VÄRMEFORSK

Energieffektiv biobränsletorkning med öppen absorptionsprocess

Beskrivning av befintligt system samt parameterstudie som underlag till systemförbättringar

Lars Johansson, Lars Westerlund

DELPROGRAM TORKNING AV BIOBRÄNSLE 667

Energieffektiv biobränsletorkning med öppen absorptionsprocess

Beskrivning av befintligt system samt parameterstudie som underlag till systemförbättringar

Energy efficient bio fuel drying with open absorption system

Description of pilot plant and parameter study

Lars Johansson, Lars Westerlund
Luleå Tekniska Universitet
Institutionen för Maskinteknik
Avdelning Energiteknik

T9-610, Y9-702

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM - TEL 08/677 25 80
Maj 1999
ISSN 0282-3772

FÖRORD

Denna rapport är resultatet av ett forskningsprojekt utfört vid Luleå tekniska universitet, avd. energiteknik. Projektet har finansierats av Värmeforsk och pågått under 1998.

Vi skulle vilja uttrycka vår tacksamhet till följande personer som på ett förtjänstfullt sätt gjort det möjligt att genomföra detta projekt.

Alf Andersson
Per Åke Franck
Hans Theliander
Tomas Åbyhammar

Samtliga medlemmar i värmeforsk referensgrupp.

Vidare vill vi tacka Lars Martinson och Sören Lundh för all hjälp beträffande den befintliga anläggningen vid Martinsons Trä KB.

Luleå 98-08-14

Lars Johansson

Lars Westerlund

SAMMANFATTNING

Denna rapport beskriver ingående en befintlig torkanläggning vid ett sågverk, Martinsons Trä, beläget i Västerbotten. Anläggningen bygger på en teknik, sk öppet absorptionssystem, vilken ej tidigare i Sverige utnyttjats i torksammanhang.

För att belysa möjligheterna att vidareutveckla tekniken har en parameterstudie genomförts. Variabler såsom torktemperatur, absorptionslösningens koncentration samt kylning vid absorption har undersökts. Som jämförelse utnyttjas dagens anläggning, ett lågtemperatursystem, (torktemperatur 78°C).

Resultaten visar att lufttemperaturen i torksystemet skall vara så hög som möjligt för att minimera erforderlig luftmängd. Det är möjligt att reducera luftflödet med ca 30% vid bibehållen torkkapacitet genom att höja torktemperaturen till 140°C.

En kylning av luften vid passage genom absorbatorn minskar även erforderlig luftmängd. För att detta skall vara ett alternativ måste det finnas avsättning för den bortförda värmemängden från luftkretsen. Detta avser såväl temperaturnivå som energimängd. En kylning med 5°C jämfört med dagens anläggning minskar luftflödet med ca 50% vid bibehållen avfuktningskapacitet.

Hög saltkoncentration bör eftersträvas för att minimera biobränsletork och absorbator. En begränsade faktor utgör kristallisationsproblem för absorptionslösningen. En saltkoncentration på 85 viktsprocent för lösningen i absorbatorn reducerar luftflödet med ungefär 30% av referensfallet.

Studien visar att det är möjligt att reducera den befintliga anläggningens processflöden. I anläggningen ingående apparater kan därmed minskas. Anläggningens elanvändning minskar också vid minskade luftflöden då eleffekt till fläktar reduceras.

Tidigare har investeringskostnaden för den öppna absorptionstekniken varit relativt hög jämfört med andra torktekniker. Resultaten visar att det är möjligt att sänka den initiala kostnaden och därmed öka konkurrenskraften.

ABSTRACT

The report describes a pilot plant used for bio fuel drying with an open absorption process. This technique has not been used in Sweden in this context earlier.

A parameter study has been carried out in order to increase the capacity for the plant. Parameters, such as drying temperature, salt concentration and absorption with cooling have been examined. Measuring data from the pilot plant have been used as comparison.

The results show that the drying temperature should be as high as possible in order to decrease the airflow in the process. It is possible to decrease the airflow with 30% and still remain the same drying capacity for the pilot plant by increasing the drying temperature from 78°C to 140°C.

If the airflow is cooled during passage through the absorber the airflow is also decreasing. For this to be an interesting alternative, the heat taken from the airflow has to be useful in other parts of the process. Cooling of 5°C from adiabatic condition decreases the airflow with 50% compared to the reference case.

High salt concentration also decreases the airflow. The concentration is limited by crystallisation problems at higher concentrations. Salt concentration of 85 percent by weight in the absorber decreases the airflow with 35%.

The study shows that it is possible to reduce the airflow of the existing plant. This will lead to decreased sizes of the equipment and reduced electrical energy demand.

The present investment cost for open absorption systems has been relatively high. The results show that it is possible to reduce the initial costs and therefore increase the competitiveness towards other drying methods.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING 1
1.1 Öppet Absorptionssystem 1

2 PoD ANLÄGGNING VID SÅGVERK 3
2.1 Indunstningsanläggning 3
2.1.1 Funktionsbeskrivning 4
2.1.2 Säkerhetsfunktioner 5
2.2 Virkestorkar 5
2.2.1 Absorbator 6
2.2.2 Funktionsbeskrivning 8
2.3 Barktork 9
2.3.1 Funktionsbeskrivning 9
2.3.2 Absorbator 10
2.3.3 Funktionsbeskrivning 11
2.4 Erfarenheter från drift 12
2.4.1 Indunstningsanläggning 12
2.4.2 Virkestorkar 13
2.4.3 Biobränsletork 13

3 BERÄKNINGAR 15
3.1 Biobränsletorken 16
3.2 Absorbatorn 17
3.3 Indunstningsanläggningen 18

4 PARAMETERSTUDIE 23
4.1 Inledning 23
4.1.1 Referensfall 23
4.2 Biobränsletork 24
4.2.1 Torktemperatur 24
4.3 Absorbatorn 25
4.3.1 Kylning 25
4.3.2 Inverkan av saltkoncentration 27
4.4 Indunstning 28
4.4.1 Saltkoncentration 28
4.4.2 Antalet indunstningseffekter 29
4.4.3 Fjärrvärmeproduktion 29

5 RESULTAT 30
5.1 Inledning 30
5.2 Biobränsletork 30
5.2.1 Torktemperatur 30
5.3 Absorbatorn 32
5.3.1 Kylning 32
5.3.2 Inverkan av saltkoncentration 34
5.4 Indunstning 36

5.4.1 Inverkan av saltkoncentration 36
5.4.2 Antal effektsteg 38
5.4.3 Fjärrvärmeproduktion 38

6 DISKUSSION 40

7 SLUTSATSER 43

8 FORTSATT ARBETE 44

9 REFERENSER 45

NOMENKLATUR

A	Värmeöverförande yta (m^2)
C	Saltkoncentration (viktsprocent)
$c_{p,bark}$	Specifik värmekapacitet fuktig bark (J/kg·K)
$c_{p,h2o}$	Specifik värmekapacitet vatten (J/kg·K)
$c_{p,luft}$	Specifik värmekapacitet luft (J/kg·K)
$c_{p,lösning}$	Specifik värmekapacitet saltlösning (J/kg·K)
$c_{p,torr\ bark}$	Specifik värmekapacitet torr bark (J/kg·K)
$c_{p,ånga}$	Specifik värmekapacitet vattenånga (J/kg·K)
h	Entalpi hos saltlösning (kJ/kg)
h_l	Entalpi hos luft (kJ/kg torr luft)
M_l	Molmassa luft (kg/Kmol)
M_v	Molmassa vattenånga (kg/Kmol)
m_l	Massa luft (kg)
P_l	Tillförd effekt till indunstningsanläggning (kW)
$P_{batteri}$	Tillförd effekt i värmebatteri (W)
P_{kond}	Kondensorvärme (kW)
P_{kyl}	Kyleffekt (kW)
P_s	Mättnadstryck vattenånga (Pa)
P_{tot}	Totalt lufttryck (Pa)
P_v	Vattenångans partialtryck (Pa)
R_v	Gaskonstant vattenånga (J/kg·K)
r	Vattenångans ångbildnings entalpi (KJ/kg)
T	Lufttemperatur generellt (K)
t	Lufttemperatur generellt (°C)
$t_{bark,in}$	Temperatur på bark in till biobränsletork (°C)
$\bar{t}_{bark}$	Medeltemperatur på bark i biobränsletork (°C)
$t_{bark,ut}$	Temperatur på bark ut från biobränsletork (°C)
$\bar{t}_{luft}$	Medeltemperatur på luft i biobränsletork (°C)
V	Volym luft (m^3)
x	Absolut vatteninnehåll i luft (kg vatten/kg torr luft)
$\dot{m}_{avd}$	Avdunstad vattenmängd i tork (kg/s)
$\dot{m}_{bark}$	Massflöde bark (kg/s)
$\dot{m}_{torr}$	Massflöde torr luft (kg torr/s)
$\dot{Q}_{bark}$	Avgiven värmeeffekt till bark (W)
$\dot{Q}_{konv}$	Avgiven värmeeffekt från luft (W)
$\dot{Q}_{trans}$	Transmissionsförluster (W)
$\dot{V}$	Volymflöde luft (m^3/s)

Grekiska beteckningar

α	Konvektivt värmeöverföringstal ($W/m^2 \cdot K$)
Φ	Relativ luftfuktighet (%)
ρ_{torr}	Densitet torr luft (kg torr/m^3)

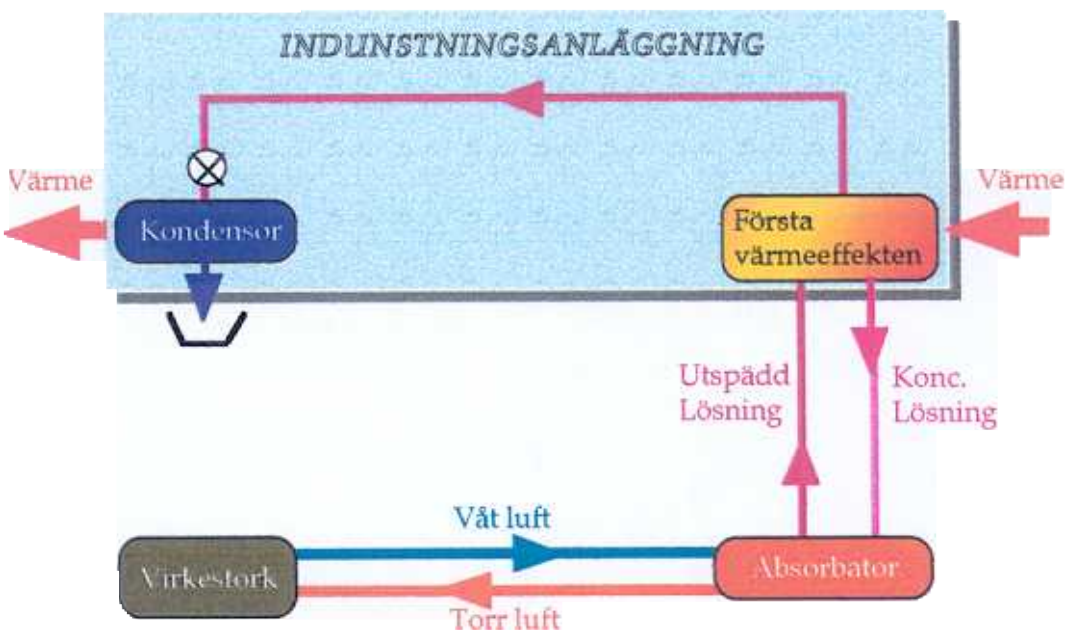
1. INLEDNING

Från mitten av -80 talet har en torkteknik, sk. öppet absorptionssystem varit i drift vid Martinsons Trä KB, ett sågverk beläget i Västerbotten. Systemet är kopplat till fyra virkestorkar samt en biobränsletork. Då värmebehovet i virkestorkarna sjunker radikalt vid inkoppling av systemet gentemot utnyttjandet av uteluft för torkning erhålls ett överskott av bränsle, detta torkas i biobränsletorken före avsalu .

Detta projekt skall beskriva denna anläggning samt belysa förändringar av systemet för att öka konkurrenskraften gentemot andra på marknaden förekommande torksystem för sparande av värmeenergi.

1.1 Öppet absorptionssystem

Systemet består av två huvudenheter, absorbator och indunstningsanläggning, se Fig. 1.



Figur 1. Öppet absorptionssystem inkopplat vid ett sågverk.
Figure 1. Open absorption system installed at the sawmill.

I virkestorken utnyttjas luft för att ta upp vatten från sågade trädelar. Med luften bärs detta vatten bort från torken. Luften får därefter passera genom absorbatorn. I denna apparat skapas kontakten mellan luften och absorptionslösningen (vätskefas) som består av en saltlösning av kaliumacetat och vatten. Eftersom absorptionsmediet är hygroskopiskt absorberas en stor del av vattenångan i luften. Vid absorptionen utvecklas värme varvid systemets temperatur höjs. Luften blir således torrare och erhåller en högre temperatur vid sin passage

genom absorbatorn. Det är därför möjligt att återföra denna luft till virkestorken för att på nytt ta upp vatten. Vattnet som återfinns i absorptionslösningen måste i en kontinuitet avskiljas från lösningen, vilket sker i indunstaren (generator och kondensor i Fig. 1). Separeringen av vattnet är möjligt genom att absorptionsmediet har en högre kokpunkt än vatten. Den regenererade absorptionslösningen återförs till absorbatorn medan vattenångan leds till kondensorn. Där kyls vattnet före avlänkning från systemet, varvid stora delar av tillförd värme tas tillvara.
På detta sätt är det möjligt att minska värmebehovet för virkestorkning högst avsevärt [1,2]. I de följande avsnitten beskrivs respektive enhet ingående.

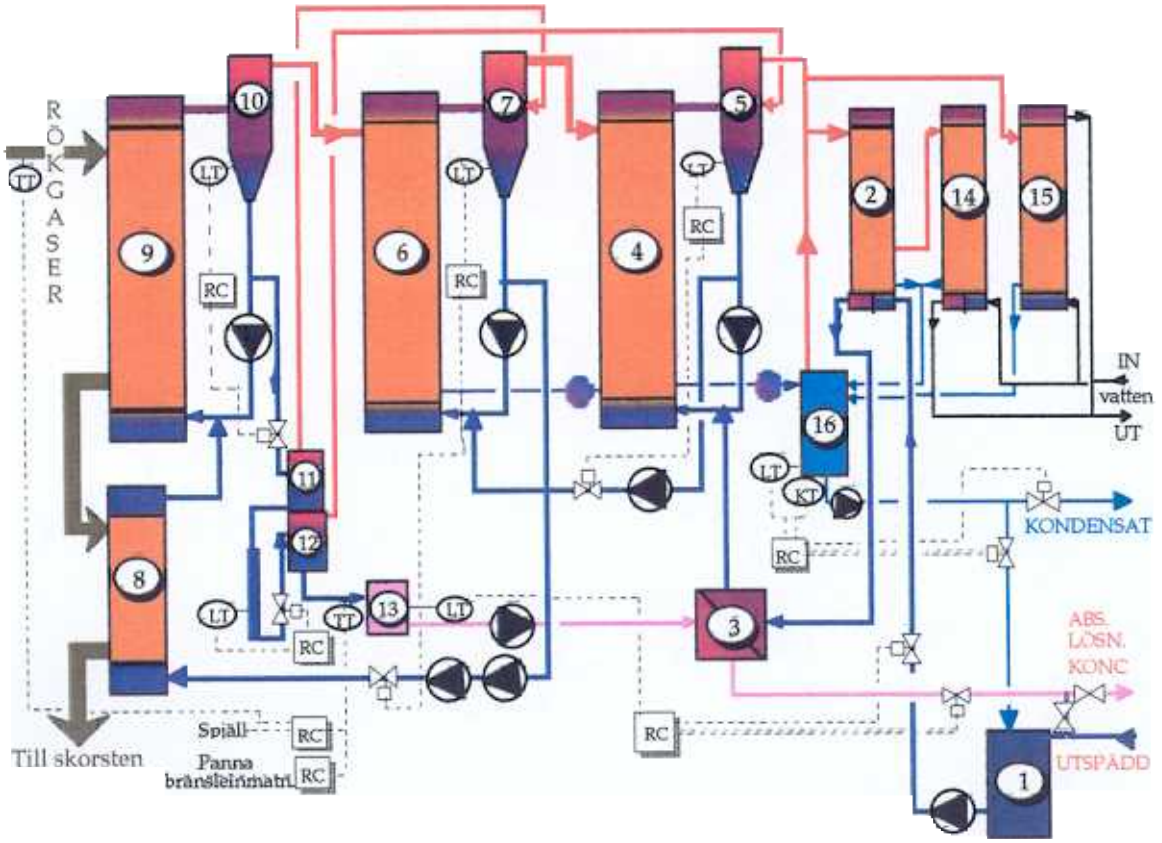
2 PoD ANLÄGGNING VID SÅGVERK

2.1 Indunstningsanläggning.

Anläggningen består av tre effektenheter samt flashning i två steg.
De tre effektstegen består var och en av tubvärmeväxlare samt ångdom. Den stora skillnaden mellan dessa steg är arbetstryck samt värmeöverförande yta.
Fasomvandlingen av vatten (vätska/ånga) sker enligt mediets sk. ångtryckskurva. Mot varje tryck svarar en viss temperatur, högre tryck medför högre fasomvandlingstemperatur vilket utgör själva grunden för indunstningsanläggningars arbetsprincip. Genom att lägga effektstegen vid lämpliga trycknivåer kan producerad ånga från ett steg utnyttjas för värmning i efterföljande effekt, därmed sänks totala värmebehovet avsevärt jämfört med att koka bort vattnet i ett enda steg.

