motsatt sida [3].

De många fördelarna med membrantekniken till trots är den inte applicerbar i alla sammanhang. En stor nackdel är risken för kontaminering och driftstopp då gasen innehåller föroreningar som kan fastna i membranet [11]. Rötgas innehåller flera sådana komponenter, bland annat svavelväten, och risken för driftstopp skulle vara överhängande om tekniken användes i den nuvarande anläggningen. Membranteknik kommer således inte undersökas vidare.

4 Torkmedel

Avfuktning med hjälp av torkmedel är den vanligaste metoden för avfuktning av biogas och sker genom adsorption eller absorption [13]. Absorption innebär en kemisk förändring i medlet och är vanligast hos flytande torkmedel. Hos fasta torkmedel är adsorption vanligast. Adsorption sker på ytan av medlet och innebär således ingen kemiskt förändring. I bägge fallen genereras värme som, om ingen kylning äger rum, kommer att värma upp såväl torkmedlet som gasen. Skillnad i koncentration hos torkmedlet och gasen är den drivande kraften för massöverföringen [12]. Den största energiåtgången ligger i regenereringen av torkmedlet [14].

4.1 Flytande torkmedel

Avfuktning med hjälp av flytande torkmedel fungerar så att fukt transporteras från den fuktiga gasen till torkmedelslösningen. Avfuktningen sker vanligtvis i en packad kolonn i vilken torkmedlet kommer i kontakt med den fuktiga gasen.

Den packade kolonnen ska öka kontaktytan mellan gas och vätska. Ytan maximeras genom användandet av olika packningsmaterial. Materialet kan packas strukturerat eller i slumpvis ordning. Den slumpvisa packningen erbjuder en större yta men genererar också ett högre tryckfall hos gasen. Exempel på slumpvisa packningsmaterial är Berlsadlar, Intaloxsadlar och Raschigringar. I strukturerad packning används i regel tunna, korrugerade metallplattor vilka är arrangerade så att de tvingar fluiderna till komplicerade vägar och på så sätt ökar kontaktytan mellan faserna.

För att möjliggöra återanvändning av torkmedlet måste det regenereras. Detta genomförs antingen på samma sätt som ovan i en packad kolonn där det våta torkmedlet möter en torr gas, eller genom att tillföra energi och koka bort vattnet. De två metoderna kan kombineras. I likhet med ovan är skillnaden i koncentration den drivande kraften för massöverföringen [13].

För att öka den drivande kraften används vätskelösningar med lågt ångtryck. Hög koncentration torkmedel och låg temperatur på lösningen sänker ångtrycket och bidrar till bättre avfuktning. Då salter används i avfuktningen innebär dock detta en risk för kristallisation av torkmedlet. Olika torkmedel opererar således inom olika koncentrationsintervall [12].

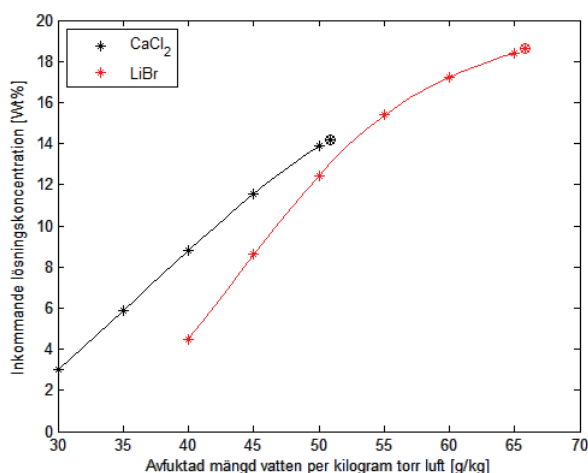
Effektiviteten hos det flytande torkmedlet kan uttryckas genom partialtrycket hos gasen enligt ekvation 3, eller genom vattenmängden i gasen enligt ekvation 4.

$$R_{Salt} = \frac{p_{a,i} - p_{a,o}}{p_{a,i} - p_{s,i}} \quad (3)$$

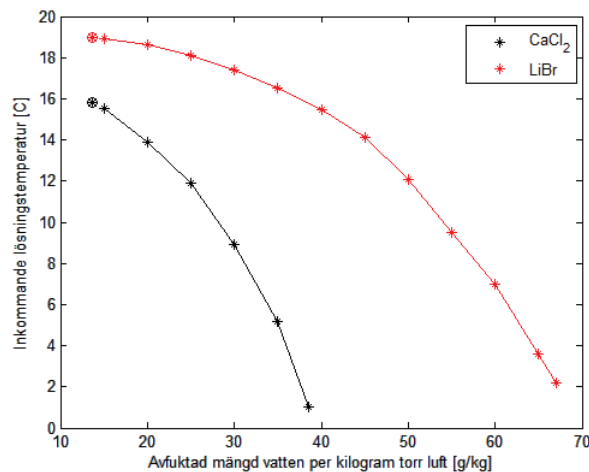
$$R = \frac{W_{in} - W_{ut}}{W_{in}} \quad (4)$$

4.1.1 Avfuktning med salt

Avfuktning med salt bygger på att katjonen attraherar negativt laddade syreatomer i vattnet. Saltet befinner sig i lösning och kommer absorbera fukt från gasen till dess koncentrationsskillnaden är utjämnad. En ökad saltkoncentration innebär en större koncentrationsgradient mellan gas och lösning vilket ökar massöverföringen. Flera olika salter kan användas som torkmedel, där egenskaper som kristallisationspunkt och absorptionsförmåga är avgörande. Två vanligt förekommande salter är CaCl_2 och LiBr . Kristallisationspunkten beror av temperatur och koncentration. I figur 5 och 6 visas saltlösningarnas respektive arbetsintervall. Figurerna nedan är framtagna baserade på avfuktning av luft i en packad kolonn med tvärsnittsarea 0.125 m^2 och höjd 3 m.



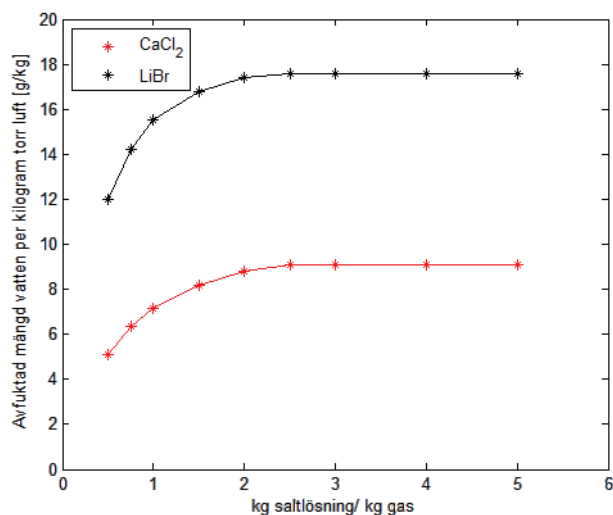
Figur 5: Mängd avfuktat vatten per kilogram torr luft mot inkommande lösningskoncentration. Försöken genomfördes vid konstant lufttemperatur och lösningstemperatur (30°C) [15]. De två yttersta punkterna i varje graf visar kristallisationspunkterna för respektive salt.



Figur 6: Mängd avfuktat vatten per kilogram torr luft mot inkommande lösningstemperatur. Försöken genomfördes vid konstanta saltkoncentrationer (Wt60% LiBr, Wt40% CaCl₂) och konstant lufttemperatur (30 °C) [15]. De två yttersta punkterna i varje graf visar kristallisationspunkterna för respektive salt.

Som synes i graferna i figur 5 och 6 har de två salterna skilda kristallisationspunkter och således olika arbetsintervall.

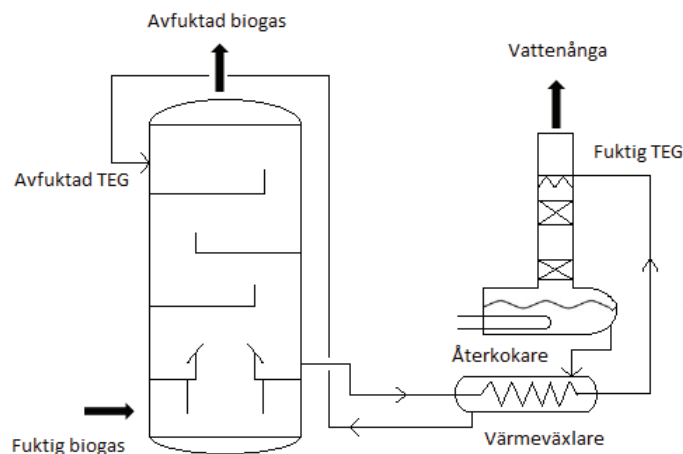
I figur 7 nedan anges de flödesförhållanden saltlösningarna kräver för att genomföra den önskade avfuktningen, 4.54 g vatten/kg torr gas.



Figur 7: Mängd avfuktat vatten per kilogram torr luft mot flödesförhållande [L/G]. Försöken genomfördes vid konstanta saltkoncentrationer (Wt 60 % LiBr, Wt 40 % CaCl₂) och konstant lufttemperatur och lösningstemperatur (30 °C) [15]

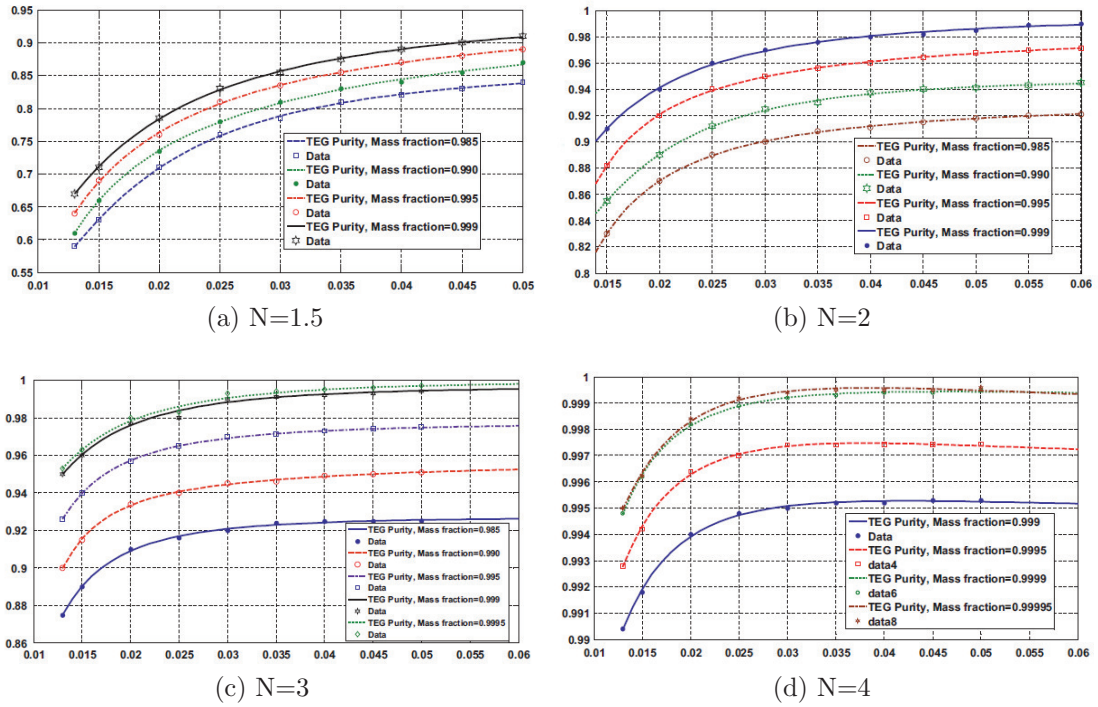
4.1.2 Trietylenglykol

Det vanligaste flytande torkmedlet vid avfuktning av naturgas är trietylenglykol (TEG) [17]. Glykolars hydroxylgrupper, och tillhörande förmåga att intermolekylärt binda till vattnet, gör dem generellt till väldigt goda fuktabsorbenter. I figur 8 åskådliggörs en modell av en avfuktningsanläggning med TEG med tillhörande regenereringssteg.