Tubvärmeväxlarna är uppbyggda av stående entums släta rör där lösningen transporteras inuti rören medan det värmande mediet återfinns på mantelsidan. Vid uppvärmning av lösningen erhålls en förångning av vatten, dock är absorptionsmediet i vätskefas p.g.a. dess högre kokpunkt kontra vatten. Blandningen av absorptionsmedie och vattenånga leds till ångdomen där de olika faserna separeras tack vare densitetsskillnader, vätskefas mot nederdelen av apparaten medan ångfasen avleds från toppen. Stigfilmsindunstarens steg är tvångscirkulerade för att erhålla tillräcklig kapacitet.

Den utspädda lösningen från absorbatorerna samlas i tank nr 1, se Fig.2. Från denna behållare förvärms lösningen mha ånga (~1 bar(a)) i apparat nr 2 samt via värme från utgående koncentrerad lösning i värmeväxlare nr 3 innan införsel till tredje effektsteget.
I tredje effektsteget värms lösningen till 130°C (nr 4) mha ånga från andra effektsteget . I ångdom (nr 5) avskiljs avkokat vatten vid trycket 1.05 bar(a), lösningen pumpas vidare till andra effektsteget.
I andra effektsteget värms lösningen (nr 6) mha ånga från första effektsteget till 170°C. Separation av förångat vatten sker i ångdom (nr 7) vid trycket 3,5 bar(a). Lösningen förs vidare via två seriekopplade pumpar till värmeapparat (nr 8). I denna apparat förvärms lösningen mha rökgaser innan tillförsel till första effektsteget.
I första effektsteget värms lösningen till 220°C (nr 9) mha rökgaser från en biobränsle eldad panna. Liksom tidigare effektsteg avskiljs avkokat vatten från lösningen i ångdom (nr 10) vid trycket 10 bar(a).
Efter dessa tre effektsteg har lösningen systemets högsta tryck och temperatur. Lösning från första effekten får expandera till apparat nr 11, när trycket sänks kommer även ångtryckstemperaturen att sänkas. Då lösningen har en högre temperatur kommer överhettningsvärmet att utnyttjas för avkokning av vatten (flashning). Den bildade ångan leds till andra effektstegets ångdom (nr 7), 3.5 bar(a). En ytterligare expansion sker i flashtank nr 12 där bildad ånga leds till tredje effektstegets ångdom (nr 5), 1.05 bar(a). Slutligen samlas den koncentrerade lösningen i buffertank nr 13. Lösningen från denna behållare pumpas via rörvärmeväxlare (nr 3) ut till respektive absorbator.



Figur 2. Indunstningsanläggning.
Figure 2. Evaporation plant.

Ånga från tredje effektsteget samt ej kondenserad ånga i värmeapparat nr 2 utnyttjas för produktion av varmvatten i tubvärmeväxlare (nr 14, 15). Utgående varmvatten utnyttjas för uppvärmning av lokaler inom fabriksområdet.

Kondensatet uppsamlas i behållare nr 16 innan det pumpas till en virkestork för uppvärmning av processluften, därefter vidare till biobränsletorken varefter det avleds från systemet.

2.1.1 Funktionsbeskrivning

Nivåmätare i behållare nr 13 styr flödet av absorptionslösning till/från anläggningen. Vid stigande nivå ökar flödet av koncentrerad absorptionslösning från indunstaren, om nivån ej sjunker till börvärdet regleras inmatningsflödet ner via strypning av flödet från behållare nr 1.

Flödet från respektive effektsteg styrs via nivågivare installerad i ångdom samt styrventil på rörledning till efterföljande effekt. Vid stigande nivå ökar flödet från effektsteget. Liknande regleringsfilosofi utnyttjas i flashsteg nr 11.

Rökgasmängden till anläggningen styrs via temperaturgivare placerad i rörledning till tank nr 13. Vid temperaturer under börvärdet (140°C) ökar bränsleinmatningen. Lösningens koncentration kan bestämmas via dess temperatur, en ökad temperatur indikerar en högre saltkoncentration.

Kondensatet från anläggningen regleras via nivågivare i tank nr 16 samt styrventil på utgående ledning.

2.1.2 Säkerhetsfunktioner.

Rökgastemperaturen till första effektsteget maximeras till 650°C via temperaturgivare i rökgasledning till apparat nr 9, vid förhöjd temperatur ökas lufttillförseln till pannan.

Tryckvakt installerad på ångledning från första effektsteget bryter bränsleinmatningen om trycket överstiger dimensioneringstryck, 11 bar(a).

Torrkokningsskydd bryter likaså bränsleinmatning om vätskenivå i rörledning mellan första effektens ångdom och värmeapparat försvinner.

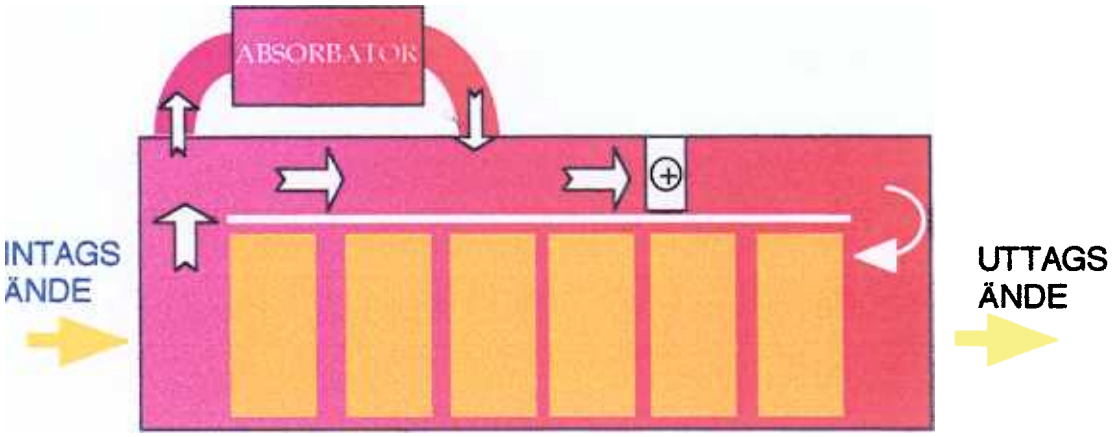
För att undvika saltförlust från anläggningen mäts konduktiviteten i utgående kondensat kontinuerligt. Vid förhöjd ledningsförmåga (över inställt gränsvärde) ändras kondensatflödet mha styrventiler så att hela kondensatflödet återförs till tanken för utspädd absorptionslösning nr 1.

2.2 Virkestorkar

Totalt är fyra längdcirkulationstorkar knutna till systemet, tre plankkanaler samt en brädkanal. Samtliga torkar fungerar på likvärdigt sätt, endast avdunstningskapaciteten skiljer dem åt. I torkarna för plank avskiljs max 500 kg/h vatten medan brädkanalen är utlagd för max 875 kg/h.

Karakteristiskt för längdcirkulationstorkar är att klimatet i torken hålls konstant, träpaketen passerar från ena sidan, intagsänden, till den andra, uttagsänden. Klimatet som de sågade trävarorna utsätts för går från ett fuktigt klimat vid intagsänden till ett torrt klimat vid uttagsänden. Genomloppstiden för trästaplarna är 7 dygn.

Luften vid uttagsänden styrs till ett konstant tillstånd, torr temperatur +60°C och våt temperatur +50°C, dvs en relativ luftfuktighet på ca 60%RH. Vid för hög våt temperatur evakueras ett större flöde från torken, den torra temperaturen styrs med hjälp av värmebatteriväggen. Vid intagsänden är luftfuktigheten mycket nära mättat tillstånd.

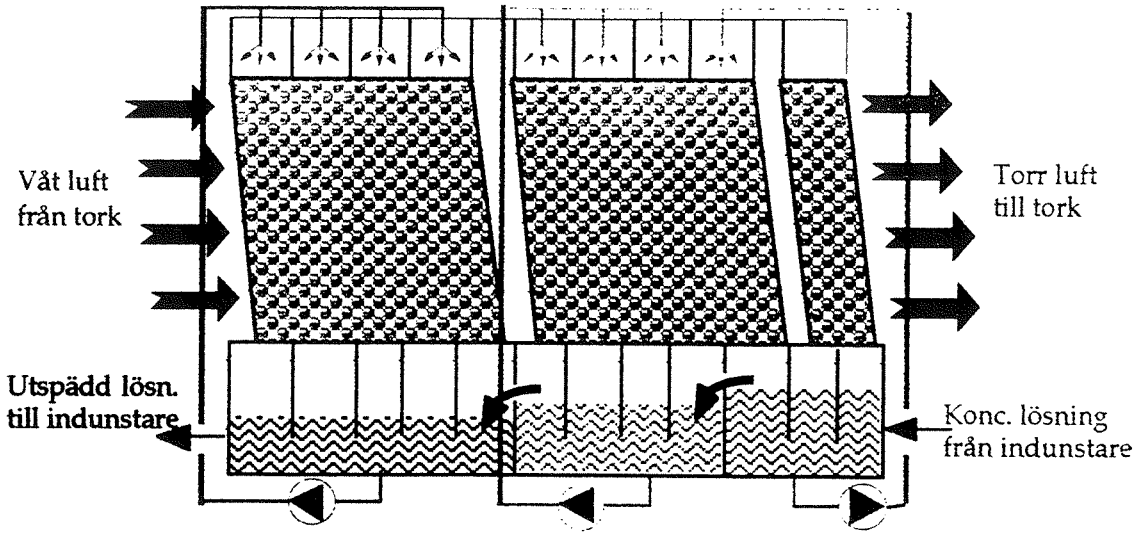


Figur 3. Virkestork med inkopplad absorbator.
Figure 3. Wood dryer with an installed absorber.

Vid inkoppling av det öppna absorptionssystemet tas ett delflöde (~1/3) av den våta luften från intagsänden till absorbatorn. Detta flöde torkas vid passage genom absorbatorn innan det inblandas med recirkulationsflödet i torken. Uteluftflödet upphör helt eftersom vattnet från trädelarna upptas av absorptionslösningen. Detta medför att värmebehovet i torken minskas till 10-20% jämfört med utnyttjandet av evakueringsluft för bortförandet av vattnet [3].

2.2.1 Absorbator

Fyllkropsabsorbator av tvärströmstyp utnyttjas i samtliga absorbatorer förutom till brädtorken där en motströmstyp är installerad.
Lösningens strömningsriktning kontra gasens har gett den aktuella typen dess namn, tvärströmsabsorbator. Fyllkropparna består av rosettliknande kroppar av typen TELPAC i tvärströmsabsorbatorerna. I Motströmsabsorbatorn används packning, Mellapac 125Y, tillverkad av SULZER.



Figur 4. Tvärströmsabsorbator med fyllbädd.
Figure 4. Cross-current packed bed absorber.

Absorbatorns bottendel utgör behållare för absorptionslösningen. Från tråget pumpas lösningen upp till dysor placerade ovan fyllbädden vars uppgift är att jämnt vätskebegjuta hela fyllbädden.

Lösningsflödet går vertikalt medan luften passerar genom absorbatorn horisontellt. För att erhålla största möjliga koncentrationsgradient drivs vätskeflödet i motström mot luftflödet, dvs den mest utspädda lösningen kommer i kontakt med den fuktigaste luften. Koncentrerad lösning från indunstaren tillförs absorbatorns slutsteg (utgående luftsida). Från denna trågdel bräddar lösningen till absorbatorns intagsdel (inkommande luftsida) och därifrån pumpas utspädd lösning tillbaka till indunstaren.

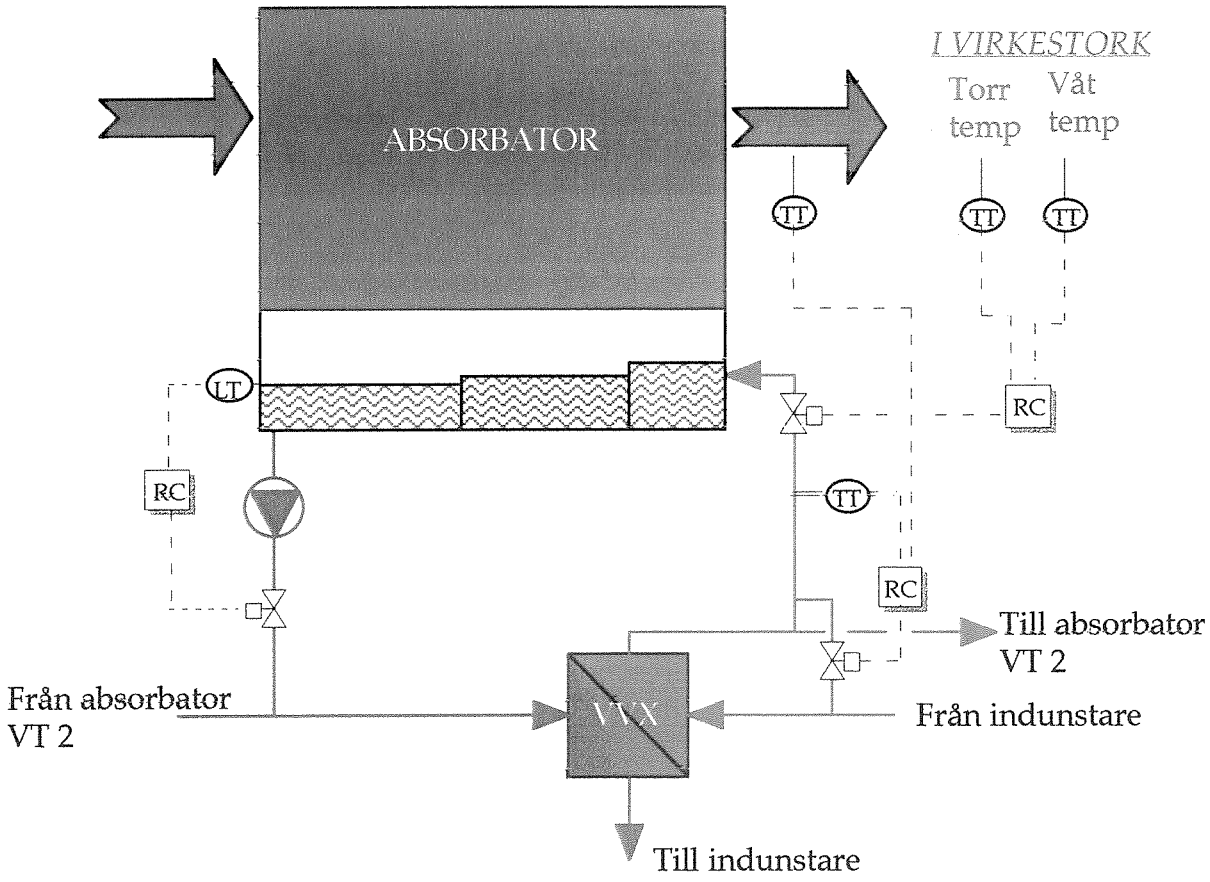
Fyllbädden består av ett stort antal fyllkroppar vars uppgift är att skapa en god kontakt mellan vätska och gas. Fyllkroppen skapar ett stort antal av störpunkter där vätskedropparna samlas och sedan slås sönder i nya fräscha droppar. Kantigheten hos fyllkroppens filament ger en intensiv omblandning och kortare tid för nyskapande av kontaktytan.

För att undvika att vätskedroppar dras med den utgående luften avslutas absorbatorn med en vätskeavskiljare (demistor). Demistorsteget består i detta fall av en fyllbädd som ej vätskebegjuts. Tröghetskrafter gör att eventuella vätskedroppar träffar fyllkropparna och därmed avskiljs ur utgående luftström.

Eftersom fyllkropsbäddar har relativt lågt tryckfall måste gasflödet redan innan inträdet i fyllbädden vara jämnt fördelat. I annat fall kan absorbatorns effektivitet sjunka markant.