Figur 8: Avfuktningsanläggning med tillhörande regenerering [18].

Då fryspunkten för TEG är betydligt lägre än kristallisationstemperaturen för salterna elimineras de koncentrations- och temperaturbegränsningar som existerar för saltlösningar [16]. Studerar man en gas med konstant intemperatur och fukthalt, beror mängden avfuktat vatten på storleken av kolonnen samt förhållandet mellan inkommande gas och torkmedel. Den packade kolonn som används vid avfuktningen kan designas på olika sätt. Graferna presenterade nedan är tagna från en kolonn med strukturerad packning vars diameter är 0.73 m och teoretisk bottenhöjd på 1.5 m. I figur 9 varierar antalet teoretiska bottenar och ingående TEG-koncentration, och det flödesförhållande som då krävs för att möjliggöra avfuktningen kan avläsas.



Figur 9: Avfuktningseffektivitet vid olika TEG-koncentrationer mot mängd TEG per mängd avfuktat vatten [$\text{m}^3 \text{TEG} / \text{kg H}_2\text{O}$] med olika antal teoretiska bottnar [17].

I figur 9 ovan visas det flödesförhållande som, för de olika alternativen, krävs för att möta avfuktningsskraven. Den effektivitet som beräknats ur ekvation 4 avgör hur många teoretiska bottnar som krävs för avfuktningen.

4.2 Fasta torkmedel

Adsorption är en process där ett gasformigt ämne, eller ett ämne löst i en vätska, binder till ytan av ett fast material eller en vätska. Två viktiga parametrar för adsorption är tryck och temperatur. Högt tryck och låg temperatur ger en hög adsorption, lågt tryck och hög temperatur minskar adsorptionen.

Fasta torkmedel som används i industrin kan regenereras och således användas i många cykler. Torkmedlen förväntas ha hög mekanisk hållfasthet och ej vara korrosiva eller toxiska. En stor ytareal hos medlen ökar massöverföringen per kilogram. Viktiga variabler för medlen listas i tabell 3 i avsnitt 4.3.2. Torkmedlen listade nedan är de mest vanligt förekommande [7].

4.2.1 Silikagel

Silikagel är en form av kiseldioxid och finns tillgängligt som granulat, pulver och sfäriska pärlor. Framställningen görs genom att reagera natriumsilikat med svavelsyra. Materialets generella kemiska formel är $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Som torkmedel har det en ungefärlig porstorlek

på 4 nanometer i diameter och en hög affinitet för vattenmolekyler, detta på grund av den stora ytarean i förhållande till vikten [19].

4.2.2 Aktiverad aluminiumoxid

Under 1900-talet utvecklades många olika typer av aktiverad aluminiumoxid. Den i dag använda är F-200, ett sfäriskt material. Produkten framställs från aluminiumhydroxid där vatten avspjälkas och aluminiumoxid, också känt som alumina, bildas. Den kemiska formeln är Al_2O_3 . Medlet har, i förhållande till sin vikt, en stor yta och god förmåga att ta upp vatten i hålrum i porerna [19]. Alumina adsorberar dessutom kolväten, detta innebär att kapaciteten för att adsorbera vatten minskar och risken finns att önskvärda komponenter i biogasen adsorberas [19].

4.2.3 Molekylsikt

Molekylsikt adsorberar med avseende på molekylstorlek. Medlet finns tillgängligt som cylinderformade pellets, sfäriska pärlor och pulver. Adsorptionskapaciteten är hög vid låga koncentrationen av vatten och affiniteten är hög för polära och omättade föreningar [19].

Molekylära siktar tillhör gruppen zeoliter, det vill säga hydratiserade alkalimetaller som aktiveras genom värme för att ta bort vattenmolekyler i strukturen och bilda kristaller [19]. De fyra mest använda molekylsikterna är 3A, 4A, 5A och 6A, namngivna efter deras diameterlängd i ångström, där 4A lämpar sig bäst för att torka gaser [19]. På samma sätt som aktiverad alumina riskerar molekylsikten att adsorbera fler komponenter än vatten, exempelvis kolväten [19].

4.2.4 Jämförelse av torkmedel

Vilket ämne som ska adsorberas styr till stor del valet av torkmedel. Olika torkmedel adsorberar olika ämnen med varierande effektivitet. Inköpskostnader vad gäller såväl medel som utrustning och kostnad i drift tas givetvis också i beaktning.

Aluminiumoxid är billigast men investeringskostnaden är stor. Alumina adsorberar dessutom kolväten och inte bara vatten, detta innebär att kapaciteten att adsorbera vatten minskar och risken finns att önskvärda komponenter i biogasen adsorberas.

Den stora driftskostnaden, och energibehovet, ligger i regenereringen av torkmedlet. Molekylsikt regenereras vid den högsta temperaturen. De är dock väldigt resistent mot föroreningar och ger den lägsta daggpunkten av de tre jämförda.

Bakgrunden till skillnaden i adsorptionskapacitet är att molekylsikt har polär poryta-rea vilket leder till förbättrad adsorption av vatten. Av samma anledning har molekylsikt även högst desorptionsvärme och regenereringstemperatur [6].

Silikagel kan regenereras vid relativt låga temperaturer och har dessutom väldigt hög kapacitet för adsorption av vatten. Flytande vatten riskerar splittra gelen som då förlorar

sin funktion. För att undvika detta placeras ett lager vattenresistent torkmedel på toppen av den packade bädden.

4.2.5 Anläggningar

Den vanligaste anläggningen är en så kallad packad bädd. Vanligtvis används två bäddar, där den ena används för adsorption av fukt från gasen och den andra för regenerering av torkmedlet. Då bädden som adsorberar börjar närma sig mättad och den utgående gasen börjar närma sig specifikationsgränsen byter man gasflödet och regenereringen påbörjas. Adsorptionsflödet går vanligtvis från topp till botten för att undvika medryckning av torkmedel och kanalbildning. En torkcykel ligger vanligtvis på mellan 4 och 24 timmar [7].

Regenereringen genomförs med en uppvärmd gas som värms med hjälp av en värmeväxlare eller en eldad värmare. Den varma gasen passerar genom bädden motströms gentemot adsorptionsflödet för att säkerställa en fullständig regenerering av bottendelen av bädden, det vill säga den del av bädden som sist är i kontakt med gasen som ska avfuktas. Det är viktigt att regenereringen sker fullständigt. Regenereringen av bädden är effektivare vid högre temperatur och högt gasflöde. Temperaturen hos regenereringsgasen begränsas av uppvärmningskostnad, termisk hållfasthet hos konstruktionsmaterialet i anläggningen samt den termiska stabiliteten hos torkmedlet [7]. Skulle inte regenereringen vara fullständig måste antingen tiden för adsorptionscykeln minskas eller flödet av regenereringsgas ökas.

Alternativt kan ett roterande hjul användas, detta är vanligt då luft avfuktas till fastigheter. I själva hjulet finns kanaler bestående av torkmedel där luft passerar. Då hjulet roterar kommer inkommande fuktig luft passera genom olika delar av hjulet allteftersom hjulet roterar. På den motsatta sida av hjulet regenereras torkmedlet med en varm luftström. Principen med en adsorptionsdel och en regenereringsdel är således densamma som för den packade bädden [21]. Då gasflöde och fukthalt är större än vid vanlig luftkonditionering skulle detta resultera i ett väldigt stort roterande hjul, vilket vare sig är billigt eller lämpligt i dagens anläggning. Roterande hjul kommer således inte behandlas vidare i rapporten.

4.3 Regenerering

När torkmedlet blivit mättat med vatten från biogasen behöver det regenereras för att återfå sin funktion och kapacitet. Generellt används, för såväl flytande som fasta torkmedel, pumpar, fläktar och värmeväxlare för att göra regenereringen så effektiv som möjligt. Pumpeffekt och storlek på värmeväxlare beräknas enligt ekvation 5 och 6 nedan.

$$q_{pump} = \dot{m}gH \quad (5)$$

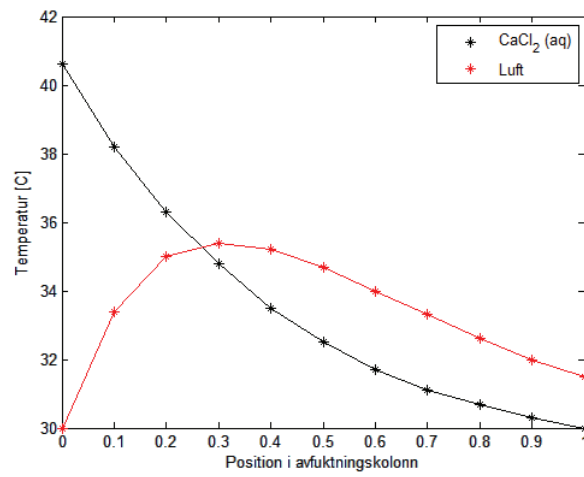
$$A = \frac{q}{U\Delta T_{lm}} \quad (6)$$

4.3.1 Regenerering av flytande torkmedel

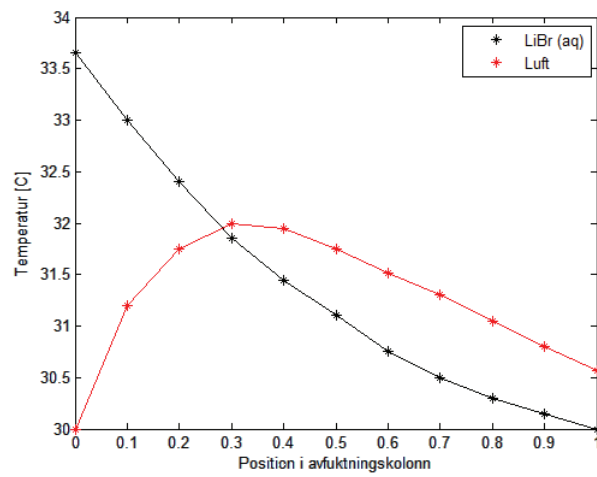
Flytande torkmedel regenereras antingen genom att lösningen kokas och vattnet förångas, eller genom att lösningen möter en torr gas i vilken vattnet löses. Det första fallet möjliggörs vid olika temperaturer för olika torkmedel, dessa redovisas i tabell 2. Energiförbehovet för regenereringen beräknas ur ekvation 7.

$$q_{reg} = \dot{m}C_P\Delta T + M\Delta H_{vap} \quad (7)$$

Tydligt är att energiförbehovet beror av ingående temperatur till koksteget. För att beräkna denna krävs kunskap om lösningens temperatur ut ur avfuktningsskolumnen. Denna beror i sin tur av kondensationsvärme avgivet från vattnet och är svår att beräkna. Figur 10 visar temperaturförändringen, och därigenom uttemperaturen, hos såväl gas som torkmedel genom en en meter lång skolumn. Saltlösningarnas koncentration är 60 % och 40 % för LiBr respektive CaCl₂. För beräkningar antas dessa temperaturer vara gångbara även i en större skolumn och med mer avfuktning.