2.2.2 Funktionsbeskrivning

Konstant differens mellan torr och våt temperatur i torken upprätthålls med hjälp av flödet av koncentrerad lösning till absorbatorn. Om differensen minskar ökar flödet av lösning från indunstaren till absorbatorn, därmed ökar koncentrationen hos lösningen i absorbatorn vilket leder till en ökad fukttransport från luften till lösningen. En nivåmätare konstanthåller nivån av vätska i absorbatorns första steg. Vid stigande nivå ökar flödet av lösning till indunstaren.
För att erhålla adiabatisk absorption styrs temperaturen på det koncentrerade lösningsflödet till absorbatorn så att den överensstämmer med utgående luftflödes temperatur. Om vätsketemperaturen understiger lufttemperaturen leds ett delflöde förbi värmeväxlaren varvid vätsketemperaturen stiger.



Figur 5. Reglering av torkklimatet, fuktreglering.
Figure 5. Regulation of the climate in the dryer.

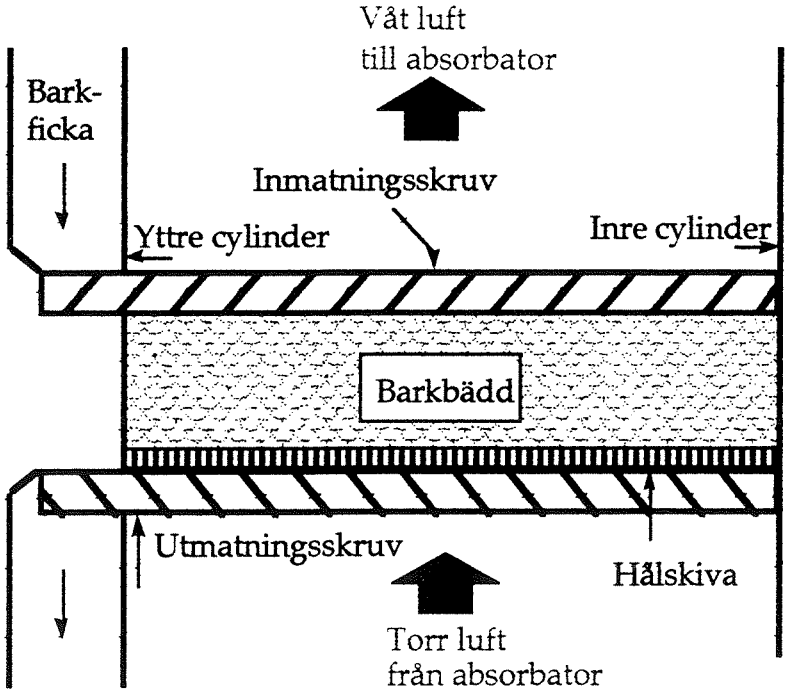
Två värmeväxlare (vvx) är installerade, en för virkestork 1 och 2 samt en vvx för virkestork 3 och 4. Regleringen för respektive absorbator följer ovanstående beskrivning. För virkestork 4 har en enstegs motströmsabsorbator installerats. Koncentrerad lösning tillförs ovan packning samt återförs till indunstare efter passage genom bädden.

2.3 Barktork

Bark och trädelar från sågverk samt en trädelsterminal samlas i stack före biobränsletorken. Från denna transporteras materialet via stockermatning till en hammarkvarn. Bränslet delas i fraktioner med ett maximalt längdmått på 50 mm samt transporteras via elevatorer och skruvar till själva torken. Fuktig bark är ett mycket svårt material att handha p.g.a. varierande beteende vid olika densiteter. Beroende på årstid samt växtplats varierar fuktinnehåll och förmågan att sammanväva stycken av bark. Transporten från uppsamlingsstack till tork kräver därför en ordentlig design för att undvika driftstörningar vid framtida produktion. Det torkade materialet från tork till utlastningssilo bereder betydligt mindre problem.

2.3.1 Funktionsbeskrivning

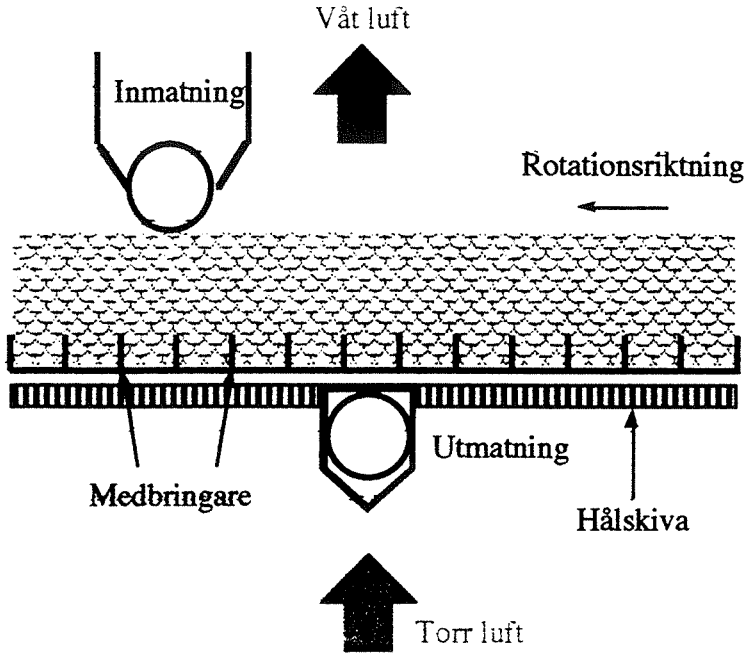
Barktorken är en cirkulär bäddtork av motströmstyp. Barkbädden roterar på en hålskiva placerad mellan två cylindrar. Rotationshastigheten uppgår till 0.4-0.5 varv/h och barkbäddens höjd är 800 mm. Torr luft tillförs underifrån och strömmar uppåt genom bädden med en hastighet av 0.6 m/s och tar på detta sätt upp fukt från barken, se Fig. 6.



Figur 6. Luftflöde i biobränsletork.
Figure 6. Air flow in bio-fuel dryer.

Den våta barken läggs på bädden med hjälp av en radiell skruv. Den torra luften tillförs underifrån vilket medför att det i barkbädden uppkommer skikt med olika torrhalter. Längst upp våt bark och längst ned torr bark. Den torkade barken matas ut med hjälp av en radiell skruvmatare placerad i hålskivan. Genom detta förfarande går barken i motström till luftflödet.

På hålskivan är skenor placerade, på vilka ett antal medbringare vilar. Detta medbringarsystem används för att åstadkomma rotation av barkbädden, se Fig. 7. Uppehållstiden i torken är ca: 6-7 timmar vilket medför att materialet cirkulerar 4 varv innan önskad torrhalt uppnås. Det torkade bränslet transporteras via skruvar och elevatorer till bränslesilo för vidare transport till avnämare.



Figur 7. Tillförsel resp. utmatning av bark.
Figure 7. Supplied and rejected bio-fuel.

2.3.2 Absorbatorn

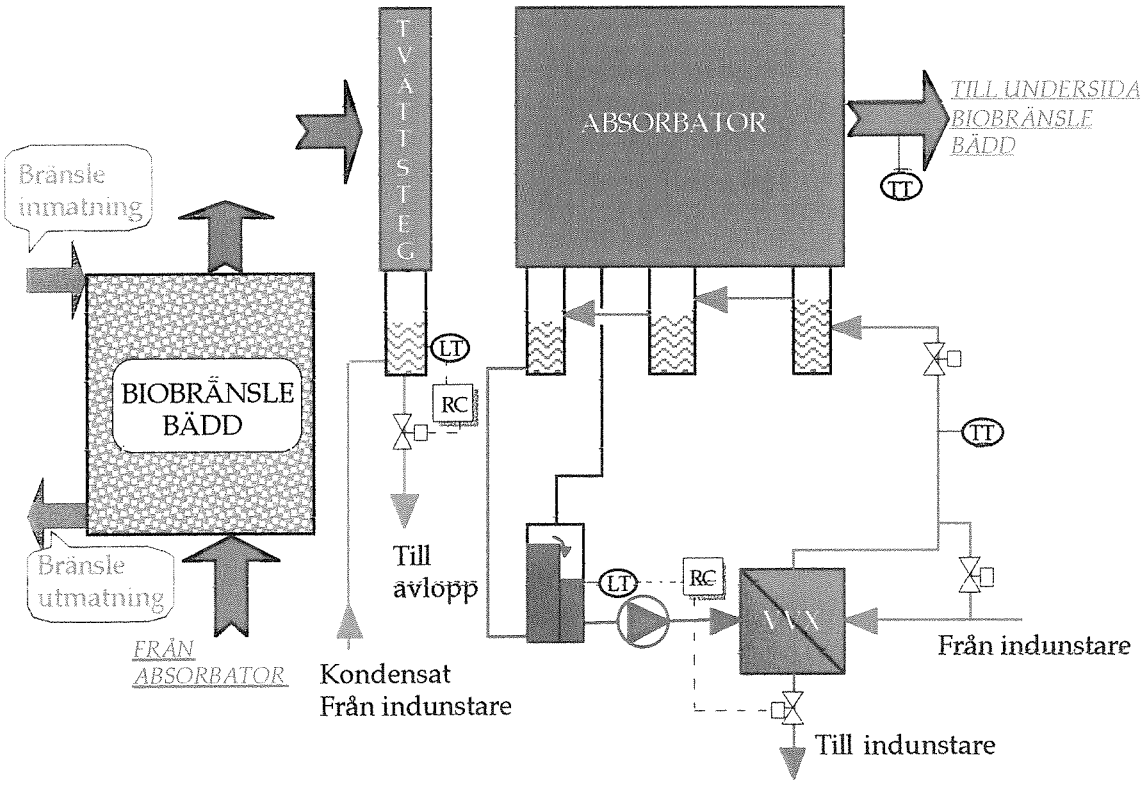
Även i detta fall är absorbatorn av tvärströmstyp. Speciellt för absorbator till biobränsletork är att vätskebegjutningen av fyllbädden sker med hjälp av perforerade plåtar istället för dysor. Därmed sänks den erforderliga tryckuppsättningen för pumparna markant. För att minska vätskevolymen hos absorbatorn har tråget i botten ersatts av rör för uppsamling av absorptionslösning, ett rör för varje steg. När anläggningen är avstängd medför detta att lösning stiger upp i fyllbädden. Denna nivå sjunker tillbaka i röret då anläggningen tas i drift. För flöde av lösning mellan stegen utnyttjas separata rör.

Absorbatorprincipen togs ursprungligen fram för rening av gasflöden. För en biobränsletork där luftflödet otvetydigt kommer att innehålla fasta partiklar, kommer dessa av avskiljas från luften vid passage genom absorbatorn. Antingen renas själva absorptionslösningen eller avskiljs den fasta fraktionen från gasflödet före kontakt med absorptionslösningen. Hos Martinson har det senare fallet valts.

För att avskilja de barkpartiklar som följer med luftströmmen från torken har ett tvättsteg före absorbatorn införts. Även detta består av en fyllbädd som tillförs kondensat från indunstaren, se Fig. 8. Kondensatet har kylts i värmebatterierna för en virkestork ej ansluten till absorptionssystemet varför dess temperatur vid tvättsteget håller 40-50°C. Från tvättsteget bortförs kondensatet från systemet.

2.3.3 Funktionsbeskrivning

För att alltid erhålla en jämntjock och fylld biobränslebädd i torken sker tillförseln med ett visst överskott samt styrs av nivågivare placerad vid inre cylinder. Vid indikering av nivågivare upphör inmatning från stack. Anläggningen körs med full last vid produktion varför regleringen inskränker sig till att uppnå konstanta förhållanden vad avser vätskenivåer i behållare för utspädd absorptionslösning samt nivå i tvättsteg.
Flödet av koncentrerad lösning till absorbatorns sista steg är konstant (5700 m^3/h). Lösningen breddar mellan de olika stegen för att slutligen uppsamlas i vätskebehållare före återförsel till indunstare,se Fig. 8. Nivån hålls konstant via nivågivare samt styrventil vid VVX. Behållaren är delad i två enheter, lösningen måste bredda från den ena delen till den andra före transport till indunstaren detta för att eventuella partiklar i lösningen skall sedimentera i behållaren och ej föras till indunstaren. Konstant nivå i tvättsteget erhålls likaså mha nivågivare och styrventil.
Inget värme tillförs anläggningen förutom via elmotorer samt via vätskeflöden.



Figur 8. Biobränsletork inklusive reglering.
Figure 8. Bio-fuel dryer with regulation.

2.4 Erfarenheter från drift

Anläggningen utgör en prototyp och demonstrationsanläggning (PoD) av en ej tidigare prövad teknik i full skala. Ombyggnationer och förändringar från det ursprungliga konceptet har genomförts för att erhålla ett fungerande system. Anläggningen har hög tillgänglighet och varit i drift ca 8000 h per år, endast avstängd under semesterunderhållet. I det följande avsnittet beskrivs driftserfarenheter från anläggningen hos Martinson vilka är avgörande för att erhålla ett kommersiellt användbart system.

2.4.1 Indunstningsanläggning

Värmetillförseln sker via varma rökgaser från en biobränsleeldad ugn. För att kunna hålla nere avgastemperaturen dvs för att upprätthålla en effektiv värmetransport, är sotning av värmeöverförande ytor nödvändigt. Sotning med infraljud åstadkommet med hjälp av tryckluft och styrd till korta men relativt ofta återkommande tidsintervall har visats ge önskad effekt.
En indunstningsanläggning är av sin natur en relativt stabil och trög anläggning. Till indunstaren är fem olika absorbatorer kopplade, varav fyra betjänar virkestorkar. Då dessa torkar växlas (nya virkespaket insätts) i princip samtidigt erhålls en svängning i indunstarens arbetsgång. Dessa fakta samt trögheten i förändringen av värmetillförseln till indunstaren gör det nödvändigt att installera bufferttankar för lösningsflödet in/ut från anläggningen.

För att höja indunstarens kapacitet har i ett senare skede tvångscirkulation installerats för respektive effektsteg. Vidare har flashning i två steg samt förvärmning av lösningen före första effektsteget införts. Anläggningen är ombyggd från det ursprungliga konceptet och därför ej fullständigt optimerad.

Pneumatiska ställdon är att föredra för styrventiler i indunstaren. Försök med elektriska ställdon gav problem vad avser ställkrafter, kraftmatning, mm. Nivåmätare i respektive ångdom har likaså varit ett problemområde. Statiska övertrycket i systemet tas ut via extra anslutning mot ångsidan, för detta stående rör måste vid projekteringen en eventuell frysrisk beaktas.

Kristallisation i rör mellan indunstare och absorbatorer går att undvika genom att späda ut lösningen före ett längre planerat stopp. Koncentrationssänkningen åstadkommes genom att stänga av värmetillförseln samt fortsatt drift av absorbatorerna under ett antal timmar. Det är dock fördelaktigt att förlägga kulvert med lutning för avtappningsmöjlighet vid oplanerade stopp.
Erfarenheter visar också att rostfritt material skall användas för samtliga ingående detaljer såsom pumpar ventiler mm. Detta gäller för systemet i helhet.

Tätning av pumpaxel med hjälp av mekaniska tätningar, typ Chesterton har visat sig fungera. Vid en nyprojektering bör dock eventuella billigare alternativ undersökas.

2.4.2 Virkestorkar

För att ej dra in kall uteluft vid torkväxling stoppas fläkt vilken svarar för luftflödet genom absorbator. Detta får till följd att lösningen strömmar helt vertikalt genom fyllbädden. Under drift skapar luftströmmen en förskjutning av vätskeflödet i luftströmmens riktning. Denna skillnad måste beaktas vid placering av nivågivare samt design av absorptionsstegen för att undvika en blandning av de olika lösningskoncentrationer som byggs upp under drift. Minimering av lösningsmängden genom att ersätta trågen i botten med enkla rör har visat sig fungera.

Brädpaketen i torken har varierande längd varför luften lättare passerar utefter torkens sidor. Därmed erhålls högre gashastigheter i dessa regioner. Delflödet som leds till absorbatorn kommer att uppvisa samma hastighetsfördelning. Eftersom tryckfallet genom absorbatorn är lågt måste en jämn hastighetsprofil skapas före absorbatorn för att effektiviteten skall upprätthållas.

2.4.3 Biobränsletork

Inmatning av rått material från stack till tork kräver en noggrann och genomtänkt planering. För att undvika många praktiska problem måste intagsdelen till torken projekteras på ett korrekt sätt. Stockermatning har visat sig vara en möjlig väg att erhålla en jämn transport av material från stacken. Det torkade materialet från tork till upplag fungerar betydligt enklare och har hos Martinson ej varit något större problem.

Nivåmätare som skall styra transport av material bör ha möjlighet att påverka flödet med så kort dödtid som möjligt för att undvika transportproblem. I befintlig anläggning är avståndet mellan givare och skruvmatning som stoppar flöde av råbark till tork för långt.

Barkdammet som genereras utgör ett problem. Finfraktioner tas bort via ett tvättsteg som försörjs med kondensat från indunstaren. För att undvika en fukttillförsel till luften måste vattentemperaturen överensstämma med aktuell torklufts temperatur, vidare måste luften från barkbädd vara mättad med fukt. Vid en undertemperatur på vattnet tas värme från torkluften. En övertemperatur medför att vatten och värme tillförs luftflödet. Vidare måste upptaget barkdamm separeras från vätskeflödet innan det avleds från systemet. Tvättstegets botten skall luta kraftigt mot avloppet, detta för att underlätta renspolning av barkdamm.

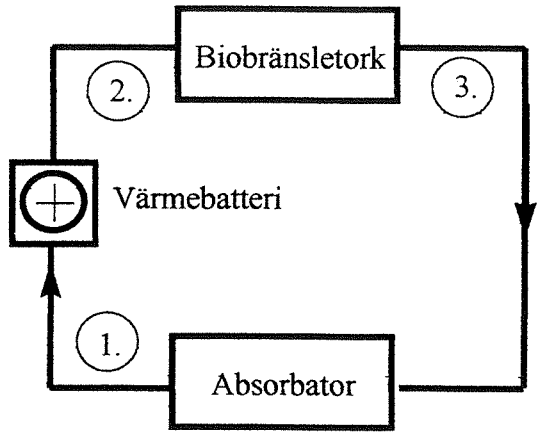
Eventuella barkpartiklar som följer med torkluften till fyllbädden med absorptionslösning kommer att avskiljas i denna. Ett filter på vätskeflödet från biobränsletorken till indunstaren måste installeras för att undvika problem. Erfarenheter visar att bark i lösningen skapar problem i form av igensatta dysor vid absorbatorerna samt skumningsproblem. Filtrering av lösningen bör även installeras vid indunstaren för att ta bort eventuella partiklar som följer med från samtliga absorbatorer.

Fyllkropparna (polypropen) sjunker ihop varför viss återfyllning av bäddar krävs. Detta utgör inte något större problem men bör beaktas vid beställning av fyllkroppar. När fyllbädden sjunker ihop minskar porositeten vilket kan ge upphov till ett ökat tryckfall. Någon nämnvärd ökning av tryckfallet har dock inte observerats vid Martinsons.

Lösningsförlusten från systemet är ca 25 kg salt per vecka. Under denna tid är totala luftflödet genom samtliga absorbatorer ca 76.5 miljoner kubikmeter. Från försök i laboratorium samt mätningar i fält har medryckningen av salt uppskattats till motsvarande värde [1].

3 BERÄKNINGAR

Vid beräkningar på biobränsletorken och absorbatorn har en modell enligt figur 9 upprättats. I befintlig anläggning tillförs endast värme via installerade apparater, dvs pumpar och fläktar. Värmetillförseln har vid beräkningar ersatts av ett värmebatteri där värme tillförs. Detta värme skall täcka förluster från torken samt tillgodose uppvärmning av barken. Luften cirkuleras mellan biobränsletork och absorbator vilket medför att det vatten som bortförs från barkbädden återfinns i saltlösningen ut från absorbatorn.



Figur 9. Skiss över biobränsletork och absorbator.
Figure 9. Bio-fuel dryer and absorber.

Då vattenångans partialtryck är lågt kan vattenångan betraktas som en ideal gas vilket medför att allmänna gaslagen kan tillämpas på vattenångan och luften [5]. Vattenångans partialtryck P_v beräknas per definition enligt

$$\Phi = \frac{P_v}{P_s} \qquad [1]$$

Absoluta vatteninnehållet (kg vatten/kg torr luft) samt värmeinnehållet (kJ/kg torr luft) kan med hjälp av allmänna gaslagen beräknas enligt

$$x = \frac{M_v}{M_l} \cdot \frac{P_v}{(P_{tot} - P_v)} \qquad [2]$$

$$h_l = c_{p,luft} \cdot t + x \cdot \left(r + c_{p,ånga} \cdot t\right) \qquad [3]$$

Då luftens tillstånd är känt, det vill säga absolut vatteninnehåll, temperatur och entalpi kan erforderligt torrt luftflöde över tork och absorbator för en bestämd torkkapacitet ($\dot{m}_{avd}$) beräknas enligt

$$\dot{m}_{torr} = \frac{\dot{m}_{avd}}{\Delta x} \qquad [4]$$

Densiteten för ett kg torr luft kan med hjälp av allmänna gaslagen tecknas enligt

$$\rho_{torr} = \frac{m_l}{V} = \frac{P_v}{x \cdot R_v \cdot T} \qquad [5]$$

Eftersom massflödet torr luft är konstant genom processen kan volymflödet fuktig luft i de olika delarna beräknas enligt

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{torr}}{\rho_{torr}} \qquad [6]$$

3.1 Biobränsletorken

Energibalanser över biobränsletorken beskrivs enligt (beteckningar se Fig.9)

$$\dot{Q}_{konv} = \dot{m}_{torr} \cdot \left(h_{l,2} - h_{l,3}\right) \qquad [7]$$

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha \cdot A \cdot \left(\bar{t}_{luft} - \bar{t}_{bark}\right) + \dot{Q}_{trans} \qquad [8]$$

$$\dot{Q}_{bark} = \dot{m}_{bark} \cdot c_{p,bark} \cdot \left(t_{bark,ut} - t_{bark,in}\right) \qquad [9]$$

Värmekapaciteten för barken beräknas på A% torr substans enligt

$$c_{p,bark} = A \cdot c_{p,torr,bark} + (1 - A) \cdot c_{p,h2o} \qquad [10]$$

I dessa ekvationer antas värmeöverföringstalet och den värmeöverförande ytan vara konstant. Värdet av produkten $\alpha \cdot A$ har beräknats utifrån uppmätta parametervärden vid referensfallet till 3,24 kW/K. Värmeöverföringstalet är i praktiken temperaturberoende men har vid dessa beräkningar antagits vara konstant.

Även massflödet bark samt specifika värmekapaciteten har ansatts konstanta samt lika med referensfallet. Värdet av produkten $\dot{m}_{bark} \cdot c_{p,bark}$ har utifrån referensfallet beräknats till 1,12 kW/K.
I ekvation 8 avser temperaturer medelvärden av ingående och utgående strömmar.

Av det värme som avges i biobränsletorken antas 10 % försvinna i form av transmissionsförluster och läckage[3]. Resterande del åtgår till uppvärmning av barken varför

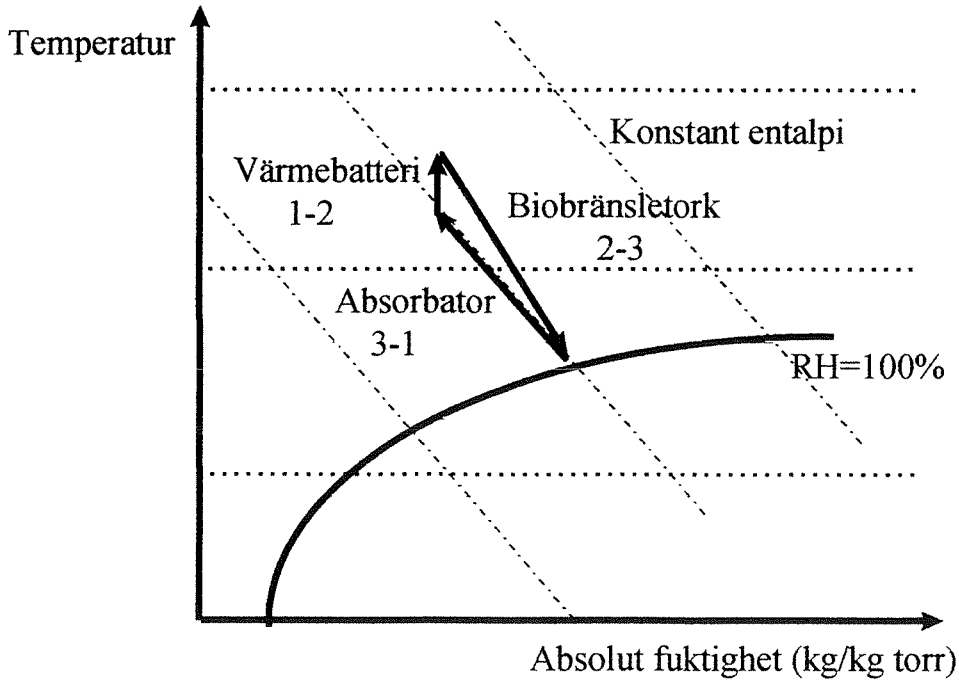
$$\dot{Q}_{bark} = 0{,}9 \cdot \dot{Q}_{konv} \qquad [11]$$

Tillförd värmeeffekt till batteriet beräknas enligt

$$P_{batteri} = \dot{m}_{torr} \cdot \left(h_{1,2} - h_{1,1}\right) \qquad [12]$$

3.2 Absorbatorn

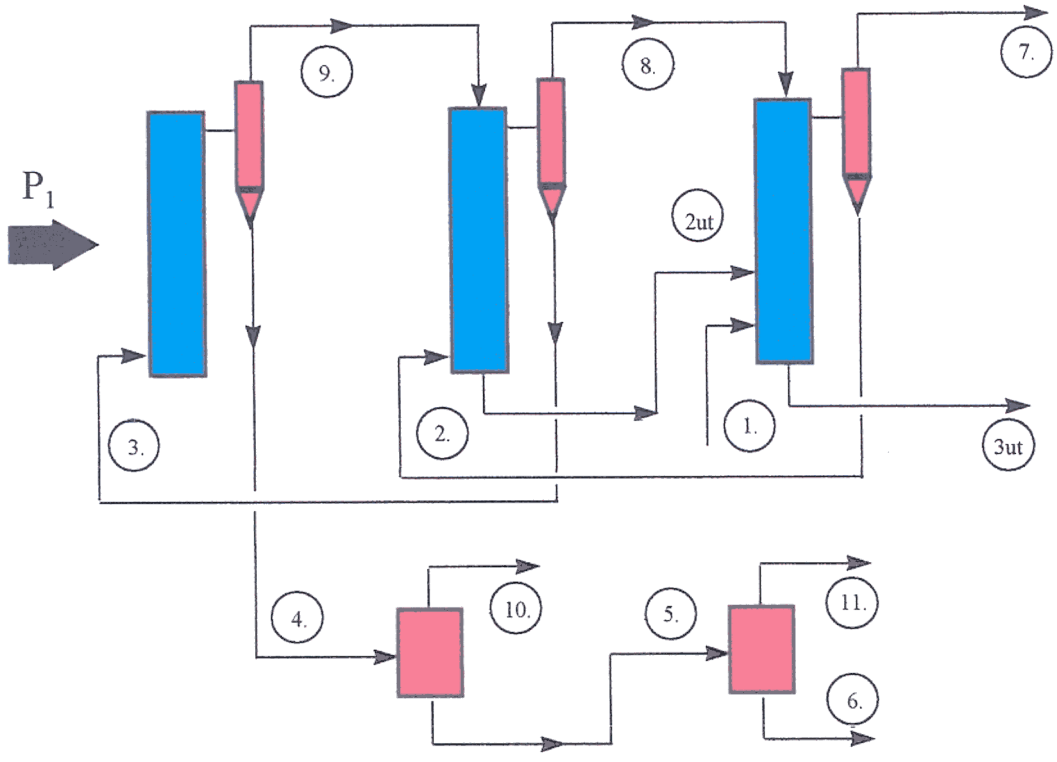
Absorptionen sker under i stort sett adiabatiska förhållanden. Det medför att den fuktiga luftens entalpi är konstant under passage genom absorbatorn. Eftersom den fuktiga luftens absoluta vatteninnehåll minskar kommer därför temperaturen att öka i processen 3-1 (se figur 10). Saltlösningens värmeinnehåll är också i stort sett konstant varför dess temperatur sjunker under absorptionen.
Ett stort antal experiment utförda vid energitekniks experimentanläggning vid Luleå tekniska universitet visar ett isentalpiskt förlopp under absorptionsprocessen[1]. Simuleringar av processen i beräkningsprogrammet CFX där mass och värmetransporter matematiskt beskrivs separat uppvisar absorption vid i stort sett konstant entalpi. Detta förutsatt att absorbatorn är så pass stor att jämvikt hinner ställa in sig.[7]



Figur 10. Luftens tillståndsförändringar i Mollierdiagram.
Figure 10. The pathways illustrated in a Mollier diagram.

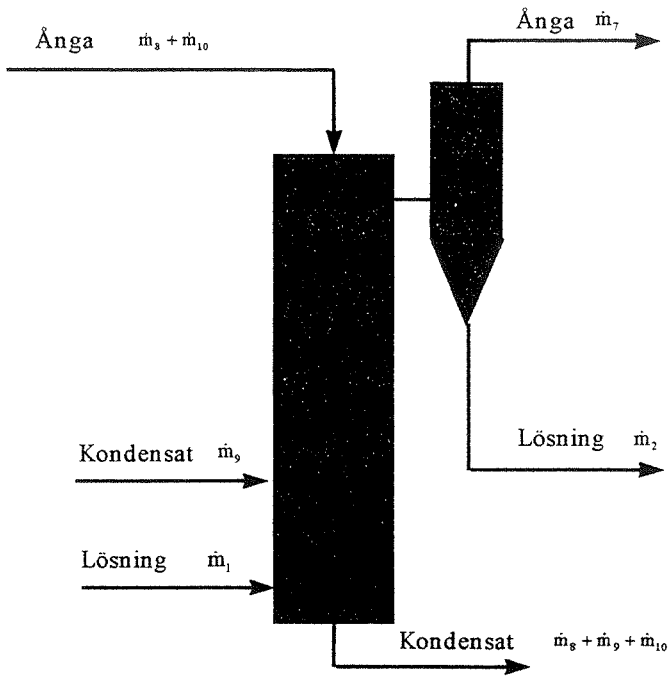
3.3 Indunstningsanläggningen

Vid beräkningar på indunstningsanläggningen delas processen upp med beteckningar enligt figur 11. Lösningsflöden (1-6) och ångflöden (7-11).



Figur 11. Skiss över indunstningsanläggningen med beteckningar.
Figure 11. Evaporation plant with indexes.

Energibalans och massbalans upprättas för respektive del i anläggningen. Figur 12 visar en skiss över det tredje effektsteget.



Figur 12. Skiss över tredje effekten i indunstaren.
Figure 12. Third effect in evaporation plant.

Till tredje effekten tillförs lösning ($\dot{m}_1$) samt ånga från föregående effektsteg ($\dot{m}_8$) och första flashtanken ($\dot{m}_{10}$). Dessutom tillförs kondensat (2ut) från föregående effekt. Ut från tredje effekten går lösning vid en högre koncentration ($\dot{m}_2$) samt avkokad mängd ånga ($\dot{m}_7$). Den tillförda ångan bortförs i form av kondensat ($\dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}$). Energibalans och massbalans för tredje effekten beskrivs enligt

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_7 \qquad [13]$$

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_9 \cdot h_{2ut} = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_7 \cdot h_7 + (\dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}) \cdot h_{3ut} \qquad [14]$$

I första effekten tillförs ingen ånga utan värmet tillförs i form av varma rökgaser från pannan. Den tillförda effekten från rökgaserna betecknas (P_1) och energibalans respektive massbalans beskrivs enligt

$$P_1 = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_9 \cdot h_9 - \dot{m}_3 \cdot h_3 \qquad [15]$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_9 \qquad [16]$$

Energibalanser och massbalanser för andra effekten samt de två flashtankarna beskrivs enligt

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_9 \cdot h_9 = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_9 \cdot h_{2ut} \qquad [17]$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_8 \qquad [18]$$

$$\dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} \quad [19]$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_{10} \quad [20]$$

$$\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad [21]$$

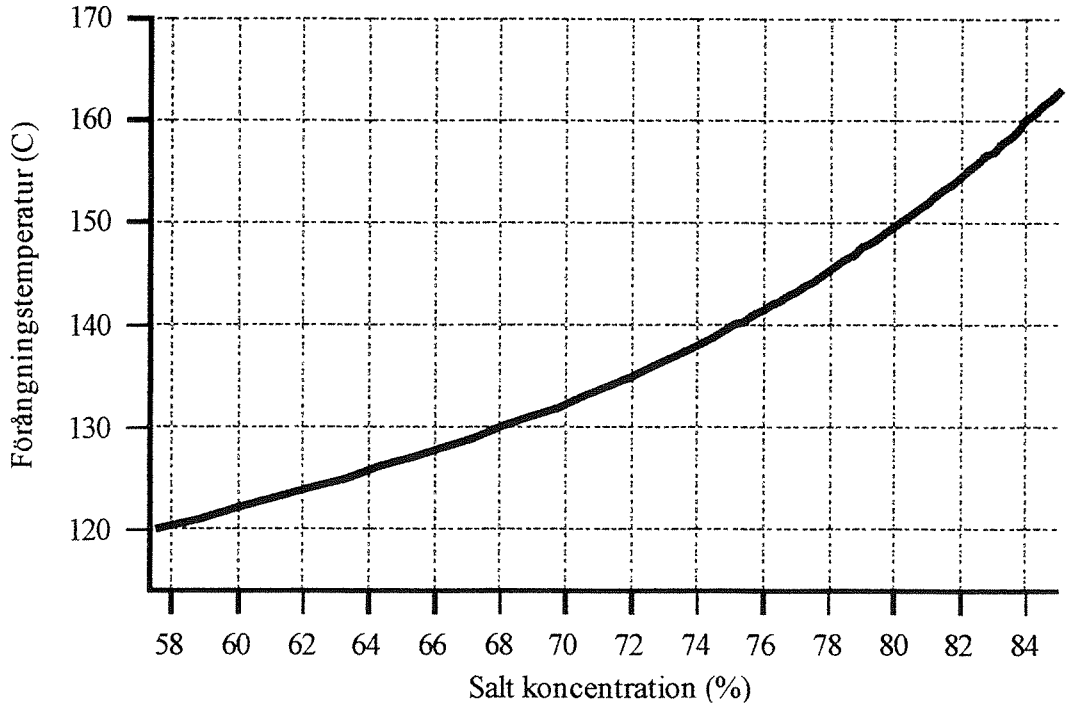
$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{11} \quad [22]$$

Ekvationssystemet, (ekv. 13-22), består av 10 ekvationer och 12 obekanta varför det måste lösas genom att två variabler ansätts. De parametrar som är enklast att variera är tillförd effekt (P_1) samt tillfört lösningsflöde ($\dot{m}_1$).