(a)



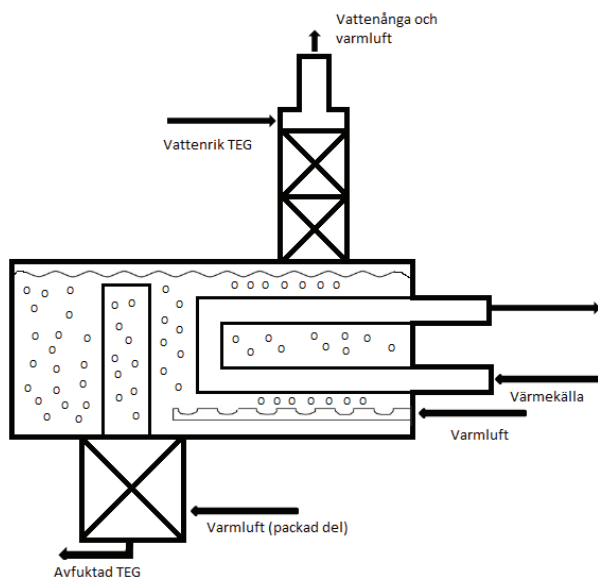
(b)

Figur 10: Temperatur hos gas och lösning [°C] mot position i avfuktningskolonnen [m] [15].

Den till koksteget ingående torkmedelströmmen kan, som nämntes i avsnitt 4.3, värmes med varmare strömmar för att minska energibehovet vid kokningen. Lämpligast värmes den mot den regenererade torkmedelströmmen som kommer ut från kokningen. Arean för värmeväxlaren beräknas ur ekvation 6. Värmeledningen genom röret har försummats. Den genom värmeväxlingen uppvärmda lösningsströmmen går sedan in i en kokare där den värms upp de sista graderna och regenereringen slutförs.

Regenereringsmetoden fungerar för samtliga flytande torkmedel. Figur 7 ger dock, för salterna, ingen data för beräkning av det aktuella fallet, där dagens avfuktning innebär 4.54 g vatten/kg torr luft. Salternas koncentrationsbegränsningar och de höga L/G-förhållandena medför, innebär dock att energibehovet för avfuktning med salt kan antas vara betydligt större än det för TEG.

Ett regenereringsalternativ, för TEG, till enbart kokning är att kombinera det med att även låta gasen möta en varm luftström i en packad kolonn. Processen liknar den som används vid avfuktning, men massöverföringen är omvänd. Den stora exponeringsytan, skapad av packningen i kolonnen, möjliggör regenerering vid en lägre temperatur. Koncentrationen på den regenererade torkmedelströmmen är, utöver höjden på kolonnen, en funktion av temperatur och förhållandet luft/TEG [m^3/m^3]. Mängden luft som behövs för att uppnå en viss torrhalt fås ur appendix B, vid regenereringen används två ideala bottnar för att minimera behovet av regenereringsluft. Regenereringen visas i figur 11.



Figur 11: Schematisk bild över regenerering av TEG med luft och tillhörande kokning.

I tabell 2 redovisas nödvändiga variabler för energiberäkningarna.

Tabell 2: Egenskaper hos vanliga flytande torkmedel [16][18][22][23][24][25][26][27]

Egenskaper	TEG	LiBr	CaCl ₂
T _{kolonn} [°C]	41	40.5	33.6
T _{regenerering} [°C]	208	93	115
Lösningens specifika värmekapacitet [kJ/(kgK)]	2.558	2.026	2.778
Värmeöverföringskoefficient, vätska/vätska [W/(m ² K)]	1050	1050	1050
Densitet [kg/m ³]	1125	3460	2150

Lösningarnas specifika värmekapaciteter har uppskattats genom ekvation 8.

$$C_{p,lösning} = \sum_{i=1}^n X C_{Pi} \quad (8)$$

4.3.2 Regenerering av fasta torkmedel

För fasta torkmedel sker regenereringen lättast genom att man låter uppvärmd luft flöda genom en packad bädd med det mättade torkmedlet. Temperatur och viktiga parametrar som behövs för energiberäkningarna för regenereringen av de olika torkmedlen finns i tabell 3.

Tabell 3: Egenskaper hos vanliga fasta torkmedel [7][8][19][20][28].

Egenskaper	Silikagel	Alumina	Molekylsikt, 4A - 5A
Ytarea [m ² /g]	750-830	210	650-800
Porvolym [cm ³ /g]	0.4-0.45	0.21	0.27
Pordiameter [Å]	21-23	26	4.2
Bulkdensitet [kg/m ³]	721	801-881	699-721
T _{regenerering} [°C]	180	220	260
Specifik värmekapacitet [kJ/(kgK)]	1.047	1.004	1.046
Densitet [kg/m ³]	721	840	721
Desorptionsenergi [kJ/kg]	3256	3489	4186
Adsorptionskapacitet [kg vatten/kg torkmedel]	0.07	0.07	0.14
Värmeöverföringskoefficient, gas/gas [W/(m ² K)]	200	200	200

Totala energibehovet för regenereringen beräknas med ekvation 9.

$$q = [(m_V C_{P,stål} \Delta T_{bädd,gas}) + (m_D C_{P,silikagel} \Delta T_b) + (MY)] \quad (9)$$

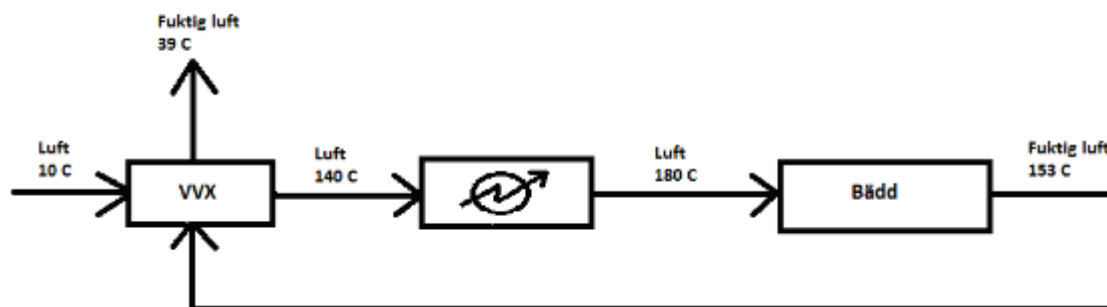
Volymen av luft som behövs för regenereringen beräknas med ekvation 10.

$$G_V = \frac{q}{(h_2 - h_1) \rho_G} \quad (10)$$

Luften som används för att värma torkmedlet måste först värmas till önskad temperatur och energin som krävs för detta beräknas med ekvation 11.

$$Q = G\Delta T_{luft}C_{P,luft}\rho_{luft} \quad (11)$$

Energibehovet kan minskas genom att ingående torkluft först värmeväxlas med den fuktiga luften ut från regenereringssteget. Regenereringen, med motströmsvärmeväxling, visas i figur 12.



Figur 12: Schematisk bild över regenerering av en bädd av silikagel med luft.

5 Dimensionering av utrustning

Behovet av utrustning beror av val av avfuktningsmetod. Utrustningen nödvändig för att möta avfuktningskravet måste dimensioneras. I detta avsnittet presenteras ekvationer nödvändiga för att uppskatta storleken på den använda utrustningen.

5.1 Dimensionering av kolonn för flytande torkmedel

Kolonnen dimensioneras utifrån avfuktningskravet. Ur figur 16 i appendix A finns tabeller med variabler för att, vid givet avfuktningskrav, uppskatta antal teoretiska bottnar och det flödesförhållande som krävs [17]. Detta enligt ekvationerna 12 och 13.

$$\psi = \frac{TEG}{W_{in}} \frac{[m^3]}{[kg/m^3]} \quad (12)$$

$$\ln(R) = a + \frac{b}{\psi} + \frac{c}{\psi^2} + \frac{d}{\psi^3} \quad (13)$$

Där a, b, c och d fås ur ekvationerna 14, 15, 16 och 17.

$$a = A_1 + \frac{B_1}{X} + \frac{C_1}{X^2} + \frac{D_1}{X^3} \quad (14)$$

$$b = A_2 + \frac{B_2}{X} + \frac{C_2}{X^2} + \frac{D_2}{X^3} \quad (15)$$

$$c = A_3 + \frac{B_3}{X} + \frac{C_3}{X^2} + \frac{D_3}{X^3} \quad (16)$$

$$d = A_4 + \frac{B_4}{X} + \frac{C_4}{X^2} + \frac{D_4}{X^3} \quad (17)$$

Därefter beräknas masshastigheten, G_v , som används i beräkningar av kolonndiameter för såväl packningsmaterial som klockbottnar, enligt ekvationerna 18, 19 och 20 nedan. Ur tabell 4 hämtas nödvändiga variabler för beräkningarna.

$$G_v = C_b \sqrt{\rho_V(\rho_D - \rho_V)} \quad (18)$$

$$D_b = \sqrt{\frac{4m_{TEG}}{G\pi}} \quad (19)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{C_b}{C_{pb}}} * D_b \quad (20)$$

Tabell 4: Koefficienter för att dimensionera en avfuktningskolonn [30].

(a) Klockbotten		(b) Packad botten	
Bottenavstånd [m]	C_b [m/h]	Packning	C_{pb} [m/h]
0.51	154.8	Strukturerad	329.2–438.9
0.61	175.6	Slumpmässig	142.6–285.3
0.76	186.5		

5.2 Dimensionering av packad bädd för fasta torkmedel

Vid dimensioneringen av bädden är det rimligt att anta att allt vatten i den ingående gasen adsorberas i torkmedlet. Vattenmängden adsorberad per cykel ges av ekvation 21. En torkcykel på 10 timmar har antagits [31].

$$M = \frac{VcW_{in}}{24} \quad (21)$$

Kapaciteten för ett torkmedel är vanligtvis uttryckt i massa adsorberat vatten per massa torkmedel. Det finns tre kapacitetstermer som vanligen används, statisk, dynamisk och användbar kapacitet. Användbar kapacitet är en funktion av inflödestemperatur, vatteninnehåll i inflödet, temperatur och vatteninnehåll i regenerationsflödet, önskad daggpunkt, tryck, åldring av torkmedel, samt inkrusterhistorik och bäddlängd [31]. Vid normal drift är 7-9 kg vatten adsorberat per 100 kg torkmedel vanligen en representativ användbar kapacitet för silikagel [31]. Volymen för silikagelen beräknas enligt ekvation 22.

$$V_D = \frac{M}{u\rho_D} \quad (22)$$

Därefter beräknas bäddens diameter ur ekvation 23[31].