Beräkningarna utförs under ideala förhållanden vilket medför att värmeförluster bortses ifrån. Ingen hänsyn tas till indunstningsanläggningens design, vilket medför att de olika effekternas värmeöverföringstal samt värmeöverförande ytor (U·A) bortses ifrån, då överfört värme enbart beräknas med hjälp av tidigare beskrivna energibalanser.

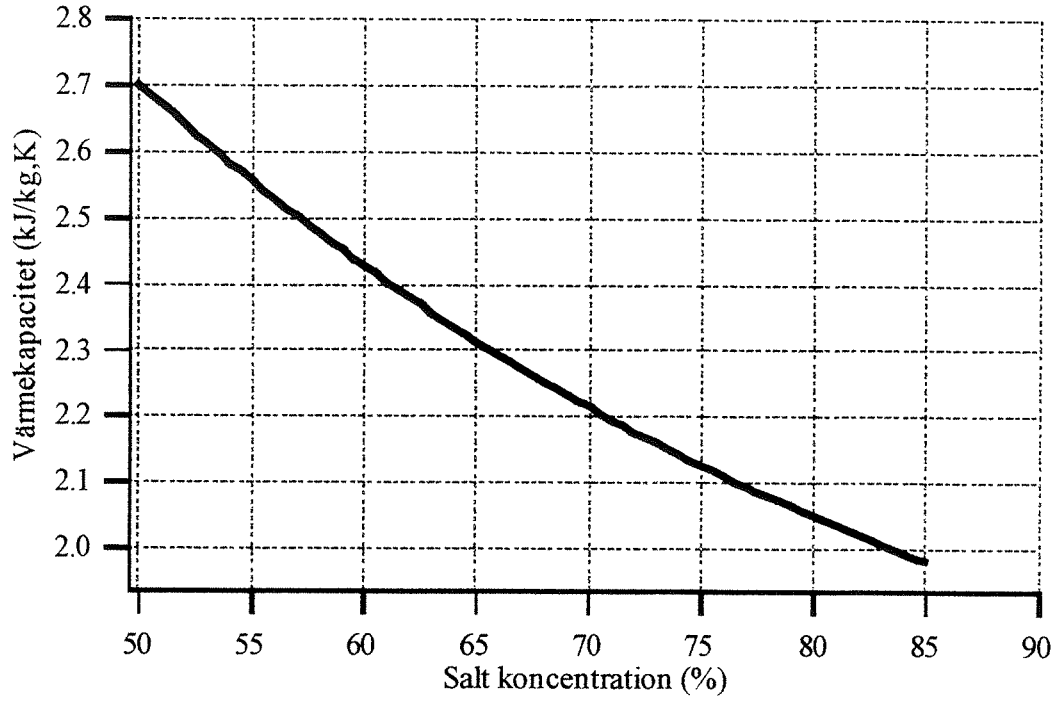
Värmeväxlaren som värmer ingående lösning inkluderas ej i beräkningarna. Indata sätts på lösningen in till första effektsteget ($\dot{m}_1$).

Kokpunktsförhöjningen är beroende av saltlösningens koncentration.
Förångningstemperaturen vid trycket 1 bar(a) beskrivs enligt figur 13.[8]. Kurvan bygger på mätdata för saltkoncentrationer upp till 75 viktsprocent och har extrapolerats för högre koncentrationer.



Figur 13. Förångningstemperatur för saltlösningen vid trycket 1 bar(a).
Figure 13. Boiling-point temperature for absorption solution at pressure 1 bar(a).

För högre tryck har antagits att kurvan parallell förskjuts uppåt vilket medför att kokpunkts förhöjningen är konstant medan förångningstemperaturen ökar på grund av ett högre tryck. Parallellförskjutningen uppåt motsvarar den för vatten.
Saltlösningens specifika värmekapacitet (c_p) är även den beroende av saltkoncentrationen och beskrivs enligt figur 14. Funktionen bygger på mätdata upp till koncentrationer på 75 viktsprocent och har extrapolerats för högre koncentrationer.



Figur 14. Specifik värmekapacitet för saltlösningen.
Figure 14. Specific heat for absorption solution.

Entalpin för saltlösningen beräknas enligt

$$h = \int_{tref}^{t} c_{p,lösning} \cdot dt \qquad [23]$$

Specifika värmekapaciteten antas vara konstant med temperaturen och där h=0 kJ/kg vid referens temperaturen $t_{ref} = 0°C$.

Avkokad mängd vatten beräknas genom att flöden $\dot{m}_7$ till $\dot{m}_{11}$ summeras. Det värme som avges från indunstningsanläggningen består av den ånga som avges från sista effektsteget och sista flashtanken. Ångan kondenserar och avger sitt värme till vatten för uppvärmning av fabrikslokalerna. Dessutom kyls kondensatet till ca 60 °C genom att avge sitt värme till vatten som används i tvättsteget hos absorbatorn kopplad till biobränsletorken. Den totala kondensoreffekten beräknas enligt

$$P_{kond} = \dot{m}_7 \cdot (h_7 - h_{ut}) + \dot{m}_{11} \cdot (h_{11} - h_{ut}) + (\dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}) \cdot (h_{3,ut} - h_{kond,ut}) \qquad [24]$$

Koncentration på inkommande lösning har satts till 57,5 viktsprocent enligt referensfallet vilket medför att koncentrationer i respektive delflöde beräknas enligt

$$C_i = \frac{\dot{m}_1 \cdot 0{,}575}{\dot{m}_i} \qquad [25]$$

4 PARAMETERSTUDIE

4.1 Inledning

Anläggningen vid Martinsons trä är inte fullt optimerad. Efter installationen har som tidigare nämnts en del ombyggnationer genomförts, främst av indunstningsanläggningen. Samtliga ingående enheter kan förbättras genom att optimera driftsbetingelserna.

Detta avsnitt behandlar en parameterstudie, gjord för att undersöka olika parametrars inverkan på i anläggningen ingående komponenter. Som jämförelse har ett referensfall som bygger på mätdata vid kontinuerlig drift använts. Beräkningarna har utförts enligt samband i kapitel 3.

Eftersom processen är en sluten cykel där luften cirkuleras varieras en parameter åt gången för att dess inverkan skall klargöras. Övriga parametrar överensstämmer med referensfallet.

4.1.1 Referensfall

Referensfallet bygger på mätvärden från befintlig anläggning. I denna anläggning antas som tidigare nämnts absorptionen ske under adiabatiska förhållanden, dvs luftens entalpi före och efter absorbator är konstant, (h_1=h_3). Övriga mätdata för referensfallet redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Mätdata för referensfallet.
Table 1. Measuring data for the reference case.

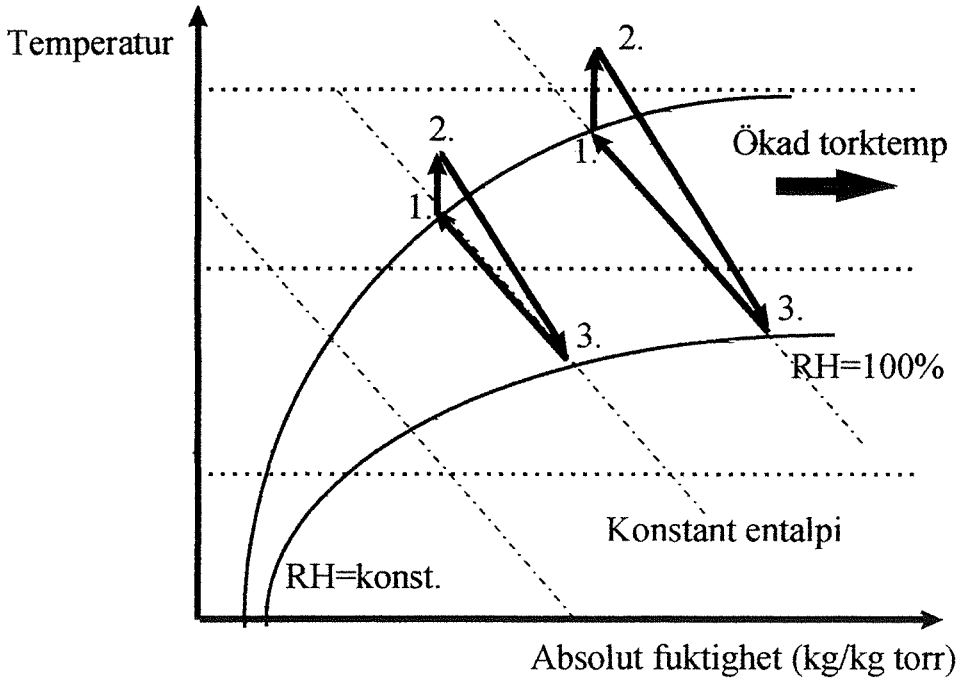
Storhet	Beteckning	
Temperatur före biobränsle tork	t_2	78°C
Temperatur efter biobränsle tork	t_3	48°C
Barktemperatur in till tork	$t_{bark,in}$	0°C
Luftflöde	$\dot{V}_t$	37 Nm^3/s
Koncentration saltlösning	-	72,5 viktsprocent
Relativ fuktighet efter absorbator	Φ_1	23% RH
Relativ fuktighet efter tork	Φ_3	99% RH
Torkkapacitet	$\dot{m}_{avd}$	1872 kgH_2O/h
Biobränsle flöde	$\dot{m}_{bark}$	1925 kg/h
Torr substanshalt ut från tork	-	75% TS
Koncentration ut från indunstare	C_6	75 viktsprocent
Koncentration in till indunstare	C_1	57,5 viktsprocent
Lösnings flöde in till indunstare	$\dot{m}_1$	21060 kg/h
Entalpi in till indunstare	-	251,5 kJ/kg
Indunstnings kapacitet	-	4910 kg/h

4.2 Biobränsletork

4.2.1 Torktemperatur

Genom att höja torktemperaturen höjs även mättnadsångtrycket vilket medför att kapaciteten per kg torr luft förbättras p.g.a. att luften klarar att ta upp en större mängd vattenånga. Detta medför att erforderligt luftflöde genom torken kan minskas. Det som begränsar torktemperaturen uppåt är att luktproblem kan uppstå samt att biobränslets värmevärde försämras vid temperaturer högre än ca. 140°C.

Då torktemperaturen höjs medför detta även att temperaturerna i processens övriga delar ökar. Detta leder till en högre entalpi och absolut vatteninnehåll till följd av att relativa luftfuktigheten ut från absorbatorn är konstant se figur 15.



Figur 15. Luftens tillståndsförändringar i Mollierdiagram vid ökad torktemperatur.
Figure 15. The pathways in a Mollier diagram at increased drying temperature.

I studien har temperaturer in till torken på 70°C till 140°C undersökts.
De parametrar som hålls konstanta vid beräkningarna är relativa luftfuktigheten ut från tork, punkt 3, samt relativa luftfuktigheten ut från absorbatorn, punkt 1. Övriga storheter beräknas.

Vid beräkningar ansätts en temperatur efter torken (t_3), se Fig. 9. Luften ut från torken har antagits vara i det närmaste mättad (99% RH) vilket medför att absolut vatteninnehåll och entalpi i punkt 3 (fig. 9,15) kan beräknas enligt ekvation 1-3.

Absorptionen har antagits ske under adiabatiska förhållanden vilket medför att den fuktiga luftens entalpi förblir konstant genom absorbatorn. Absoluta vatteninnehållet hos luften efter

absorbatorn beräknas med hjälp av ett fjärdegrads polynom där x=f(h). För att minimera avvikelserna har två polynom konstruerats, ett för entalpier mindre än 700 kJ/kg torr luft och ett för entalpier större än 700 kJ/kg torr luft. Dessa polynom har konstruerats genom att absoluta vatteninnehållet beräknats utifrån tabellerade värden för olika entalpier vid konstant relativ luftfuktighet (Φ_1=23% RH) enligt

$$x(h) = -0{,}011816 + 2{,}3809 \cdot 10^{-4} \cdot h + 2{,}9352 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 - 3{,}4804 \cdot 10^{-10} \cdot h^3 + 1{,}5705 \cdot 10^{-13} \cdot h^4 \qquad h<700 \text{ [kJ/kg]} \text{ [26]}$$

$$x(h) = -0{,}02548 + 3{,}4939 \cdot 10^{-4} \cdot h + 4{,}6189 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 - 8{,}9059 \cdot 10^{-13} \cdot h^3 + 6{,}3261 \cdot 10^{-17} \cdot h^4 \qquad h>700 \text{ [kJ/kg]} \text{ [27]}$$

Därmed är absolut vatteninnehåll och entalpi i punkt 1 känt varför temperaturen (t_1) kan beräknas med hjälp av ekvation 3.
Absoluta vatteninnehållet in till torken är det samma som ut från absorbatorn (x_1=x_2) då inget vatten bortförs eller tillförs över värmebatteriet.

Beräkning av lufttemperaturen in till tork (t_2) sker iterativt. Luftens värmeinnehåll före tork (h_2) tilldelas ett uppskattat värde och temperaturen (t_2) beräknas med ekvation 3. Tillförd energi till barken beräknas med ekvation 7 och 10. Därefter beräknas barkens temperatur enligt ekvation 9. Medeltemperaturen hos luften över torken tas fram via ekvation 8 varvid temperaturen (t_2) före tork kan bestämmas. Denna temperatur skall överensstämma med det tidigare beräknade värdet.

Slutligen ändras entalpin tills temperaturen och därmed energibalanserna överensstämmer. Tillståndet i punkt 2 (fig. 11) är därmed bestämt.

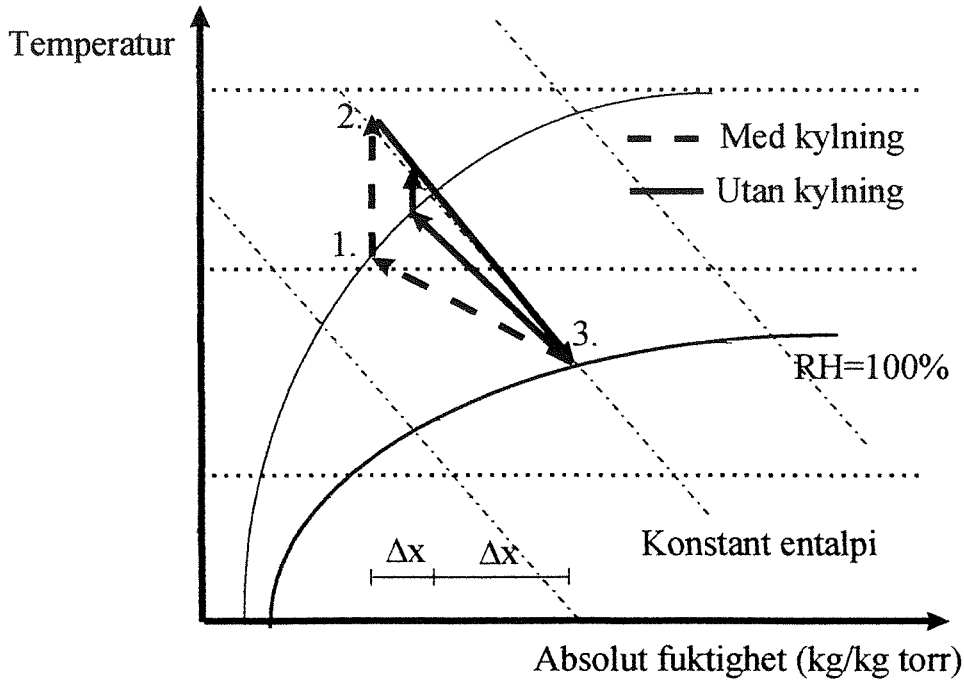
Då lufttillstånden är bestämda beräknas massflöde luft, volymflöden och batterieffekt enligt ekvation 4, 6 och 12.

Beräkningarna återupprepas sedan från början genom att en ny temperatur (t_3) ansätts.

4.3 Absorbatorn

4.3.1 Kylning

Då luften kyls under sin passage genom absorbatorn kommer fukttransporten från luften till absorptionslösningen att öka. En ökad kylning ger en lägre temperatur och absolut fuktighet ut från absorbatorn då relativa luftfuktigheten är konstant, se figur 16.



Figur 16. Luftens tillståndsförändringar i Mollierdiagram vid kylning.
Figure 16. The pathways in a Mollier diagram with air cooling in the absorber.

Figur 16 visar även att kylning av luften medför att en större effekt till värmebatteriet erfordras. Detta till följd av att temperaturen efter absorbatorn sjunker vilket ger en större temperaturdifferens över värmebatteriet blir större. Det som begränsar kylningen är temperaturen in till tork (t_2) samt att det finns avsättning av bortkyld värmeenergi.

I denna studie har kylning av luften 2°C respektive 5°C relativt ett rent adiabatiskt förlopp för referensfallet undersökts. Relativa luftfuktigheten ut från tork har även i detta fall ansatts konstant, liksom relativ fuktighet efter absorbator. Temperaturen efter tork, t_3 är konstant 48°C enligt referensfallet. Övriga storheter beräknas.

Beräkningarna för punkt 3 efter torken utförs på samma sätt som i kapitel 4.2.1 genom att temperaturen (t_3) ansätts.

Lufttillståndet efter absorbatorn, punkt 1, bestäms genom iterativa beräkningar. Entalpin (h_1) ges ett uppskattat värde varefter absolut vatteninnehåll beräknas enligt ekvation 13 och 14. Temperaturen (t_1) beräknas med ekvation 3. Denna temperatur skall motsvara den önskvärda kylningen. Entalpin (h_1) ändras sedan tills temperaturen överensstämmer med kylningen.

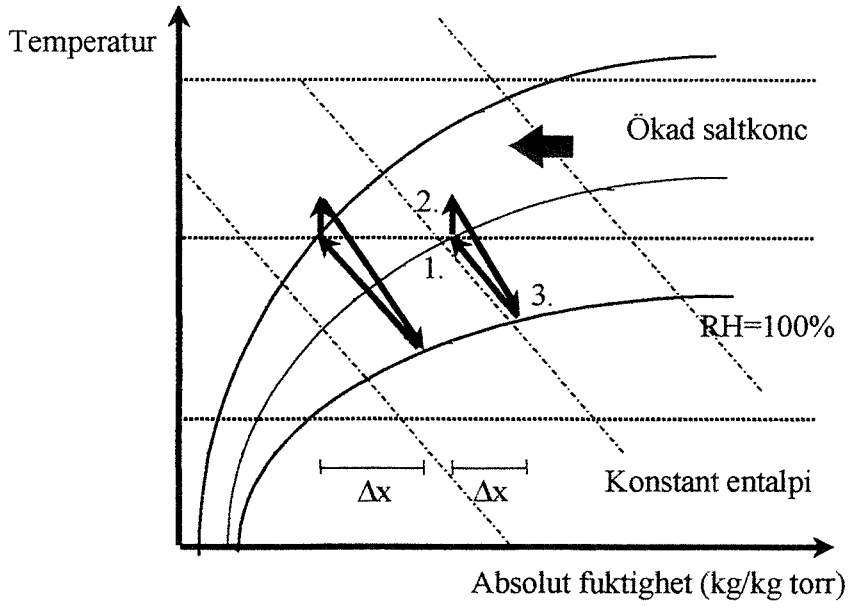
Lufttillståndet före tork, punkt 2, beräknas på samma sätt som i kapitel 4.2.1.
Då luften kyls måste en viss energimängd bortföras. Kyleffekten beräknas enligt

$$P_{kyl} = \dot{m}_{torr} \cdot \left(h_{1,3} - h_{1,1}\right) \qquad [28]$$

Samtliga beräkningar återupprepas sedan genom att en ny temperatur (t_3) ansätts.

4.3.2 Inverkan av saltkoncentration

Genom att höja saltkoncentrationen kommer luften ut från absorbatorn få en lägre relativ fuktighet enligt absorbatorns arbetslinje. Torrare luft medför att kapaciteten per kg torr luft ökar, se figur 17.



Figur 17. Luftens tillståndsförändringar i Mollierdiagram vid ökad saltkoncentration.
Figure 17. The pathways in a Mollier diagram at increased salt concentration.

Det som skiljer från referensfallet är lufttillståndet efter absorbatorn. Om temperaturen in till torken (t_2) hålls konstant lika med referensfallet kommer detta att medföra en lägre temperatur och absolut fuktighet ut från tork, se figur 13. Temperaturen in till tork har satts konstant för att endast inverkan av saltkoncentrationen skall undersökas.

På samma sätt som tidigare är relativa luftfuktigheten efter tork och absorbator konstant vid beräkningarna. I detta fall ansätts även temperaturen in till tork konstant 78°C enligt referensfallet. Övriga storheter beräknas.
Saltkoncentrationer på 75, 80 samt 85 viktsprocent har undersökts.

Lufttillståndet efter tork, punkt 3 beräknas enligt kapitel 4.2.1. Då entalpin är känd beräknas absoluta vatteninnehållet enligt polynom framtagna för respektive relativ luftfuktighet. I detta fall krävs endast ett polynom för h<700 kJ/kg torr luft då den konstanta temperaturen in till tork medför att entalpin aldrig når högre värden.

Motsvarande absolut fuktighet efter absorbatorn beräknas för respektive koncentration enligt

Koncentration

75 % $$x(h) = -0{,}015781 + (2{,}99 \cdot 10^{-4} \cdot h) + (8{,}8837 \cdot 10^{-8} \cdot h^2) - (7{,}039 \cdot 10^{-11} \cdot h^3) + (2{,}2661 \cdot 10^{-14} \cdot h^4)$$ [29]

80 % $$x(h) = -0{,}01325 + (2{,}5573 \cdot 10^{-4} \cdot h) + (1{,}958 \cdot 10^{-7} \cdot h^2) - (1{,}975 \cdot 10^{-10} \cdot h^3) + (7{,}8507 \cdot 10^{-14} \cdot h^4)$$ [30]

85 % $$x(h) = -0{,}013248 + (2{,}5573 \cdot 10^{-4} \cdot h) + (1{,}958 \cdot 10^{-7} \cdot h^2) - (1{,}975 \cdot 10^{-10} \cdot h^3) + (7{,}8507 \cdot 10^{-14} \cdot h^4)$$ [31]

Övriga beräkningar sker enligt beskrivning i kapitel 4.2.1.

4.4 Indunstning

Indunstningsanläggningen vid Martinsons trä är liksom övriga apparater ej optimerad. I andra effekten avkokas endast ca. 18% av den totala vattenmängden. Detta är en följd av att lösningen inte förvärms mellan tredje och andra effektsteget, se figur 2. En stor del av det tillförda värmet åtgår därför till förvärmning av lösningen upp till förångningstemperaturen. Flashtankarna har tillkommit i efterhand för att öka indunstningskapaciteten hos anläggningen. I denna studie har antal indunstningseffekter samt olika koncentrationsgradienter hos lösningen undersökts.

4.4.1 Saltkoncentration

Ökad saltkoncentration i absorbatorerna medför att utgående koncentration från indunstnings anläggningen måste ökas. Avfuktnings behovet är lika stort vilket medför att indunstnings kapaciteten förblir konstant. Ökad utgående saltkoncentration leder till att det totala lösnings flödet kan minskas, då konstanta tillstånd antas gälla för det utspädda lösningsflödet.

Enligt referensfallet är saltkoncentrationen i absorbatorns sista steg 72,5 viktsprocent. Detta medför att koncentrationen ut från indunstaren måste vara högre eftersom lösningen tar upp vatten i sista steget. Koncentrationen ut från indunstaren vid referensfallet är 75 viktsprocent.

Effekterna av ökad saltkoncentration undersöks genom att beräkningar för koncentrationerna 75, 80 respektive 85 viktsprocent ut från indunstaren genomförs.

Beräkningarna sker iterativt genom att ingående lösningsflöde ($\dot{m}_1$) och tillförd effekt (P_1) ansätts. Koncentration och temperatur på ingående lösning sätts lika med referensfallet.

I första iterationen antas lika stor indunstnings kapacitet i de olika effekterna och de två flashtankarna varefter entalpi och temperatur för respektive flöde bestäms enligt figur 13 och 14 i kapitel 3.3.
De olika massflödena $\dot{m}_2$ till $\dot{m}_{11}$ beräknas med hjälp av ekvationssystemet (ekv. 13-22). Ingående lösningsflöde och tillförd effekt ändras tills önskad utgående koncentration och indunstad vattenmängd erhålls.

Koncentrationerna för de olika flödena beräknas med hjälp av ekvation 25 varefter entalpi samt temperatur för varje delflöde åter kan bestämmas.

Entalpierna insätts i ekvationssystemet (ekv. 13-22) varefter tillförd effekt återigen ändras för att rätt indunstad vattenmängd skall erhållas. Iterationerna fortgår tills ansatta och beräknade koncentrationer överensstämmer.

4.4.2 Antalet indunstningseffekter

Det tillförda primärvärmet reduceras vid indunstning med flera effektsteg.
Beräkningar har utförts för indunstning med fyra steg respektive ett steg för en jämförelse med dagens tre stegs indunstning.

Indunstning med fyra effekter medför att trycket i första effektsteget måste höjas för att erhålla tillräckligt stor temperaturgradient. Vid bestämning av trycknivåerna antas en temperaturskillnad på 10°C mellan ingående vattenånga och utgående lösning. Detta ger de erforderliga trycken 20, 8, 3 samt 1 bar(a). Lösning från första effektsteget flashas i två steg vid trycken 8 respektive 3 bar.

Vid fyra stegs indunstning tillkommer två ekvationer till systemet i kapitel 3.3. En massbalans och en energibalans för det fjärde effektsteget.

Beräkningarna sker iterativt genom att tillförd värmeeffekt (P_1) ansätts. Ingående lösningsflöde ($\dot{m}_1$) liksom koncentration och temperatur sätts lika med referensfallet. Även koncentration ut från indunstaren sätts lika med referensfallet.

Beräkningsgången överensstämmer med kapitel 4.4.1 med den skillnaden att ingående lösningsflöde hålls konstant och endast tillförd effekt ändras för att erhålla önskad avkokad vattenmängd.

4.4.3 Fjärrvärmeproduktion

Kondensorvärmet som avges kan istället för att användas till uppvärmning av fabrikslokalerna kopplas till ett externt fjärrvämenät där vattnet i returledningen värms upp till önskad framledningstemperatur. Denna temperatur varierar beroende på vilken dimensionerande utomhustemperatur (DUT_{20}) orten i fråga har. Maximal framledningstemperatur är 110°C. I denna studie har uppvärmning till två olika temperaturer i framledningen undersökts, 85 respektive 70°C. Om en högre temperatur är nödvändig kan detta genomföras med spetsvärme. Trycket i sista effektsteget måste motsvara en mättnadstemperatur 10-15°C högre än önskad framledningstemperatur. För fallet 70°C medför detta att trycket i sista effektsteget uppgår till ca. 0.6 bar(a) istället för 1 bar(a).

Beräkningsgången följer den tidigare beskrivna i kapitel 4.4.2 och 4.4.3.

5 RESULTAT

5.1 Inledning

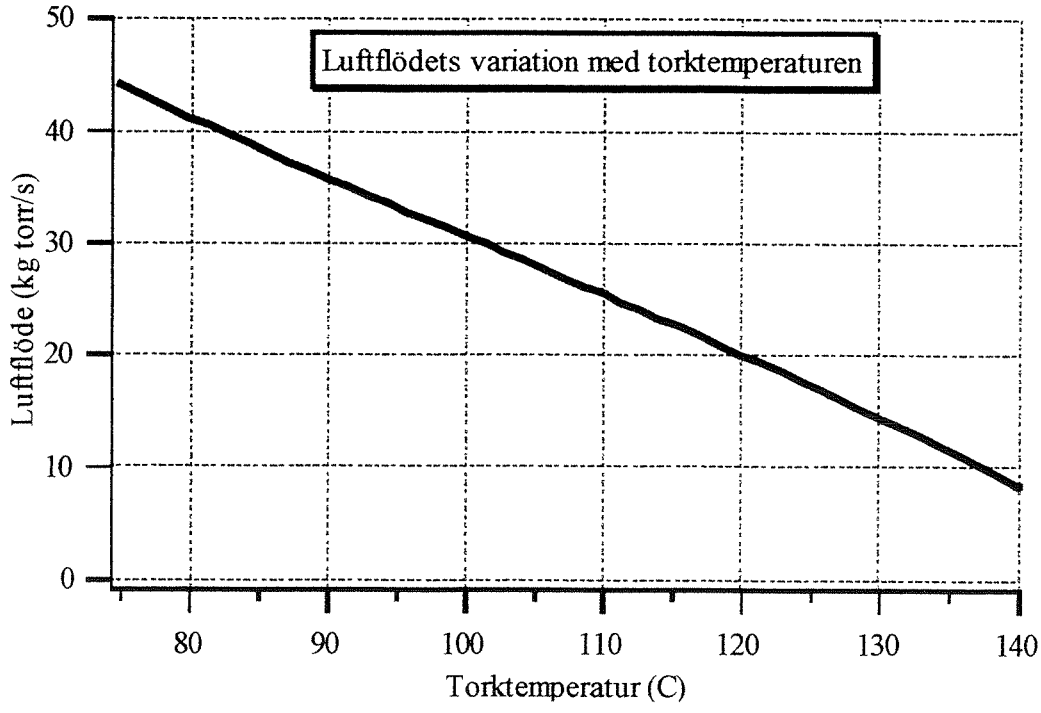
Utifrån samband beskrivna i kapitel 3 samt beräkningsgång enligt kapitel 4 har följande resultat tagits fram.

5.2 Biobränsletork

5.2.1 Torktemperatur

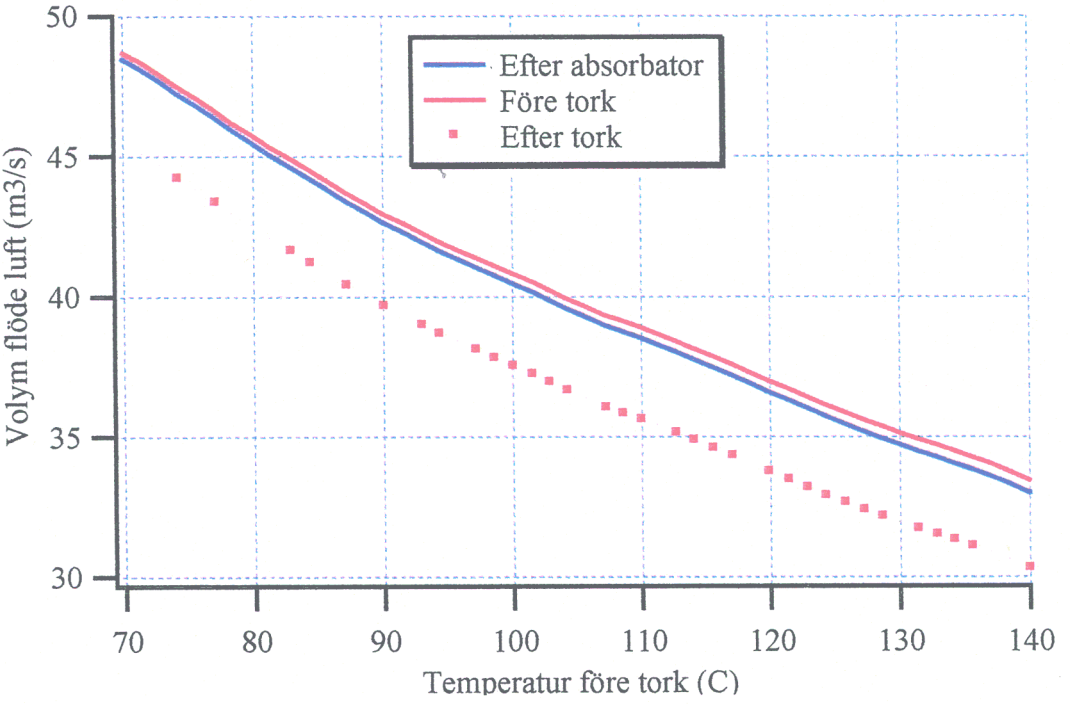
Figur 18 visar hur erforderligt luftflöde sjunker vid stigande lufttemperatur före biobränslebädd. Avfuktningskapaciteten ($\dot{m}_{avd}$ =1872 kg vatten/h) är konstant och lika med referensfallet.

Genom att öka torktemperaturen till 100°C kommer luftflödet att minska till 31 kg torr luft/s för motsvarande torkbehov. Detta motsvarar en sänkning med 28 % av referensfallets luftflöde. En höjning av torktemperaturen till 140°C kräver ett luftflöde av 8,5 kg/s, det vill säga en reduktion med ca. 80% av referensfallets luftflöde.