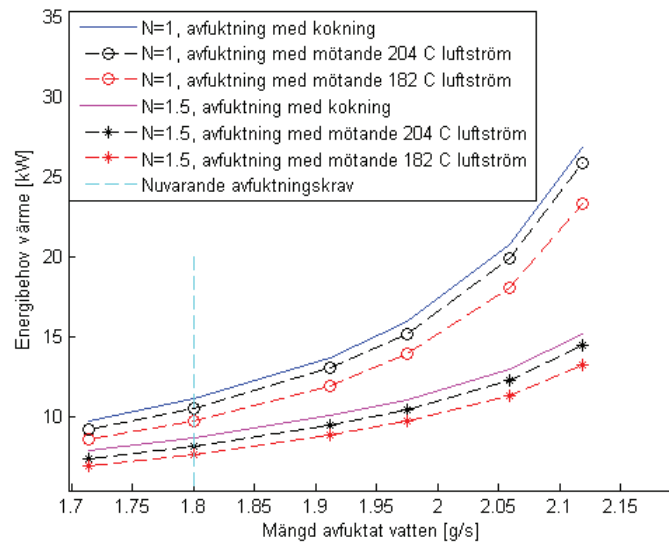
$$D_B = \sqrt{\frac{327V_Z T_{G,K}}{P_v}} \quad (23)$$

När kärlet utsätts för ett inre tryck uppstår tre vinkelräta spänningar, ringspänning, longitudinell- och radiell spänning [31]. Kärlet kan beskrivas som en tunn cylinder där den radiella spänningen kan bortses ifrån då den i sammanhanget är mycket liten. Antas slutna ändar på cylindern uppstår ringspänningen för att motverka bristningseffekten av det pålagda trycket. Då ringspänningen kan uttryckas i termer av radien kan kärlväggens tjocklek uttryckas enligt ekvation 24 [29].

$$W_v = \frac{0.5PD_B}{SE - 0.6P} \quad (24)$$

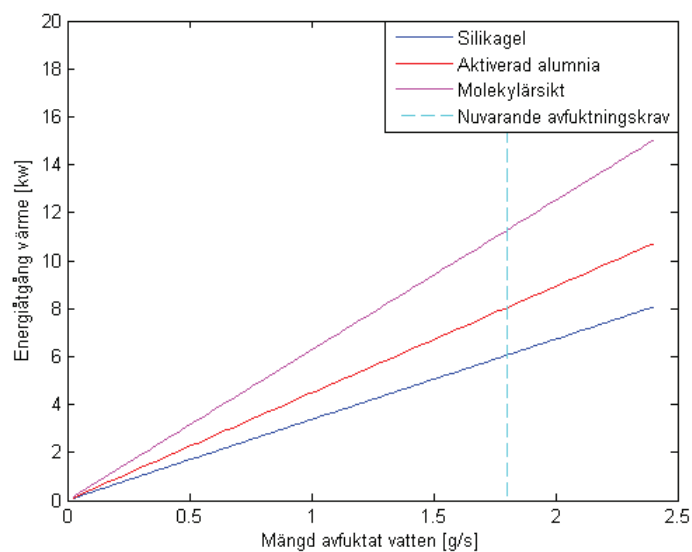
6 Resultat av energiberäkningar

Nedan redovisas det beräknade energibehovet för avfuktning av gasen. Figur 13 jämför energibehovet för olika avfuktningsmetoder för TEG. Glykolen regenereras i samtliga fall till en torrhalt på 99 %. Samma koncentration används också vid avfuktningen. Vid avfuktningen varierar antal ideala bottnar, i regenereringen är den dock vald till två.



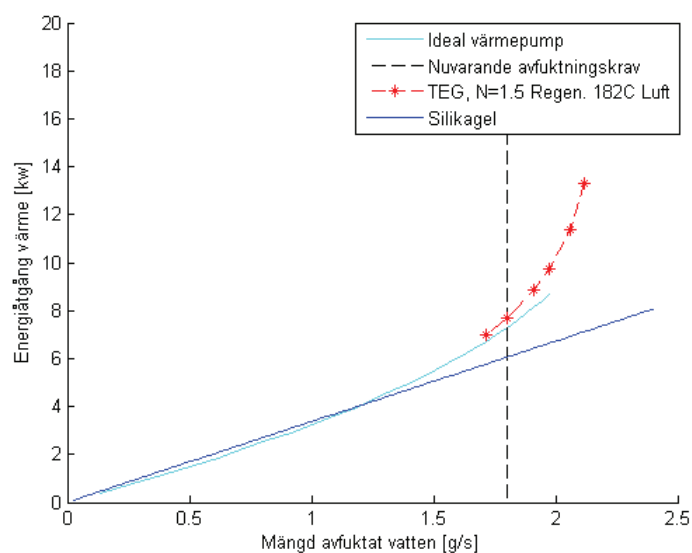
Figur 13: Värmebehov vid avfuktning med TEG för olika avfuktningsmängder och regenereringsalternativ.

Figur 14 jämför energibehovet för silikagel, aktiverad alumina och molekylsikt.



Figur 14: Värmebehov vid avfuktning med silikagel, aktiverad alumina och molekylsikt.

Elbehovet för värmepumpen i dagens anläggning räknas om, för att underlätta jämförelsen, till ett värmebehov. Detta med en elverkningsgrad på 0.45. Jämförelsen mellan det, ur energisynpunkt, bästa alternativet för respektive avfuktningsskruv och den ideala värmepumpen åskådliggörs i figur 15.



Figur 15: Jämförelse av värmebehov mellan mekanisk kylning och avfuktning med torkmedel.

7 Investeringskostnader

Att genomföra byte från mekanisk avfuktning till avfuktning med torkmedel kräver investeringar. En preliminär uppskattning av kostnaden för den nödvändiga utrustningen för avfuktningen ges nedan. Generellt kostnadsuppskattas all utrustning för avfuktningen enligt ekvation 25 [32].

$$C_e = a + bS_{enhet}^n \frac{I_{11}}{I_{07}} \quad (25)$$

I appendix C finns värden på parametrarna a , b , n och S_{enhet} . Variablerna är specifika för respektive utrustningsenhet. Konsumentprisindex för år 2007 och 2011 var 207.3 respektive 224.9 [33].

De kolonner som används i avfuktningen konstrueras i kolstål. Väggtjockleken på kolonnen beräknas ur ekvation 24. För att säkerställa att kolonnerna är stadiga nog för sin egen vikt rekommenderas dock en minimal väggtjocklek på 1.5 mm [32]. Vidare adderas ytterligare 4 mm för att tillåta en viss korrosion som, med anledning av komponenter i gasen, riskerar förekomma. Den totala väggtjockleken för kolonnerna blir således 5.5 mm.

För att ta hänsyn till tillhörande kringutrustning och installationskostnader så multipliceras kostnaden för de största enheterna för respektive avfuktningsprocess med en Langfaktor. Langfaktorn är vald till 4.74 [32].

7.1 För avfuktning med TEG

Avfuktningen, genomförd enligt figur 8, kräver två packade kolonner i vilka massöverföringen sker. Kolonnerna, konstruerade i kolstål, kostnadsberäknas enligt ekvation 25 med storleksenheten kolonnvikt, beräknad enligt ekvation 26.

$$S_{vikt} = D_k \pi H_k \delta \rho_{kolstål} \quad (26)$$

Såväl höjden som diametern, beräknad ur ekvation 19 och 20 från avsnitt 5.1, i kolonnen beror på val av kolonn. Teoretisk bottenhöjd för slumpvis och strukturerad packning sätts till 1.5 m och således blir höjden på kolonnen i dessa fall 2.25 m [17]. 1.5 ideala steg uppskattas till 4 klockbottnar, vilka håller ett bottenavstånd på 0.6 m [17]. Den slutliga kolonnhöjden för kolonnen med klockbottnar blir således 2.4 m.

Priset för packningsmaterial, centrifugpumpar och tubvärmväxlare beräknas även det med hjälp av ekvation 25 och appendix C. Den totala kostnaden för varje utrustningsenhet, med tillhörande storleksenhet, redovisas i tabell 5 nedan. Inköpskostnad och förbrukning av TEG försummas.

Tabell 5: Uppskattning av investeringskostnader för avfuktningstrustningen.

Utrustning	Storleksenhet	kostnad [\$]
Kolonn för 304 ss Raschigringar	92 kg	12316
Kolonn för 304 ss strukturerad	60 kg	11877
Kolonn för klockbottnar	88 kg	12267
Packningsmaterial, Raschigringar	0.16 m ³	1265
Packningsmaterial, strukturerad	0.07 m ³	518
Klockbottnar	0.27 m	1344
Värmeväxlare	0.22 m ²	1511
Pump för fuktig TEG	0.0095 dm ³ /s	7489
Pump för torr TEG	0.0078 dm ³ /s	7489

7.2 För avfuktning med silikagel

Kostnaden för de två kolonner som behövs för avfuktningen beräknas enligt ekvation 25 där kolonnens massa, dvs S , beräknas ur ekvation 27.

$$S = D_B(L_B + h + 0.5D_B)\delta\rho_{kolstål}\pi \quad (27)$$

Där h , den extra kolonnhöjden, antas till 0.6 m [31]. Den totala kostnaden för varje utrustningsenhet, med tillhörande storleksenhet, redovisas i tabell 6 nedan. Till den totala kostnaden för utrustningen adderas för silikagel en inköpskostnad av gelen på 6565 \$ [34]. Badden väger 926 kg och i liknande anläggningar på Göteborg Energi byts badden ut var tredje år.

Tabell 6: Uppskattning av investeringskostnader för avfuktningstrustningen.

Utrustning	Storleksenhet	kostnad [\$]
Kolonn	480 kg	16370
Värmeväxlare	1.28 m ²	1702

8 Utvärdering

I avsnittet sammanställs och jämförs resultaten för dagens avfuktningsmetod, avfuktning med silikagel och avfuktning med TEG. Utvärderingen, med avseende på en avfuktningskapacitet på 1.8 g/s, sker på basis av energibehov, miljö- och hälsopåverkan samt investeringskostnad. Det presenterade resultatet diskuteras vidare i avsnitt 9.

8.1 Energiförbrukning och investeringskostnad

Figur 15 visar energiförbrukningen för respektive avfuktningsmetod. Samtliga behov har beräknats baserat på ett antagande av noll värmeförluster. Grafen tar ej heller hänsyn till den möjliga värmeväxlingen vid regenereringen av torkmedlen, förklarad i avsnitt 4.3. I tabell 7 presenteras energiförbrukningen då värmeväxlare används. Vidare summeras den totala investeringskostnaden, inklusive Langfaktor, för respektive avfuktningsmetod. Den totala mängden biogas som behöver förbrännas för att möta energiförbrukningen presenteras också. För TEG redovisas den billigaste utrustningen, kolonner med strukturerad packning.

Tabell 7: Energiförbrukning och investeringskostnad för att möta avfuktningskravet på 1.8 g/s [35].

Avfuktningsmetod	Energiförbrukning [kW]	Nm ³ /s biogas	Investeringskostnad [\$]
Värmepump	7.3	$1.97 \cdot 10^{-4}$	-
TEG	4.9	$1.39 \cdot 10^{-4}$	41279
Silikagel	1.2	$3.2 \cdot 10^{-5}$	41007

8.2 Miljö- och hälsopåverkan

Energien presenterad ovan är värmeenergi. Den antas i samtliga fall komma från förbränning av biogas. Miljöpåverkan från förbränningen är således proportionell mot energiförbrukningen.

8.2.1 TEG

TEG är, för människan, ett relativt ofarligt ämne. Vid kontakt med huden kan irritation uppstå men detta åtgärdas enkelt genom att skölja med vatten. Vid förtäring eller inandning bör läkare uppsökas för kontroll. Det låga ångtrycket innebär dock att inandningen är relativt ovanlig [36]. Det faktum att TEG är lösligt i vatten innebär också att det inte ackumuleras i kroppen.

Glykolen bryts dock ned långsamt och detta i kombination med det låga ångtrycket gör att utsläpp till vattendrag bör undvikas då det vid höga koncentrationer är toxiskt för vattenlevande organismer [37] [38]. Kontakt med oxidationsmedel bör även det undvikas då kraftiga reaktioner kan förekomma.

8.2.2 Silikagel

Energibehovet för avfuktningsscykeln ligger på 6.1 kW. Med en värmeväxling av utgående regenereringsgas med ingående kan 4.9 kW energiåtervinnas. Nettoeffekten för anläggningen är då 1.2 kW. Med effekt på anläggningen avses den energi som krävs för uppvärmning av regenereringsluft, fläktarbeten försummas.

Sannolikheten för ett utsläpp av silikagel från bädden ses som liten. Effekten från exponering är dessutom begränsad, den påverkan som dock kan förekomma redovisas i tabell 8. Sammanlagt innebär silikagel, som ej heller är brännbart, inte någon större risk för personal som hanterar anläggningen [39]. Då regenereringsgas värms till 180 °C föreligger risk för brännskador vid oaktsamhet och läckage av gas.

Tabell 8: Påverkan på hälsan till följd av utsläpp och hantering av silikagel [39].

Ögon	Damm kan ge en mekanisk irritation
Hud	Damm kan ge en mekanisk irritation
Förtäring	Kan orsaka irritation i mag-tarmkanalen
Inandning	Damm är irriterande för luftvägar
Kroniska effekter	Långvarig exponering av damm kan ge nedsatt lungfunktion

9 Diskussion

Syftet med projektet var att utvärdera avfuktningsoptioner med avseende på energibehov, investeringskostnad och miljöpåverkan. I avsnitt 6 och 7 presenteras resultatet från arbetet. Viktigt att poängtera är att inga laborativa försök har utförts, all data är således framräknad eller tagen från angivna källor.

Resultatet från energiberäkningarna redovisas i avsnitt 6. I graferna visas energibehovet för att möta dagens avfuktningsskrav, men även möjligheten att vidare avfukta gasen och den ytterligare energi det kräver. För att tolka graferna riktigt bör ett antagande förtydligas. Generellt beräknas alla metoder utan förluster, jämförelsen har alltså gjorts på en ideal basis. Data hämtad ur tidigare utförda experiment är dock inte förlustfri. Energibehovet som redovisas är med andra ord lägre än det faktiska, men är så för samtliga metoder jämförda. För att erhålla en mer riktig bild av verkligheten måste förlustfaktorer och verkningsgrader adderas till de använda ekvationerna.

Figur 14 visar energibehovet för avfuktningen för olika fasta torkmedel. Energibehovet varierar utifrån olika regenereringstemperaturer, desorptionsvärme och adsorptionskapaciteter. Tydligt framgår att silikagel är den mest energieffektiva metoden. Silikagelen är dessutom väldigt selektiv för vatten och adsorberar, till skillnad från aktiverad alumina och molekylsikt, inga övriga komponenter från gasen. Då aktiverad alumina har en mycket lägre densitet än vad silikagel har, kommer det krävas en större bädd för att möta samma avfuktningsskrav vilket innebär större investeringskostnader. Molekylsikt har en betydligt högre regenereringstemperatur än de övriga två torkmedlen. Energibehovet antas i samtliga fall ligga i uppvärmningen av regenereringsgasen, fläktarbetet försummas.

Storlek av utrustning för en packad bädd med torkmedel och därmed investeringskostnader beror även av torkcykeln. En längre torkcykel ger en större utrustning och därmed en större investeringskostnad, på samma sätt kan investeringskostnaden sänkas genom att välja en kortare torkcykel. Torkcykeln är beroende av torkmedlets egenskaper, tryckfall över bädden och egenskaper hos regenereringsgasen. Torkcykeln har i exemplet inte optimerats utan valts till 10 timmar, vilket är vanligt förekommande.

Energibehovet för olika regenereringsmöjligheter för TEG visas i figur 13. Avfuktningen med TEG kan genomföras, som visas i avsnitt 4.1.2, med olika antal ideala bottnar. Framför allt bestäms antalet av vätskeinnehållet i gasen och storleken på gasflödet. Regenereringen genomförs antingen med enbart kokning, eller en kombination av kokning och massöverföring till luft. Naturligt är också det faktum att ett större antal ideala bottnar i avfuktningen innebär en lägre kostnad, då mindre TEG används vid avfuktningen. Används fler ideala bottnar än en och en halv hamnar dock flödesförhållandet mellan inkommande mängd vatten och TEG utanför giltighetsintervallet för den modell som används, vilket syns i figur 9. Teoretiskt kan beräkningar genomföras för två ideala bottnar, men då med en koncentration av TEG på 98.5 %. För att få en rättvis bedömning, med samma TEG-koncentration i de olika fallen, så redovisas inte beräkningar med två eller fler ideala bottnar.

Som framgår i figur 13 är regenerering med luft mer effektiv. Anledningen är det relativa energibehovet vid uppvärmning av luft jämfört TEG, där det senare är betydligt större. Glykolens höga värmekapacitet gör den dyrare att värma. Det är således billigare att bara värma torkmedlet till 182 °C, luftströmmen som medföljer till trots, än att behöva värma enbart TEG hela vägen upp till 208 °C.

I jämförelsen mellan de två mest energieffektiva torkmedlen och den värmepump som används i dag, figur 15, visas behovet för att möta dagens avfuktningsskrav och även energin nödvändig för att vidare avfukta gasen. Som nämndes i avsnitt 4.3 kan energibehovet för torkmedlen minskas avsevärt med värmeväxling. I det presenterade resultatet har glykolen värmeväxlats i det närmsta maximalt, silikagelen kan teoretiskt värmeväxlas ytterligare för att vidare minska energibehovet. Större värmeväxlare innebär dock en större investeringskostnad.

Vid dimensionering av den nödvändiga utrustningen för avfuktningen används 1.8 g vatten/s som utgångspunkt, detta för att underlätta jämförelsen. Rapporten redovisar således resultatet från ett exempel, möjligheten att avfukta mer vatten existerar och likaså möjligheten att för detta nya avfuktningsskrav dimensionera utrustningen.

Tydligt är att såväl dagens avfuktningsskrav som hårdare sådana kan mötas på ett energieffektivare vis. Den insparade energin ställs mot ökade investeringskostnader. I avsnitt 7 redovisas kostnader för de energieffektivaste metoderna för fasta och flytande torkmedel, silikagel och TEG.

Det förhållandevis låga energibehovet som nämns är möjligtvis inte heller den största fördelen. Möjligheten att vidare avfukta gasen, och därmed undvika problem med kondensering i gasledningen mellan anläggningarna torde vara den största vinsten i sammanhanget. Investeringskostnaderna redovisade ska dessutom ses som väldigt approximativa, mer exakta siffror kräver kontakt med försäljare.

Fysisk adsorption, som används i fallet med silikagel, är det mest effektiva för dagens anläggning. Det relativt låga gasflödet och det relativt höga kravet på torrhalt är den stora anledningen. Kemisk absorption, för fallet med TEG, blir intressant först vid högre gasflöde och mindre krav på torrhalt. Tendenser som pekar mot detta kan ses redan i figur 15, vid fler använda teoretiska bottnar blir effekten tydligare. I en större anläggning kan det således vara intressant att kombinera de två, där avfuktningen inleds kemiskt och avslutas fysiskt. Likheten i energibehov i graferna mellan värmepumpen och den kemiska absorptionen antyder att detsamma skulle kunna vara fallet för en kombination av mekanisk kylning och fysisk adsorption, i de fall en värmepump redan är i bruk och investeringskostnaden önskas hållas nere.

Vid analysen av miljöpåverkan, avsnitt 8.2, antas ingen, eller i alla fall lika mycket för respektive avfuktningsskott, biogas lämna anläggningen annat än genom gasledningen. Utsläpp från sådana läckor ignoreras således. Biogasen, som används till förbränning för att framställa energin nödvändig för avfuktningen, är dessutom grön och inget nettotillskott av växthusgaser antas således till atmosfären vid förbränningen. På samma sätt

bedöms hälsopåverkan från respektive torkmedel vara försumbar och några övriga miljömässiga för- eller nackdelar har inte funnits för någon av avfuktningsmetoderna.

Silikagelen erbjuder den största energibesparingen och investeringskostnaderna är jämförbara med de för TEG. Avfuktningsmetoden, med silikagel, är redan implementerad i en annan anläggning hos Göteborg Energi och tekniken är utvecklad och tillgänglig. Ska dagens anläggning utvecklas till att bli energisnålare, eller för att vidare avfukta gasen, är metoden lämplig. Om driftsäkerheten kan säkerställas genom att byta till en torkmedelsbaserad anläggning och därmed eliminera dagens problem med kondensation och resulterande driftstörningar kommer detta även leda till lägre kostnader och en stabilare biogasproduktion. Rapporten visar på möjligheterna att effektivisera Göteborg Energis anläggning i Göteborg. Metoden är dock generell och kan appliceras på andra anläggningar med olika krav på flöden och torrhalt.

10 Slutsats

Energiberäkningarna visar att dagens anläggning kan energieffektiviseras. Genom att ersätta dagens värmepump med en avfuktningsanläggning som bygger på silikagel kan 6.1 kW sparas vid dagens avfuktningsnivå. Möjligheten till vidare avfuktning för att undvika problem med kondensering i gasledningen har också presenterats.

Nödvändig utrustning för genomförandet av avfuktningen med silikagel måste givetvis köpas in. För att möta dagens avfuktningskrav med den nya metoden tillkommer således en investeringskostnad beräknad till 41000 \$. Med rådande energipris och dollarvärde betalar investeringen igen sig efter omkring sju år.

I en större anläggning, med högre gasflöde, finns det anledning att överväga en kombinerad avfuktning med TEG och silikagel då det skulle vara energieffektivast.

Referenser

- [1] Speight JG. Natural Gas – A Basic Handbook. Gulf Publishing Company. 2007. 61-64.
Tillgänglig: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?EXTKNOVELDISPLAYbookid=2162VerticalID=0>
- [2] Li Y, Park SY, Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. 2011 Jan. 15 (1); 821-826. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002224>
- [3] Liu L, Chen Y, Kang Y, Deng M. An industrial scale dehydration process for natural gas involving membranes. Chemical Engineering & Technology 24(10). 2001 Oct. 1045-1048.
- [4] Dhar PL, Singh SK. Studies on solid desiccant based hybrid air-conditioning systems. Applied Thermal Engineering 21. 2001. 119-134.
- [5] Zhang LZ. Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures. Energy 31. 2006. 1228-1242.
- [6] Farag HAA, Ezzat MM, Amer H, Nashed AW. Natural gas dehydration by desiccant materials. Alexandria Engineering Journal. 2011 Oct.
- [7] Gandhidasan P, Al-Farayedhi AA, Al-Mubarak AA. Dehydration of natural gas using solid desiccants. Energy 26(9). 2001 Sep. 855-868.
- [8] Arnold K, Stewart M. Surface Production Operations: Design of Gas-Handling Systems and Facilities (Second Edition). Chapter 8 – Gas Dehydration. 1999. 195-240.
- [9] Elliot JR, Lira CT. Introductory Chemical Engineering Thermodynamics. Prentice Hall PTR. 1999.
- [10] Professional RAC Application Engineering. MISTRAL. Tillgänglig: <http://www.mistralassociates.com/ph/r407c-ph.html>
- [11] Koros JK, Mahajan R. Pushing the limits on possibilities for large scale gas separation: which strategies? Journal of Membrane Science. Volume 175 (2). Aug 2000. 181-196
- [12] Jain S., Bansal P.K. Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems. International Journal of Refrigeration 30. 2007 Jan.
- [13] Babakhani D, Soleymani M. Simplified analysis of heat and mass transfer model in liquid desiccant regeneration process. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 41(3). 2010 May. 259-267.
- [14] Öberg V, Goswami DY. Experimental study of the heat and mass transfer in a packed bed liquid desiccant air dehumidifier. Department of Mechanical Engineering, University of Florida. 1998 Nov.