Figur 18. Massflödet torr lufts variation med torktemperatur före tork.
Figure 18. Massflow dry air at different inlet temperatures to dryer.

Även volymflödet fuktig luft kommer att minska vid ökad torktemperatur, se figur 19. Eftersom volymflödet är beroende av luftens densitet, i motsats till massflödet torr luft vilket är konstant, kommer detta att variera i processens olika delar. En följd av att densiteten är beroende av både temperatur och absolut vatteninnehåll.



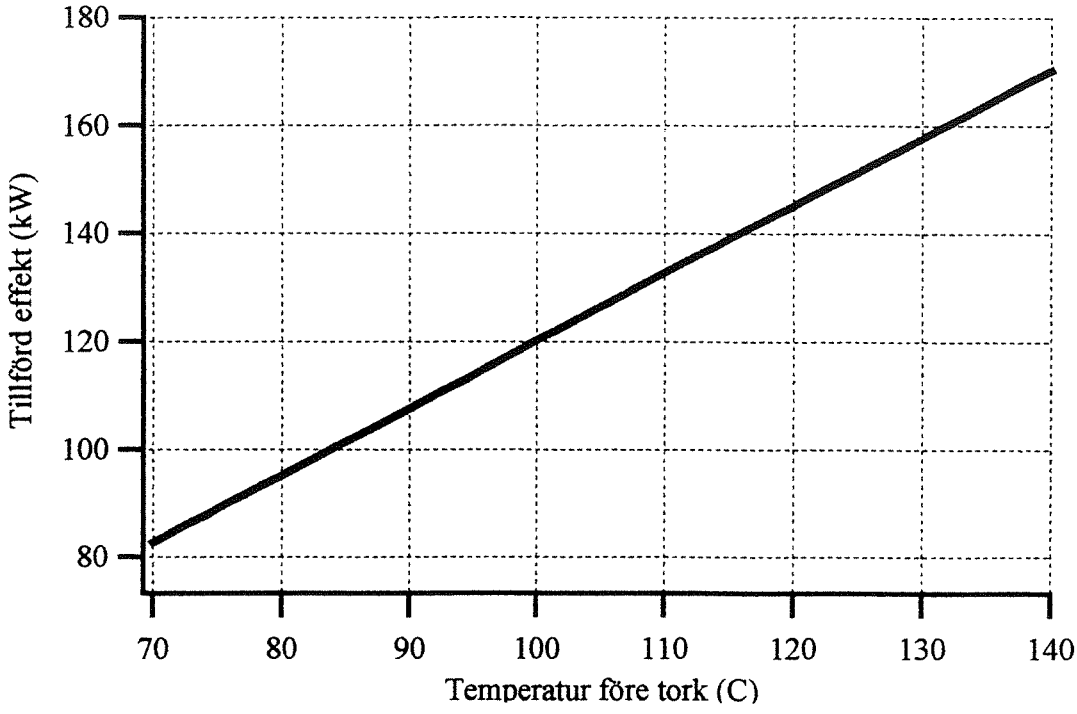
Figur 19. Volymflödet fuktig luft i förhållande till temperatur före tork.
Figure 19. Volume flow air at different inlet temperatures to dryer.

En ökad temperatur före tork till 100°C reducerar volymflödet fuktig i processen med ca. 12-13% medan en temperatur på 140°C reducerar volymflödet med ca. 28 -30%. Se tabell 2.

Tabell 2. Volymflöden fuktig luft vid varierad torktemperatur.
Table 2. Volume flow at different inlet temperatures to dryer.

Temperatur före tork (°C)	Volymflöde efter absorbator (m^3/s)	Volymflöde före tork (m^3/s)	Volymflöde efter tork (m^3/s)
78	46	46.3	43
100	40.5	40.8	37.5
140	33	33.4	30.3

Ökad temperatur in till tork medför att tillförd effekt till värmebatteriet ökar. Detta beror på att de förluster som skall täckas samt uppvärmning av torkgodset ökar vid höjd lufttemperatur. En temperatur in till torken på 100°C kräver en batterieffekt på 120 kW, se figur 20, medan en ökning till 140°C ger upphov till en tillförd effekt på 170 kW. Övriga resultat från beräkningarna sammanfattas i tabell 3.



Figur 20. Tillförd värme effekt vid ökad lufttemperatur in till tork.
Figure 20. Supplied heat at different inlet temperatures to dryer.

Tabell 3. Resultat varierad temperatur in till tork.
Table 3. Results at different inlet temperatures to dryer.

t_1 (°C)	t_2 (°C)	T_3 (°C)	Luftflöde (Kg torr/s)	Batterieffekt (kW)
76	78	48	43	91
97	100	63	31	120
135	140	91	8.5	170

5.3 Absorbatorn

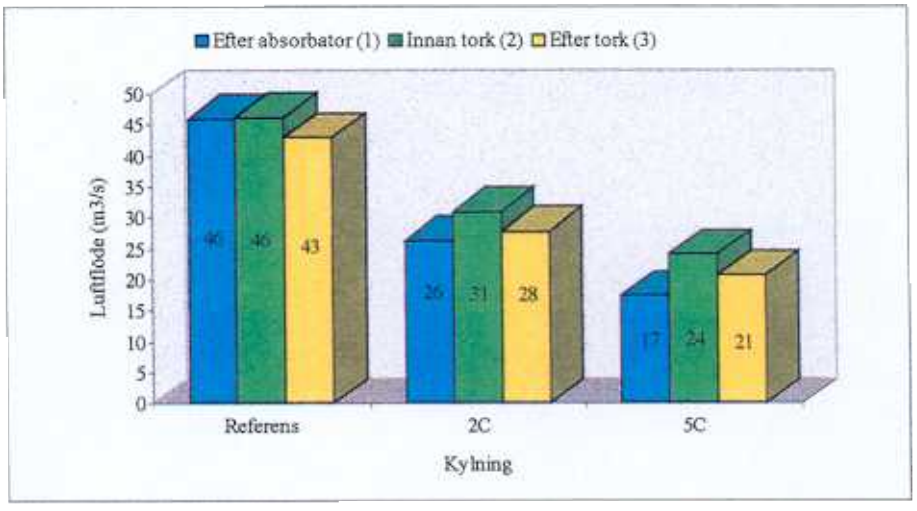
5.3.1 Kylning

I tabell 4. sammanfattas resultat från beräkningarna vid kylning av luftflödet 2 respektive 5°C i absorbatorn. Temperaturen in till tork (t_2) stiger i dessa fall till 98 respektive 117°C. Detta medför att det är möjligt att kyla ytterligare utan att den maximala torktemperaturen 140°C överskrids. Temperaturen ut från tork (t_3) är konstant och lika med referensfallet.

Tabell 4. Resultat kylning.
Table 4. Results with air cooling.

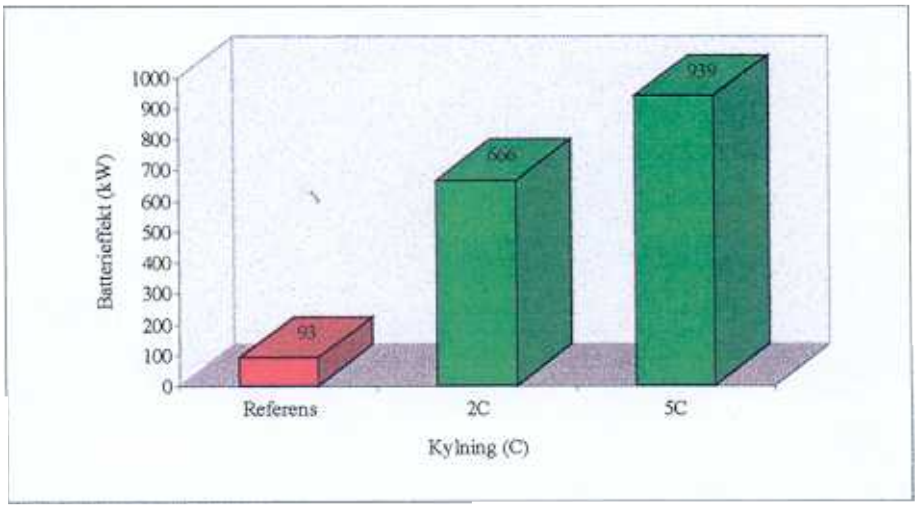
Kylning (°C)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_3 (°C)	Luftflöde (Kg torr/s)	Batterieffekt (kW)
0	76	78	48	43	93
2	74	98	48	26	666
5	71	117	48	20	940

Figur 21 visar volymflödena i processens olika delar. En kylning på 2°C reducerar volymflödet i processen med ca. 35-45% medan en kylning på 5°C reducerar volymflödet med ca. 48-63% mot referensfallet.



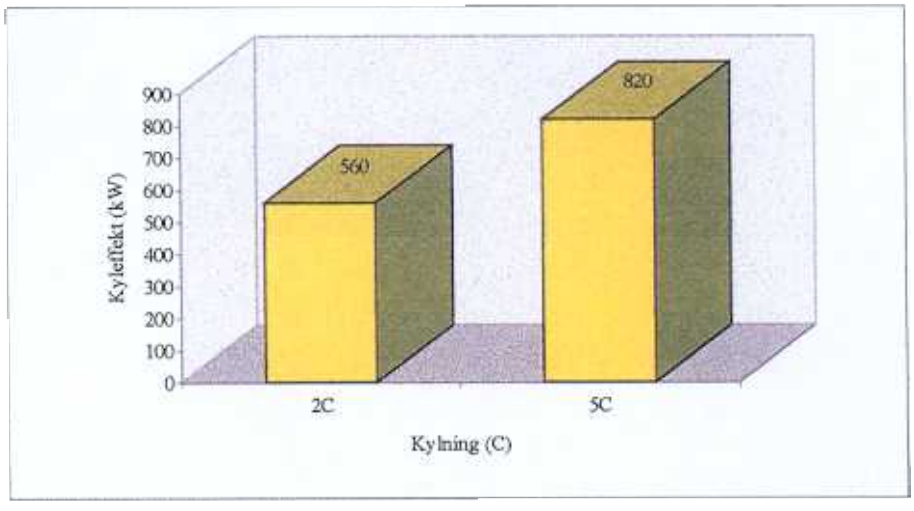
Figur 21. Variation av volymflödet fuktig luft vid kylning.
Figure 21. Volume flow of air with cooling in absorber.

Som nämnts tidigare kommer en kylning av luften i absorbatorn att leda till en högre temperatur in till torken. Detta medför att batterieffekten kommer att öka markant då en större mängd värme måste tillföras luftkretsen, se figur 22. Vid kylning 5°C kommer batterieffekten öka till ca. 940 kW.



Figur 22. Batteri effekt vid kylning av luften i absorbatorn.
Figure 22. Supplied heat with air cooling in absorber.

Erforderlig kyleffekt som måste bortföras från absorbatorn ökar också vid ökad kylning, se figur 23. En kylning 2°C medför en kyleffekt på 560 kW och en kylning på 5°C ger en kyleffekt på 820 kW.



Figur 23. Erforderlig kyleffekt vid kylning av luften i absorbatorn.
Figure 23. Cooling demand in absorber.

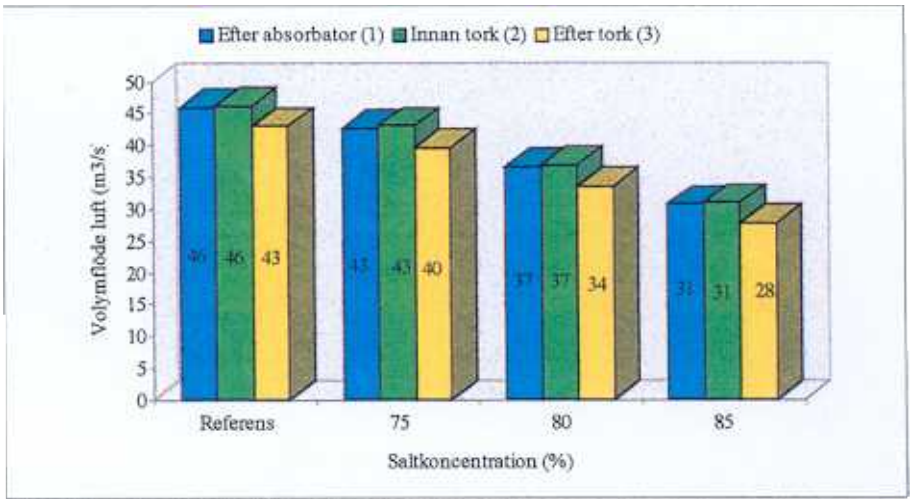
5.3.2 Inverkan av saltkoncentration

I tabell 5 sammanfattas resultaten utifrån varierad saltkoncentration. Temperaturen in till tork (t_2) är konstant vilket får till följd att temperaturen ut från absorbator (t_1) är konstant och lika med referensfallet.

Tabell 5. Resultat varierad saltkoncentration.
Table 5. Results at different salt concentrations.

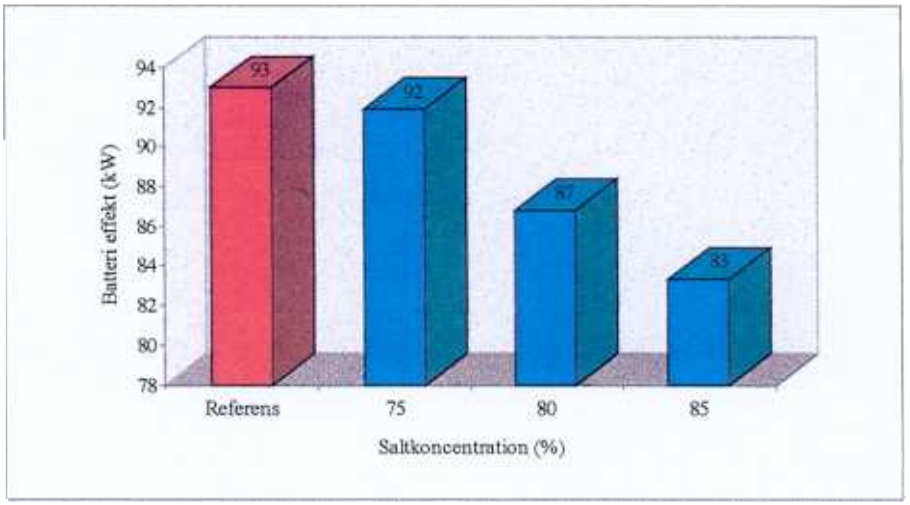
Koncentration (%)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_3 (°C)	Luftflöde (Kg torr/s)	Batterieffekt (kW)
72.5	76	78	48	43	91
75	76	78	45	40	90
80	76	78	40	35	88
85	76	78	34	30	82

Figur 24 visar att volymflödena fuktig luft även minskar vid ökad saltkoncentration. Luftflödet in till absorbatorn minskar med 33-35% vid en saltkoncentration på 85 viktsprocent. Saltkoncentration på 70 viktsprocent reducerar luftflödet med ca. 19-21% medan saltkoncentration på 75 viktsprocent ger en minskning med ca. 6-7%.



Figur 24. Volymflödet fuktig luft vid varierad saltkoncentration.
Figure 24. Volume flow of air at different salt concentrations.

I detta fall reduceras tillförd effekt till värmebatteriet, se figur 25. Detta beror på att luftens temperatur ut från absorbatorn och in till torken är i stort sett konstant samtidigt som luftflödet reduceras. En saltkoncentration på 85 viktsprocent reducerar batterieffekten med ca. 11% jämfört med referensfallet.

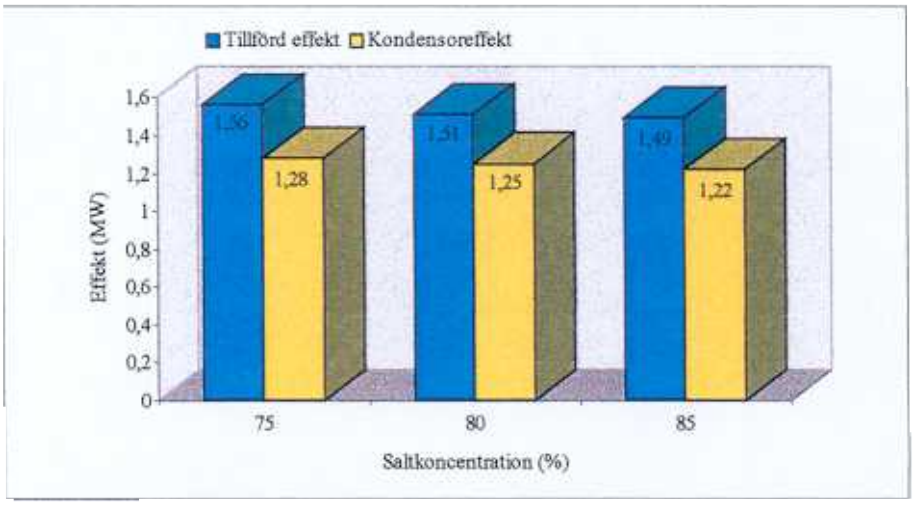


Figur 25. Batteri effekt vid varierad saltkoncentration.
Figure 25. Supplied heat at different salt concentrations.