- [15] Lazzarin RM, Gasparella A, Longo GA. Chemical dehumidification by liquid desiccant: theory and experiment. *International Journal of Refrigeration* 22. 1998 Apr. 334-347.
- [16] National Institute of Standards and Technology. Sökord Triethylene glycol.
- [17] Bahadori A, Vuthaluru, HB. Simple methodology for sizing of absorbers for TEG (triethylene glycol) gas dehydration systems. Department of Chemical Engineering, Curtin University of Technology. *Energy* 34. 2009 July.
- [18] Netusill, M., Ditl, P. Comparison of three methods for natural gas dehydration. Department of Process Engineering, Czech Technical University. *Journal of Natural Gas Chemistry* 20. 2011 May. 471-476.
- [19] Kohl AL, Nielsen RB. *Gas Purification (Fifth Edition)*. Chapter 12 – Gas Dehydration and Purification by Adsorption. 1997. 1022-1135.
- [20] Joshi S, Faie JR. Adsorptive drying of toluene. *Ind. Eng. Chem. Res.* 27 (11). 1998 Nov. 2078-2085.
- [21] Panaras G, Mathioulakis E, Belessiotis V. Solid desiccant air-conditioning systems - Design parameters. *Solar & Other Energy Systems Laboratory*. 2011 Jan.
- [22] Ko SM, inventor; United States Department of Energy, Washington, assignee. LiCl dehumidifier/LiBr absorption chiller hybrid air conditioning system with energy recovery. United States Patent 966,524. 1980 Jun 3.
- [23] Ko SM, Grodzka PG, McCormick PO, inventors; United States Department of Energy, Washington, assignee. Energy-efficient regenerative liquid desiccant drying process. United States Patent 821,868. 1980 Feb 26.
- [24] Coulson JM, Richardson. *Chemical Engineering*. 2nd edition. Volume 6. Department of Chemical Engineering, University of Wales Swansea. 580-582. 1993.
- [25] WolframAlpha. Sökord Triethylene glycol
- [26] WolframAlpha. Sökord Lithium bromide
- [27] WolframAlpha. Sökord Calcium chloride
- [28] Smith DL. Optimize solid bed adsorption systems. Alcoa. 1996. Tillgänglig: <http://www.coastalchem.com/PDFs/Alcoa/Optimizing%20Solid%20Bed%20%23A5E3C.pdf>
- [29] Wunder JWJ. How to design a natural-gas drier. *Oil Gas J* 1962;60(32):137–48.
- [30] Gas processors suppliers association. *Engineering data book*, 12 ed. 2004. 599 p.
- [31] Shigley JE, Mischke CR. *Standard handbook of machine design*. New York: McGraw-Hill, 1986.

- [32] Sinnott R, Towler G. Chemical Engineering Design. Fifth edition. Elsevier Ltd. 2009. 313-314, 1003-1004.
- [33] Inflation Rate and Consumer Price Index (CPI), 2012. Tillgänglig: <http://www.rateinflation.com/consumer-price-index/usa-historical-cpi.php?form=usacpi>
- [34] Sorbent Systems, 2011. Tillgänglig: <http://www.sorbentsystems.com/bulksorbents.html>
- [35] Vattenfall.se. Naturgas. Tillgänglig: http://www2.vattenfall.se/miniapps/om_vattenfall/Energikunskap/energilexikon/mainresult.asp?ItemID=844
- [36] Säkerhetsdatablad. Trietylenglykol. UNIVAR. 2007. Tillgänglig: [http://teknik.hyltec.se/uploads///dokument/TR016SV% 20\(2\).pdf](http://teknik.hyltec.se/uploads///dokument/TR016SV%20(2).pdf)
- [37] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. THE INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT. Volume 8 (6). 2003. 324-330.
- [38] Material Safety Data Sheet. Tri Ethylene Glycol. Tillgänglig: http://www.petrochemir.net/ipcc_content/en/product/chemical/MSDS_TEGP.pdf
- [39] Material Safety Data Sheet. Silica Gel Dessiccant. Tillgänglig: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/MSDS/silica.html>

A Dimensioneringsvariabler

Coefficient	Number of theoretical stage (N) = 1	Number of theoretical stage (N) = 1.5	Number of theoretical stage (N) = 2
A_1	1.5175000734×10^5	$1.36318190812 \times 10^4$	$-1.27155870163 \times 10^5$
B_1	$-4.5287844071 \times 10^5$	$-4.1087635096 \times 10^4$	$3.78535979271 \times 10^5$
C_1	$4.50515787525 \times 10^5$	4.1278286256×10^4	$-3.75616159919 \times 10^5$
D_1	$-1.49387377624 \times 10^5$	$-1.38224984469 \times 10^4$	$1.24236038846 \times 10^5$
A_2	$-1.1316270524 \times 10^4$	$-1.07128653518 \times 10^3$	$1.16335738747 \times 10^4$
B_2	3.3777842508×10^4	$3.22852999323 \times 10^3$	$-3.46339151846 \times 10^4$
C_2	-3.3607087×10^4	$-3.24270631055 \times 10^3$	$3.43686140202 \times 10^4$
D_2	$1.11455135941 \times 10^4$	$1.08546448915 \times 10^3$	$-1.1368271474 \times 10^4$
A_3	2.4475093673×10^2	$3.97385136272 \times 10^1$	$-3.3397932662 \times 10^2$
B_3	$-7.3073793526 \times 10^2$	$-1.19123690208 \times 10^2$	$9.94295556513 \times 10^2$
C_3	7.2722549748×10^2	1.1902390712×10^2	$-9.8669620555 \times 10^2$
D_3	$-2.41238559437 \times 10^2$	$-3.96388087735 \times 10^1$	3.2637991018×10^2
A_4	-1.62668383278	$-3.76154014912 \times 10^{-1}$	2.856748838
B_4	4.85801145745	1.1251621391	-8.50453031755
C_4	-4.8359647407	-1.1218236382	8.4391925267
D_4	1.6046374352	$3.7281593611 \times 10^{-1}$	-2.7914105909

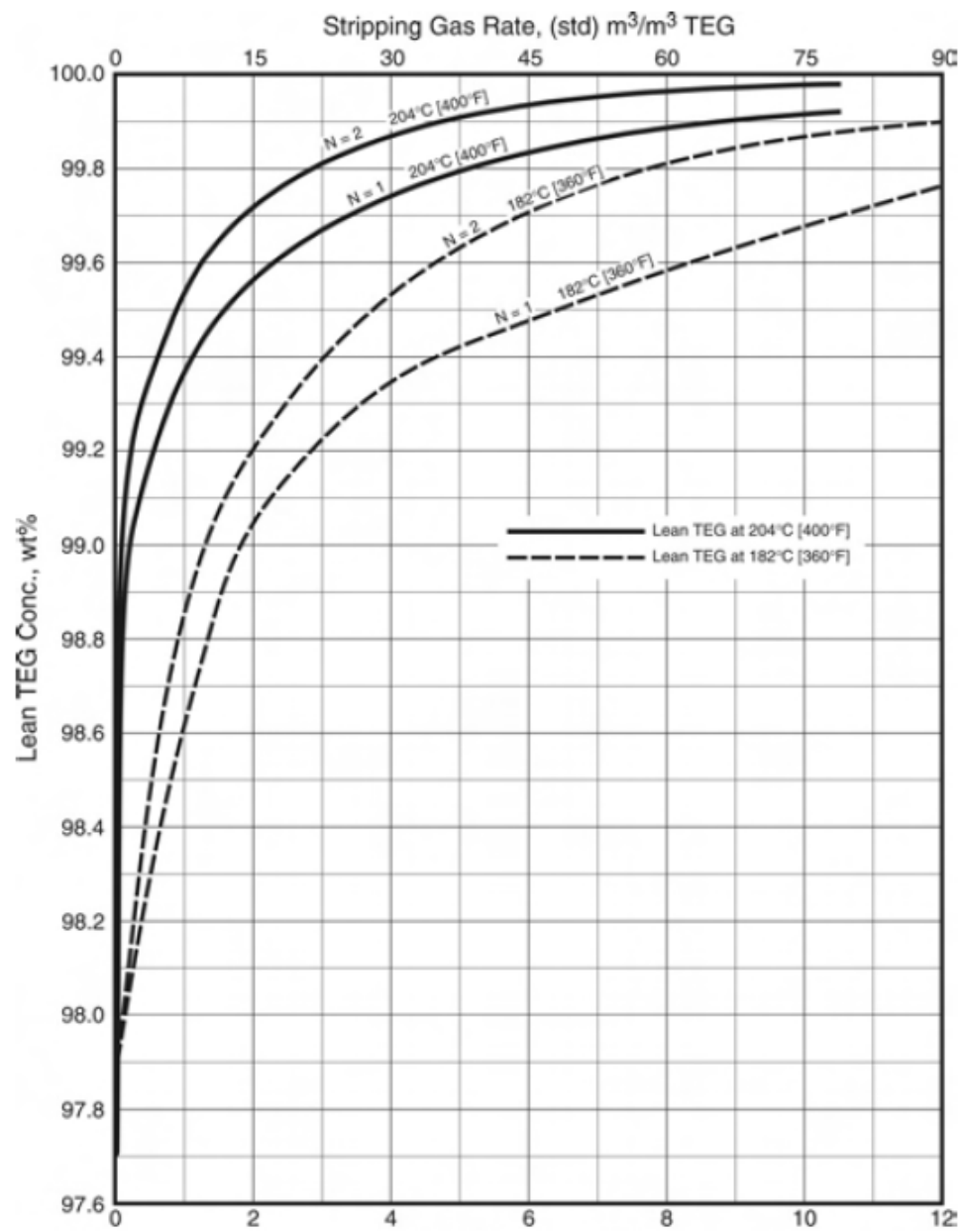
(a)

Coefficient	Number of theoretical Stage (N) = 2.5	Number of theoretical stage (N) = 3	Number of theoretical Stage (N) = 4
A_1	$3.65792068453 \times 10^4$	$1.72521576917 \times 10^5$	$-7.38643001783 \times 10^7$
B_1	$-1.09019787644 \times 10^5$	$-5.16460399496 \times 10^5$	$2.21479386633 \times 10^8$
C_1	$1.08309529773 \times 10^5$	5.1535751573×10^5	$-2.21365910392 \times 10^8$
D_1	$-3.58689467686 \times 10^4$	$-1.7141869357 \times 10^5$	$7.37508239331 \times 10^7$
A_2	$-2.59663054678 \times 10^3$	$-1.26805051527 \times 10^5$	$4.97389685515 \times 10^6$
B_2	$7.74050225267 \times 10^3$	$3.79545983218 \times 10^5$	$-1.49140002987 \times 10^7$
C_2	$-7.69127114067 \times 10^3$	$-3.78677891486 \times 10^5$	1.4906312923×10^7
D_2	$2.54739956763 \times 10^3$	$1.25936959826 \times 10^5$	$-4.96620947993 \times 10^6$
A_3	$5.39404855899 \times 10^1$	$3.20022637366 \times 10^3$	-1.049098764×10^5
B_3	$-1.60845322929 \times 10^2$	$-9.57833625744 \times 10^3$	$3.14566557041 \times 10^5$
C_3	$1.59871276975 \times 10^2$	9.5560237605×10^3	$-3.14403546725 \times 10^5$
D_3	$-5.29664543317 \times 10^1$	$-3.1779138752 \times 10^3$	$1.04746866096 \times 10^5$
A_4	$-3.3504537023 \times 10^{-1}$	$-2.45377077254 \times 10^1$	$6.77322483974 \times 10^2$
B_4	$9.9951682574 \times 10^{-1}$	$7.34407625715 \times 10^1$	$-2.030910371004 \times 10^3$
C_4	$-9.93899634714 \times 10^{-1}$	$-7.3268643351 \times 10^1$	$2.02985369484 \times 10^3$
D_4	$3.2942824495 \times 10^{-1}$	$2.43655884304 \times 10^1$	$-6.7626580778 \times 10^2$

(b)

Figur 16: Dimensioneringsvariabler [17].

B Regenereringsdiagram



C Kostnadsvariabler

Utrustning	S_{enhet}	a	b	n
Vertikala kolonner	Kolonnvikt, kg	10 000	29	0.85
304 ss Raschigringar	Packningsvolym, m ³	0	7300	1
304 ss strukturerat	Packningsvolym, m ³	0	6900	1
Klockbottnar	Diameter, m	290	550	1.9
Pumpar	Flöde, l/s	6900	206	0.9
Värmeväxlare	Area, m ²	1350	180	0.95

D Antaganden

Resultaten i rapporten baseras på ett antal antaganden. De listas nedan.