5.4 Indunstning

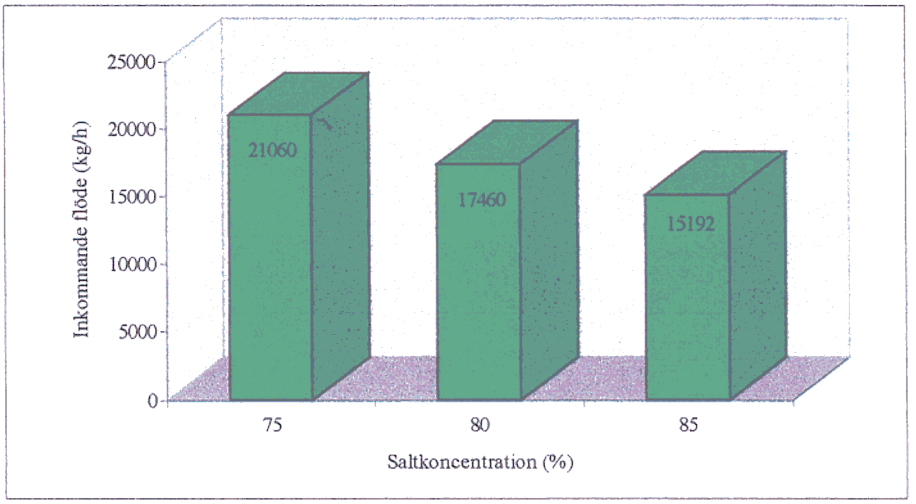
5.4.1 Inverkan av saltkoncentration

Figur 26 visar hur den tillförda effekten varierar med olika saltkoncentrationer ut från indunstningsanläggningen. Resultaten bygger på beräkningar för tre stegs indunstning. Både tillförd effekt samt kondensoreffekt minskar vid ökad saltkoncentration. Detta är en följd av att det totala flödet minskar.



Figur 26. Tillförd effekt och kondensoreffekt för olika utgående saltkoncentrationer.
Figure 26. Supplied heat and condenser heat at different salt concentrations.

Figur 27 visar hur inkommande lösnings flöde varierar med utgående saltkoncentration. En saltkoncentration på 80 viktsprocent reducerar flödet med 17% medan en saltkoncentration på 85 viktsprocent reducerar flödet med ca. 28%.



Figur 27. Inkommande saltlösningsflöde i förhållande till koncentration på utgående lösning från indunstare.
Figure 27. Massflow of incoming salt solution at different concentrations on outgoing flow from evaporation plant.

Tabell 6 visar att andelen avkokad vattenmängd ökar i effekt 2 och 3 vid en högre koncentration. Mängden avkokat vatten i flashtankarna minskar i samma utsträckning. Detta är också en följd av att det totala flödet genom indunstaren är lägre. Entalpin hos lösningen varierar väldigt lite för de olika fallen beroende på att den specifika värmekapaciteten minskar vid ökad koncentration medan kokpunkten blir högre. Ett lägre flöde ger då upphov till en större avkokad vattenmängd.

Tabell 6. Procentuell andel avkokad vattenmängd i respektive effekt.
Table 6. Evaporated water (percentage) in each effect.

	Avkokad vattenmängd (%)		
Koncentration (%)	**75**	**80**	**85**
Effekt 1	34	35	35
Effekt 2	17	21	24
Effekt 3	24	26	28
Flash 1	14	9	7
Flash 2	11	8	6

5.4.2 Antal effektsteg

Tabell 7 visar tillförd effekt för indunstning med 1, 3 respektive 4 effektsteg. Indunstningskapaciteten är konstant liksom det totala lösnings flödet samt koncentration in till och från indunstaren.

Tabell 7. Tillförd effekt och kondensor effekt för olika effektsteg.
Table 7. Supplied heat and condenser heat for different evaporation effects.

	Ett steg	Tre steg	Fyra steg
Tillförd effekt (MW)	3,63	1,56	1,38
Kondensor effekt (MW)	3,22	1,28	1,14

Tabellen visar att både tillförd effekt och kondensoreffekt minskar med ett större antal effektsteg. Indunstning med ett steg mer än fördubblar tillförd effekt.

5.4.3 Fjärrvärmeproduktion

Tabell 8 visar tillförd effekt och för trycken 1.0 respektive 0,6 bar(a) i sista effektsteget. Vid ett lägre tryck i sista effekt steget fås en högre kondensoreffekt, 1,39 MW mot 1,28 MW. Den tillförda effekten är dock lika för de båda fallen.

Tabell 8. Tillförd effekt och kondensoreffekt för olika tryck i sista effektsteget.
Table 8. Supplied heat and condenser heat for different pressure in third effect.

	1,0 bar(a)	0,6 bar(a)
Tillförd effekt (MW)	1,56	1,56
Kondensor effekt (MW)	1,28	1,39

Att kondensoreffekten blir högre vid ett lägre tryck förklaras av att lösningens temperatur ut från tredje effektsteget och in till andra effekten är lägre vilket medför att en mindre del vatten avkokas. Mängden avkokat vatten i effekt 1 och 3 är däremot ungefär konstant för de båda fallen, se tabell 9. I gengäld flashas en större mängd ånga i den sista flashtanken vilket får till följd att den totala ångflödet från effekteg 3 samt flashtank 2 blir högre. Därav den högre kondensoreffekten.

Tabell 9. Procentuell andel avkokad vattenmängd i respektive effekt.
Table 9. Evaporated water (percentage) in each effect.

	Avkokad vattenmängd (%)	
Tryck i sista steget (bar(a))	**1,0**	**0,6**
Effekt 1	34	34
Effekt 2	17	11
Effekt 3	24	26
Flash 1	14	13
Flash 2	11	15

6 DISKUSSION

Investeringskostnaden för absorptionssystemet har visat sig vara hög jämfört med andra på marknaden förekommande torktekniker. Den största delen av investeringen ligger på absorbator och biobränsletork. I processen cirkuleras stora mängder luft varför eleffekten till fläktarna är relativt hög. Målet med detta projekt har därför varit att undersöka förändringar av systemet som kan reducera investeringen och på så sätt öka konkurrenskraften.

Resultaten från parameterstudien visar entydigt att det är möjligt att sänka erforderligt luftflöde i torkprocessen. Detta har två fördelar, investeringskostnaden reduceras då absorbator och biobränsletork kan göras mindre i storlek med bibehållen torkkapacitet. Dessutom minskar fläktarnas elbehov.

En **ökad torktemperatur** leder till ett minskat luftflöde eftersom luftens mättnads- tryck ökar. Genom höjning av temperaturen för cirkulationsluften, 140°C in till tork är det möjligt att reducera volymflödet luft med ca 30% jämfört med referensfallet. I gengäld ökar värmebehovet för processen, med ca 80 kW, på grund av ökade förluster till omgivning och ökad uppvärmning av torkgods.

Ur teknisk synpunkt är det möjligt att höja torktemperaturen förutsatt att värme vid tillräcklig hög temperaturnivå finns tillgänglig. Kondensat från indunstaren(1 bar(a)) går därvid inte att utnyttja som enda värmekälla. Spetsvärme i form av ånga vid en tillräckligt hög temperatur måste tillföras från indunstaren. Denna avtappning medför en ökad värmetillförsel till indunstningsanläggningen.

Kostnaden för fyllkroppar ökar på grund av att temperaturbeständigt material måste användas. Fyllkropparna i PoD anläggningen (tillverkade i plast) tål endast en maximal driftstemperatur av ca. 80°C.

Kylning av luftflödet vid passage genom absorbatorn reducerar likaledes luftflödet. En kylning på 5°C medför en sänkning av luftflödet med ca 50%. Den kyleffekt som bortförs i absorbatorn måste förutom förluster tillföras luftkretsen varför det totala värmebehovet ökar med ca. 40 kW mot referensfallet.

Kylning av luftflödet blir endast aktuellt vid torkprocesser där kyleffekten kan tillvaratas och utnyttjas i ett sekundärt system, exempelvis ett externt fjärrvärmenät.

Temperaturnivån på luften i absorbatorn medför att utgående vattentemperatur på sekundärnätet endast kan ges en maximal temperatur på ca. 65°C. Genom att höja lufttemperaturen i processen ytterligare kan även utgående vattentemperatur i sekundärnätet höjas.

Genom integration av processströmmarna kan det ökade värmebehovet vid torkprocessen även i detta fall tillgodoses med hjälp av ånga från indunstningsanläggningen. Då den tillförda effekten är i storleksordning lika med kondensoreffekten i indunstaren kan ångflödet från sista effektsteget utnyttjas för biobränsletorkens värmetillförsel. En ytterligare följdverkan blir att trycket i sista effektsteget måste anpassas till torktemperaturen. Enligt resultaten

skulle detta medföra ett tryck på ca. 2 bar(a) för torktemperaturen 117°C, samtliga trycknivåer i indunstningsanläggningen måste anpassas för dessa nya driftbetingelser.

Merkostnad för luftkretsens värmebatteri samt vätskevärmeväxlare för kylning av processluften tillkommer.

Höjd saltkoncentration reducerar luftflödet. En saltkoncentration på 85 viktsprocent hos absorptionslösningen gör det möjligt att minska luftflödet med ca 35% mot referensfallet. Värmebehovet sjunker samtidigt med ca. 10 kW

En ökad saltkoncentration leder även till att det totala lösningsflödet kan minskas. Detta ger upphov till reducerat elbehov till pumpar i anläggningen samt mindre rördimensioner, förutom de positiva effekter som erhålls i biobränsleprocessen.

En nackdel med höjd saltkoncentration är problem med kristallisation. Genom att hålla lösningstemperaturen över kristallisationsgränsen, vilken bestäms av koncentrationen kan detta problem undvikas. En ytterligare begränsning är att luftens temperatur efter absorbator måste överstiga denna temperaturgräns.

Den tillförda effekten till indunstningsanläggningen kan reduceras med ca. 10% med en övergång till fyra stegs indunstning jämfört med dagens tre steg. Investeringen ökar dock med ett extra steg.

Antalet effektsteg bestäms utifrån anläggningens placering det vill säga vilken avsättning för producerat värme som föreligger i det aktuella området.

Det erforderliga luftflödet kan reduceras ytterligare genom att kombinera de olika parametrarna. Exempelvis en höjd saltkoncentration tillsammans med en ökad torktemperatur inklusive eller exklusive en kylning av luftflödet i absorbatorn ger ett ännu lägre luftflöde. En optimering av anläggningen med avseende på dessa parametrar är därför nödvändig. Vilket alternativ som ger det bästa utfallet måste avgöras från fall till fall.

Ett tänkbart alternativ är att ersätta dagens tvärströmsabsorbator med en absorbator av annan typ, exempelvis motstöms eller fluid bed absorbator. Vilken inverkan dessa får på investering och kapacitet bör undersökas.

Integrering av värmeströmmar ger systemet som helhet en stor flexibilitet. Trycknivåerna i indunstningsanläggningen kan väljas så att värmeavgivning vid önskvärda temperaturer kan erhållas. Detta gör att anläggningen kan tillämpas för varierande yttre omständigheter. Kondensorvärmet används i dagens anläggning till uppvärmning av fabrikslokalerna medan kondensatet från indunstnings anläggningen används till värmeförsörjning av en virkestork samt till tvättsteget i absorbatorn. Ett alternativ är att utnyttja kondensorvärmet till uppvärmning av torkluften. Allt beroende på vilket behov som finns i anslutning till anläggningen.

Samtliga beräkningar på absorbator och biobränsletork bygger på att den specifika värmekapaciteten för bark samt värmeöverföringstalet mellan luft och torkgods har antagits vara konstant i förhållande till temperaturen. Denna approximation ger en viss avvikelse mot verkligt fall då dessa parametrar är temperaturberoende.

Beräkningar på indunstningsanläggningen har utförts med hjälp av energibalanser för lösningen. Ingen hänsyn har tagits till anläggningens design, det vill säga värmeöverföringstal samt värmeöverförande ytor. Vid dimensionering måste detta inkluderas i beräkningarna. Värmeförluster från anläggningen har även bortsetts ifrån. Dessa förluster är relativt små och påverkar därför inte resultatet i någon större utsträckning. Dessutom är temperaturnivån ungefär densamma för de olika fallen vilket medför att förlusterna är i samma storleksordning.

En fullständig ekonomisk utvärdering av kostnader är svår att genomföra i detta läge. Som uppskattning kan generellt sägas att kapitalkostnaden är proportionell mot kapacitetsförändringen upphöjt till en faktor 0,6-0,8. En minskning av luftflödet genom absorbatorn på 30-50% som resultaten visar, skulle då uppskattningsvis minska investeringskostnaden för denna med mellan 20% och 40%. För indunstningsanläggningen skulle ett eventuellt extra effektsteg medföra en ökad kapitalkostnad på ungefär 20%. Dessa siffror gäller enbart kapitalkostnaden medan driftskostnader på grund av förändringarna ej tagits hänsyn till.

7 SLUTSATSER

Den öppna absorptionstekniken installerad vid ett sågverk har beskrivits i detalj. Tekniken har visat sig fungera i praktiken då anläggningen har varit i drift ca 8000 h per år, avstängd endast under semesteruppehållet.

Investeringskostnaden för anläggningen har varit hög jämfört med andra torktekniker.
Fläktarna i anläggningen har också ett stort elbehov vilket beror på de stora mängder luft som cirkuleras.

Studien visar att det är möjligt att minska erforderligt luftflöde vid biobränsletorkning jämfört med dagens anläggning hos Martinsons Trä.
Genom att höja torktemperaturen, höja saltkoncentrationen eller kyla luftflödet vid passage genom absorbatorn kan erforderligt luftflöde reduceras med 30-50%.
Ingående apparaters storlek kan därmed minskas och en lägre investering för systemet erhålls samtidigt som fläktarnas elbehov reduceras. En sänkning av luftflödet ger därför gynnsamma effekter för både absorbator och tork samt elbehov för fläktar.

En höjning av utgående saltkoncentration från indunstningsanläggningen reducerar det totala saltlösnings flödet med upp till 30%, vilket får till följd att elbehovet till pumparna minskar.
Indunstning i tre steg sänker tillfört effektbehov till 43% mot indunstning i ett steg, medan fyra stegs indunstning reducerar tillfört effektbehov till 37%.

Uppskattningsvis skulle det reducerade luftflödet reducera kapitalkostnaden för absorbatorn med 20-40%.

8 FORTSATT ARBETE

Ytterligare arbetsinsatser bör ligga i att klargöra hur mycket investeringskostnaden reduceras genom att optimera systemet med avseende på torktemperatur, saltkoncentration och kylning.

Arbetet bör bestå i att dimensionera en anläggning med optimala driftsbetingelser varvid två diametralt motsatta förhållanden väljs för omgivningen. Ett fall med möjlighet att dumpa all värme till ett sekundärnät med ett värmebehov betydligt större än tillfört värme via det öppna absorptionssystemet, typ fjärrvärmenät, samt ett fall där anläggningen placeras i ett område med låg avsättning av producerat sekundärvärme. Vidare påvisas systemuppbyggnad då sekundärsystemet erfordrar en låg respektive hög temperaturnivå. Investeringskostnader framtages, eventuellt med hjälp av offerter från tillverkare. I arbetet bör även ingå val av absorbatortyp som på bästa sätt gynnar investeringen.

En ekonomisk jämförelse mellan ett optimerat system i förhållande till andra på marknaden förekommande torktekniker bör genomföras. Det bör klargöra om tekniken är konkurrenskraftig eller ej

9 REFERENSER

1 L. Westerlund, J. Dahl "Open Absorption System: Experimental Study in a Laboratory Pilot plant" Applied Energy, Elsevier Applied Science, vol. 38 Nr 3 1991

2 L. Westerlund, J. Dahl "Absorbers in the Open Absorption System" Applied Energy, Elsevier Applied Science, vol. 48 1994

3 B. Esping "Torkhandboken"Svenska Träforskningsinstitutet, Stockholm 1977

4 L. Westerlund "Open absorption system for drying of moist air" LuTH 1995:160D

5. Perry R.H., Chilton C.H. "Chemical engineers handbook" fifth edition McGraw-Hill, New York 1973

6. Westerlund L., Dahl J. "Öppna Absorptionssystem: Absorbatorers egenskaper", LuTH 1989:17T

7. Westerlund L., Dahl J., Hermansson R. "Heat and mass transfer simulations of the absorption process in a packed bed absorber" Applied Thermal Engineering, vol 18 (1998)

8. Antti B-M., Bäckström Å. "Avfuktning av luft. Absorption i Kac-lösningar" LuTH 1982:055T

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrierna
- Övrig Industri

Värmeforsk samarbetar med Statens Energimyndighet.

VÄRMEFORSK Service AB

101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80 ● Fax 08-677 25 35
http://www.varmeforsk.se