D.1 För TEG

- Temperaturen hos torkmedlet är konstant genom regenereringen.
- Trycket är konstant genom kolonnerna.
- Temperaturen hos TEG efter avfuktningskolonnen är 41 °C.
- Värmekapaciteter och förångningsentalpier är tagna vid medeltemperaturer och antas därefter temperaturoberoende.
- Inga värmeförluster hos vare sig värmeväxlare, rör eller kolonner.
- Ingående regenereringsluft håller 10 °C.
- Biogas är en ideal gas och mättad med vatten då den går in i avfuktningen.
- Kolonnen som behövs för regenereringen är lika stor som den som behövs för avfuktningen.
- 2 teoretiska steg motsvarar 8 kolonnbottnar med 0.6 meters mellanrum.
- 2 teoretiska steg motsvarar 3 m strukturerad/slumpmässig packning
- Investeringsberäkningar är giltiga även utanför det angivna intervallet.
- Inköpskostnad och förbrukning av TEG försummas.

D.2 För fasta torkmedel

- Temperaturen på gasen ut från regenereringen håller 85 % av gasens ingående temperatur.
- Medeltemperaturen på bädden motsvarar 75 % av värmeväxlarens uttemperatur och 25 % av regenereringsprocessens uttemperatur.
- Värmekapaciteter är tagna vid medeltemperaturer och antas därefter temperaturoberoende.
- Fläktarbete vid regenereringen försummas.
- Inga värmeförluster hos vare sig värmeväxlare, rör eller kolonner.
- Ingående regenereringsluft håller 10 °C.
- Biogas är en ideal gas och mättad med vatten då den går in i avfuktningen.
- Kolonnen som behövs för regenereringen är lika stor som den som behövs för avfuktningen.

E MATLAB-kod

```

1  clc
2  clear all
3                                     %Mekaniskavfuktning
4  T=[0:27]

6  A=8.07131;                        %Antione-parametrar
7  B=1730.63;                       %Antione-parametrar
8  C=233.426;                       %Antione-parametrar

10 Pvatten=10.^((A-B./(T+C))); %angtryck for vatten i torr
11 Pvatten=Pvatten./760*101325;% angtryck for vatten i Pa
12 Ptot=4.*10^5;                    %Totaltryck i systemet, Pa
13 n_Nm3=101325./(8.31447.*273);%Substansmangd i en Nm^3
14 nprick=n_Nm3.*1200./3600;        %Molflode
15 Mgas=.62.*16+.38.*44;           %Molmassa torr biogas
16 k=length(T)+1
17 for n=1:length(T)-1
18   Tin(n)=T(k-(n))
19   Tut(n)=T(k-(n+1))
20   Yin(n)=Pvatten(Tin(n)+1)./(Ptot); %Molandel vatten
21   Yut(n)=Pvatten(Tut(n)+1)./(Ptot); %Molandel vatten
22   Vattenin(n)=nprick.*Yin(n).*18.*10.^(-3); %Mangd vatten [kg/s]
23   Vattenut(n)=nprick.*Yut(n).*18.*10.^(-3); %Mangd vatten [kg/s]
24   Avfuktningsmangd(n)=(Vattenin(n)-Vattenut(n));%Mangd avfuktat ←
    vatten
25 %%
26                                     %Varmekapaciteter
27   Cpsteam=1.9.*10^3;              %Varmekapacitet vattenanga J/(kgK)
28                                     %Berakning av Cp-koldioxid
29   A= 24.99735;
30   B= 55.18696;
31   C= -33.69137;
32   D= 7.948387;
33   E= -0.136638;
34   F= -403.6075;
35   G= 228.2431;
36   H= -393.5224;
37   CpCOX= A + B.*290 + C.*290.^2 + D.*290.^3 + E./290.^2; %J/molK
38   Cpmetan=35.6                    %J/molK
39   Cpgas=CpCOX.*.38+Cpmetan.*.62; %J/molK
40   mgas(n)=(1-Yin(n)).*nprick.*Mgas; %Molmasssa for fuktig gas
41   Q(n)=(Cpgas.*(1-Yin(n)).*nprick+Vattenut(n).*Cpsteam+2260000.*←
    Avfuktningsmangd(n))./1000;%Energibehov for att sank ←
    temperaturen en grad
42   Qtot(n)=sum(Q(1:n))

```

```

43 Avfuktningsmangdtot(n)=sum(Avfuktningsmangd(1:n))
44 end
45 figure(1)
46 plot(Avfuktningsmangdtot(1:n).*1000,Qtot(1:n),'g');%Energibehov for↵
    mekanisk avfuktning
47 hold on
48 cop=4.84; %Coefficient of performance
49 plot(Avfuktningsmangdtot(1:n).*1000,Qtot(1:n)./(cop),'c')%Ideal ↵
    varmpump
50 ylabel('Energiatgang varme [kw]')
51 xlabel('Mangd avfuktat vatten [g/s]')
52 plot([1.8 1.8],[0 20],'--k')%Aktuellt avfuktningskrav
53 legend('Ideal varmpump','Nuvarande avfuktningskrav')
54 %%
55 %Parametrar for att bestamma TEG-flode
56 figure(2)
57 X=.99 %TEG-konc.
58 N=input('Antal teoretiska bottnar')
59 if N==1 %Antal teoretiska bottnar
60 x0=.05
61 A1=1.51750000734 * 10^5;
62 B1=-4.5287844071 * 10^5;
63 C1=4.50515787525 * 10^5;
64 D1=-1.49387377624 * 10^5;
65 A2=-1.1316270524 * 10^4;
66 B2 =3.3777842508 * 10^4;
67 C2 =-3.3607087 * 10^4;
68 D2 =1.11455135941 * 10^4;
69 A3 =2.4475093673 * 10^2;
70 B3 =-7.3073793526 * 10^2;
71 C3 =7.2722549748 * 10^2;
72 D3 =-2.41238559437 * 10^2;
73 A4 =-1.62668383278;
74 B4 =4.85801145745;
75 C4 =-4.8359647407;
76 D4 =1.6046374352;
77 %
78 else if N==1.5 %Antal teoretiska bottnar
79 x0=0.017
80 A1=1.36318190812 * 10^4;
81 B1=-4.1087635096 * 10^4;
82 C1=4.1278286256 * 10^4;
83 D1=-1.38224984469 * 10^4;
84 A2=-1.07128653518 * 10^3;
85 B2 =3.22852999323 * 10^3;
86 C2 =-3.24270631055 * 10^3;
87 D2 =1.08546448915 * 10^3;
88 A3 =3.97385136272 * 10^1;
89 B3 =-1.19123690208 * 10^2;

```

```

90 C3 =1.1902390712 * 10^2;
91 D3 =-3.96388087735 * 10^1;
92 A4 =-3.76154014912 * 10^-1;
93 B4 =1.1251621391;
94 C4 =-1.1218236382;
95 D4 =3.7281593611 * 10^-1;
96 %
97 else if N==2 %Antal teoretiska bottnar
98 x0=.014
99 X=.985 %TEG-konc.
100 A1=-1.27155870163 * 10^5;
101 B1=3.78535979271 * 10^5;
102 C1=-3.75616159919 * 10^5;
103 D1=1.24236038846 * 10^5;
104 A2=1.16335738747 * 10^4;
105 B2 =-3.46339151846 * 10^4;
106 C2 =3.43686140202 * 10^4;
107 D2 =-1.1368271474 * 10^4;
108 A3 =-3.3397932662 * 10^2;
109 B3 =9.94295556513 * 10^2;
110 C3 =-9.8669620555 * 10^2;
111 D3 =3.2637991018 * 10^2;
112 A4 =2.856748838 ;
113 B4 =-8.50453031755;
114 C4 =8.4391925267 ;
115 D4 =-2.7914105909;
116 end
117 end
118 end

120 R=[.72 .7562 0.8031 0.8297 .865 .89] %effektivitet
121 mavf=[1.7138 1.8003 1.9116 1.9749 2.059 2.1185] %g
122 mavf=mavf.*10.^(-3) %kg

124 a=A1+B1./X+C1./X.^2+D1./X.^3;
125 b=A2+B2./X+C2./X.^2+D2./X.^3;
126 c=A3+B3./X+C3./X.^2+D3./X.^3;
127 d=A4+B4./X+C4./X.^2+D4./X.^3;
128 %FSI [m^3 TEG/kg vatten in i kolonen]

130 for i=1:length(R)
131 FSI(i)=fzero(@(fsi) exp(a+b./fsi+c./fsi.^2+d./fsi.^3)-R(i),x0,'on')
132 end

134 Vattenin=mavf;
135 VTEG=FSI.*Vattenin;; %Volymsflode TEG
136 mTEG=1125.*VTEG.*1200./3600;% Massflode TEG
137 CpTEG=384.16*1000/150.17; %J/kg Cp for TEG
138 Cpvatten=4.18*1000; %J/kg

```

```

139 mavfTEG=mavf; %Mangd avfuktat
140 U=1050; %W/m2K
141 TregTEG=208; %[C] regenereringstemperatur
142 TkolTEG=41; %[C] inkommande temperatur
143 mLfTEG=mTEG+mavfTEG;
144 CpLTEG=CpTEG.*X+(1-X).*Cpvatten
145 WtTEG=(mTEG.*X)./(mLfTEG)
146 CpLfTEG=WtTEG.*CpTEG+(1-WtTEG).*Cpvatten
147 DeltaHvap=2260*1000; %J/kg vatten
148 hold on
149 Q2TEG=(mLfTEG.*CpLfTEG.*(TregTEG-TkolTEG)+mavfTEG.*DeltaHvap)/1000%↵
    kW

151 plot(mavfTEG*1000,Q2TEG,'m')
152 %% Berakningar pa vad som kravs for regenerering med gas
153 TregTEG=204
154 Tkall=10; %C Genomsnittlig utomhustemperatur i ↵
    Sverige
155 GL=1; %Nm3luft/m3 TEG, for att uppnå renhet ↵
    pa 99%
156 VLuft=GL.*VTEG.*1200./3600; %Volymsflode
157 Torkenergi=(VLuft.*1.0035.*1000.*1.13.*(TregTEG-Tkall)+mLfTEG.*↵
    CpLTEG.*((TregTEG-TkolTEG))+mavfTEG.*DeltaHvap)./1000;
158 hold on
159 %%

161 TregTEG=182
162 Tkall=10; %C Genomsnittlig utomhustemperatur i ↵
    Sverige
163 GL=14; %Nm3luft/m3 TEG, for att uppnå renhet ↵
    pa 99%
164 VLuft=GL.*VTEG.*1200./3600; %Volymsflode for torkluft
165 Torkenergi=(VLuft.*1.0035.*1000.*1.13.*(TregTEG-Tkall)+mLfTEG.*↵
    CpLTEG.*((TregTEG-TkolTEG))+mavfTEG.*DeltaHvap)./1000;%En notis ↵
    om det
166 plot(mavfTEG*1000,Torkenergi,'--r*')
167 legend('Regenerering med kokning','Regenerering med 204C luft','↵
    Regenerering med 182C luft')
168 %% SILIKAGEL

170 figure(3)

172 w2=3600*0.0024./1200; % [kg/m3] (0.0024=g vatten/s , 1200=Q ,↵
    3600=1h)
173 Q=linspace(0,1200); % Flode av rotgas [Nm m3/h]
174 %Q=900; % [Nm3/h], ett flode pa 900 ger en ↵
    avfuktning pa 1.8 g/s. 6.05 kW kravs.
175 c=10; % Torkcykel [h]
176 M=Q.*c.*w2; % Total mangd adsorberat vatten [kg]

```

```

177 Y=3256; % Heat of adsorption [kJ/kg h20]
178 rhoV=7860; % Densitet for stal [kg/m3]
179 Z=0.88; % Compressibility factor, dimensionless
180 rhoD=721; % Bulkdensitet for silikagel [kg/m3]

182 Db=sqrt((327.*Q.*(24.*10^(-6)).*Z.*298)/(350.*14)); %350 kpa antar ←
    vi darfor att detta ar trycket nar varmevaxling skett mot glykol←
    . 14 ar gasflodet som ska variera fran 9-18.

186 %rhoSiO2= 2648; %kg/m3

188 u=7/100; % Useful desing capacity [kg vatten / ←
    100 kg torkmedel]
189 Vd=M./(rhoD.*u); % Baddvolym [m3]
190 md=Vd.*rhoD; %
191 Cd=1.047; % [kJ/kg]
192 Cv=0.502; % [kJ/kg]
193 Th=180; % [Celsius]
194 Tb=0.75*Th+(0.25*0.85*Th); % Medelbaddtemperatur [Celsius]
195 Tg=0.85*Th;
196 deltaT=Th-Tb;
197 E=1; % Joint efficiency
198 S=110;

200 wv=0.0055; % Karlvaggstjocklek [m]
201 Ac=(pi.*Db.^2)./4; % Tvarsnittsarea, badd [m]
202 Lb=Vd./Ac; % Baddhojd [m]
203 mv=rhoV.*pi.*Db.*wv.*(Lb+0.6+0.5.*Db); % Massa stal i karlet [kg]

205 H=((mv.*Cv.*deltaT)+(md.*Cd.*deltaT)+(M.*Y)); % [kJ] M*Y ger ←
    storsta bidrag, dvs storre delen energi gar at till desorption. ←
    av vatten.

207 F=1; % Forlustfaktor

209 h1=10; % Entalpi for torr luft (felkalla) vid ←
    10 grader celsius [kJ/kg]
210 h2=183; % Entalpi for torr luft (felkalla) vid ←
    180 grader celsius [kJ/kg]

212 rho1=1.014; % Medeldensitet for luft mellan 10-180 ←
    celsius [kg/m3]

214 G=H.*F./((h2-h1).*rho1); % Volym regenereringsgas [m3]
215 rhoG=1.1; % [kg/m3]
216 M2=1000.*M./(c.*60.*60); % g avfuktat/s [g/s]

```

```

218 %H2=H./(c.*3600);%kW
220 Cp1=1.012; % Medel-Cp for luft mellan 10-180C [kJ/↵
    kgK]
222 q2=(G.*(180-10)*Cp1*rho1)./(c*3600); % [kW]
224 plot(M2,q2,'b')
226 ylabel('Energiatgang varme [kW]')
228 xlabel('Mangd avfuktat vatten [g/s]')
229 hold on
230 q2=(G.*(180-10)*Cp1*rho1)./(c*3600) % [kW]
232 %% AKTIVERAD ALUMINA
234 w2=3600*0.0024./1200; % [kg/m3] (0.0024=g vatten/s , 1200=Q↵
    , 3600=1h)
235 Q=linspace(0,1200); % Flode rotgas [Nm m3/h]
236 %Q=913; % [Nm3/h], ett flode pa 900 ger en ↵
    avfuktning pa 1.8 g/s. 8.15 kW kravs.
237 c=10; % Torkcykel [h]
238 M=Q.*c.*w2; % Total mangd adsorberat vatten [kg]
239 Y=3489; % Heat of adsorption [kJ/kg h2O],
241 rhoV=7860; % Densitet for stal [kg/m3]
242 Z=0.88; % Compressibility factor, dimensionless
244 Db=sqrt((327.*Q.*(24.*10^(-6)).*Z.*298)/(350.*14)); %350 kpa antar ↵
    vi darfor att detta ar trycket nar varmevaxling skett mot glykol↵
    . 14 ar gasflodet som ska variera fran 9-18.
246 rhoD=840; % Genomsnittsbulkdensitet for aktiverad↵
    alumina [kg/m3]
247 rhoAlumina= 3580; % Partikeldensitet [kg/m3]
248 u=7/100; % useful desing capacity, silica gel ↵
    tar upp 7-9 kg vatten per 100 kg torkmedel
249 Vd=M./(rhoD.*u); % Baddvolym [m3]
250 md=Vd.*rhoD; % Massa Aktiverad alumina [kg]
251 Cd=1.00488; % [kJ/kg]
252 Cv=0.502; % [kJ/kg]
254 Th=220;
256 Tb=0.75*Th+(0.25*0.85*Th); % medelbaddtemperatur [Celsius]
257 Tg=0.85*Th;
258 deltaT=Th-Tb;

```

```

260 E=1; % Joint efficiency
261 S=110;
262 wv=0.0055; % Karlvaggens tjocklek [m]

264 %wv=(0.5*0.35*Db)/(S*E-0.6*0.35);

266 Ac=(pi.*Db.^2)./4; % Tvarsnittsarea badd [m2]
267 Lb=Vd./Ac;

269 mv=rhoV.*pi.*Db.*wv.*(Lb+0.6+0.5*Db); % Massa stal, karlet [kg]
270 H=((mv.*Cv.*deltaT)+(md.*Cd.*deltaT)+(M.*Y)); % [kJ], M*Y ger klart↵
    storsta bidrag till H vilket ar bra da det sager att materialet↵
    (stal) inte tar upp sa mycket av varmen utan energin gar att ↵
    att desorbera vattnet.
271 F=1; % Forlustfaktor

273 h1=10; % [kJ/kg] entalpi for torr luft vid 10 ↵
    grader celsius
274 h2=183; % [kJ/kg] entalpi for torr luft vid 180↵
    grader celsius
275 rho1=1.014; % Medeldensitet for luft mellan 10-180 ↵
    celsius [kg/m3]

277 G=H.*F./((h2-h1).*rho1); % Volym regenereringsgas [m3]

279 rhoG=1.1;
280 q2=(G.*(220-10)*Cp1*rho1)./(c*3600) % [kW]

283 M2=1000.*M./(c.*60.*60); % [g avfuktat/s]

285 %H2=H./(c.*3600);%kW

287 plot(M2,q2,'r')

289 ylabel('Energiatgang varme [kW]')

291 xlabel('Mangd avfuktat vatten [g/s]')

293 Cp1=1.012; %Medel-cp for luft mellan 10 och 180 C

295 %%

297 %MOLEKYLar SIKT

299 w2=3600*0.0024./1200; % [kg/m3]
300 Q=linspace(0,1200); % [Nm m3/h]
301 %Q=901; % [Nm3/h], ett flode pa 901 ger↵
    en avfuktning pa 1.8 g/s. 11.27 kW kravs.

```

```

302 c=10; % Torkcykel [h]
303 M=Q.*c.*w2; % Total mangd vatten adsorberat↵
    [kg]
304 Y=4186;

306 rhoV=7860; % [kg/m3] densitet for stal
307 Z=0.88 ;

309 Db=sqrt((327.*Q.*(24.*10^(-6)).*Z.*298)/(350.*14)); %350 kpa antar ↵
    vi darfor att detta ar trycket nar varmevaxling skett mot glykol↵
    . 14 ar gasflodet som ska variera fran 9-18.

311 rhoD=721; % genomsnittsbulkdensitet for ↵
    molekyler sikt [kg/m3]
312 u=14/100; % Useful desing capacity, ↵
    silica gel tar upp 7-9 kg vatten per 100 kg torkmedel
313 Vd=M./(rhoD.*u); % Baddvolym m3
314 md=Vd.*rhoD;
315 Cd=1.046; % [kJ/kg]
316 Cv=0.502; % [kJ/kg]
317 Th=260; %
318 Tb=0.75*Th+(0.25*0.85*Th); % medelbaddtemperatur, [Celsius]
319 Tg=0.85*Th; %
320 deltaT=Th-Tb;
321 E=1;

323 S=110;

325 wv=0.0055 % karlvaggens tjocklek

327 Ac=(pi.*Db.^2)./4;
328 Lb=Vd./Ac;
329 mv=rhoV.*pi.*Db.*wv.*(Lb+0.6+0.5.*Db);
330 H=((mv.*Cv.*deltaT)+(md.*Cd.*deltaT)+(M.*Y)); % enhet kj, M*Y ger ↵
    klart storsta bidrag till H vilket ar bra da det sager att ↵
    materialet (stal) inte tar upp sa mycket av varmen utan energin ↵
    gar att att desorbera vattnet.

332 F=1; % Forlustfaktor
333 h1=10; % [kJ/kg] entalpi for torr luft (felkalla)↵
    vid 10 grader celsius
334 h2=183; % [kJ/kg] entalpi for torr luft (felkalla)↵
    vid 180 grader celsius, tank pa att vi kan andra temperatur ↵
    till typ 300 for att fa en mindre volym av regenereringsgasen ↵
    men kostar lite mer att varma upp.
335 rho1=1.014; % medeldensitet for luft mellan 10-180 ↵
    celsius
336 G=H.*F./((h2-h1).*rho1); %volym regenereringsgas [m3]
337 rhoG=1.1;

```

```

338 M2=1000.*M./(c.*60.*60); %g avfuktat/s
339 H2=H./(c.*3600); % [kW]
340 Cp1=1.012; %medelCp for luft mellan 10-180 celsius
341 q2=(G.*(260-10)*Cp1*rho1)./(c*3600) %kW
342 plot(M2,q2,'m')
343 ylabel('Energiatgang varme [kW]')
344 xlabel('Mangd avfuktat vatten [g/s]')
345 %%
346 xlabel('Mangd avfuktat vatten [g/s]')
347 ylabel('Energibehov varme [kW]')
348 %%
349 %Berakning av pumpkostnader
350 rhoTEG=1100; %kg/m3
351 VTEG=mTEG./rhoTEG; %Volymfode TEG
352 VfTEG=mLfTEG./rhoTEG; %Volymflode fuktig TEG
353 g=9.82; %m/s^2
354 H=1.5.*N; %Hojd pa kollon med teoretiska bottnar
355 Pumpeffekt=(mTEG*g*H)

```


F Bidragsrapport

Deltagande studenter, med tillhörande ansvarsområden, listas nedan. Avsnitt och delar som behandlats av alla, exempelvis inledning och diskussion, har exkluderats. Av samma skäl nämns inte litteratursökningen.

Marcus Benzon

- Huvudförfattare av avsnittet fasta torkmedel.
- Delförfattare av avsnittet regenerering.
- Delansvarig för energiberäkningar av fasta torkedel i MATLAB.

Aryan Dawody

- Delförfattare av avsnittet fasta torkmedel.
- Delförfattare av avsnittet regenerering.
- Delförfattare av avsnittet anläggningen i dag.
- Delansvarig för energiberäkningar av fasta torkedel i MATLAB.

Olle Gunnarsson

- Redaktionellt ansvarig för rapporten.
- Ansvarig för utformning av rapporten i L^AT_EX.
- Huvudförfattare av avsnittet flytande torkmedel.
- Huvudförfattare av avsnittet energibehov och investeringskostnad.
- Delförfattare av avsnittet regenerering.
- Delförfattare av avsnittet dimensionering av utrustning.
- Delförfattare av avsnittet investeringskostnader.
- Delförfattare av avsnittet anläggningen i dag.

Pontus Gustafson

- Huvudförfattare av avsnittet flytande torkmedel.
- Delförfattare av avsnittet investeringskostnader.
- Delförfattare av avsnittet membranteknik.
- Delförfattare av avsnittet miljö- och hälsopåverkan.

Johan Götvall

- Huvudansvarig för energiberäkningar av flytande torkedel och mekanisk avfuktning i MATLAB.
- Delförfattare av avsnittet flytande torkmedel.
- Delförfattare av avsnittet membranteknik.
- Delförfattare av avsnittet miljö- och hälsopåverkan.
- Delförfattare av avsnittet anläggningen i dag.
- Delaktig i framtagande av projektet.

Niklas Persson

- Delförfattare av avsnittet fasta torkmedel.
- Delförfattare av avsnittet dimensionering av utrustning.
- Delförfattare av avsnittet miljö- och hälsopåverkan.
- Delansvarig för energiberäkningar av fasta torkedel i MATLAB.