

JTI-rapport

Lantbruk & Industri

388

Värmedriven mjölkkyllning i syfte att öka lönsamheten vid gårdsbaserad biogaskraftvärme – Förstudie

Nils Brown
Ola Pettersson



JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik

2009

Värmedriven mjölkkyllning
i syfte att öka lönsamheten vid
gårdsbaserad biogaskraftvärme
– Förstudie

*Heat-driven milk cooling with the aim of increasing the
profitability of farm-based biogas CHP – Prestudy*

Nils Brown
Ola Pettersson

Innehåll

Förord.....	5
Sammanfattning	7
Summary	8
Bakgrund.....	10
Kraftvärmeproduktion på en mjölkgård	10
Värmeöverskott vid kraftvärmeproduktion på en mjölkgård.....	11
Sorptionskyla för mjölkkyllning	11
Genomförande	11
Kylkrav på mjölkgårdar	12
Lagstadgade krav för mjölkkyllning	12
Praktiska dimensioneringskrav	12
Kylteknik på mjölkgårdar	13
Direktexpansionskyla	13
Indirekt kylning med is	14
Momentankylning	15
Förkyllning	16
Mjölkkyllning för robotmjölkningssystem.....	17
Värmeåtervinning.....	17
Sorptionskyla	18
Introduktion	18
Processbeskrivning – Carrécykel absorptionskylmaskin	18
Processviktiga parametrar i sorptionskyla.....	20
Teknikgenomgång: Befintliga sorptionskylmaskiner	22
Sorptionskylmaskiner med vatten som köldmedium.....	24
Sorptionskylmaskiner med ammoniak som köldmedium	25
Diskussion och möjliga spår för vidare utveckling av sorptionskyla för mjölk	27
Systemlösningar.....	28
Typgårdsbeskrivning.....	28
Allmänna förutsättningar	28
Energibalans för gården med biogasanläggning.....	28
Definition av kylbehovet.....	29
Kyl effekt och energibehov	29
Referensfall	30
Systemuppbyggnad.....	30
Energianvändning	31

Sorptionskylsystem	32
Dimensioneringskrav för sorptionskylsystem	32
Systemlösning – Robotmjölkningssystem	34
Systemlösning – Konventionell mjölkning	38
Ekonomi	41
Diskussion	44
Sorptionskylmaskiner allmänt	44
Tekniska förbättringar för systemlösningar	44
Jämförelse mellan sorptionskyla för robotmjölkning respektive konventionell mjölkning	45
Reducerade kostnader för sorptionskylmaskiner	45
Slutsatser	45
Referenser	46
Internet	47
Personliga meddelande	47
Bilaga 1. Beskrivning av typgården	49
Bilaga 2. Förkylning	57
Bilaga 3. Beräkning av kylförluster från mjölktanken	59

Förord

Trots de gynnsamma aktuella förutsättningarna för elproduktion på en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning finns det i dagsläget ingen perfekt lösning för avsättning av värmen utvunnen i anläggningen.

I föreliggande projekt belyses möjligheterna för mjölkbönder att använda den utvunna värmen för att driva en sorptionskylmaskin för att kyla mjölk på gården. På så sätt minskar elbehovet på gården, och lönsamheten för biogasinvesteringen ökar.

Projektet är finansierat av Stiftelsen Lantbruksforskning och har genomförts av Nils Brown och Ola Pettersson, forskare vid JTI.

Till alla som medverkat till undersökningens genomförande framför JTI ett varmt tack. Ett särskilt tack riktas till Roger Nordman, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Uppsala i februari 2010

Lennart Nelson

VD för JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

Sammanfattning

Trots de gynnsamma aktuella förutsättningarna för elproduktion på en mjölkgårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning finns det i dagsläget ingen perfekt lösning för avsättning av utvunnen värme. För en anläggning på en mjölkgård som enbart använder nötflytgödsel som substrat används drygt 50 % av den utvunna värmen för substratuppvärmning. Den kvarstående värmen kan användas för varmvattenberedning och till uppvärmning av exempelvis gårdens bostadshus. Emellertid brukar dessa avsättningar endast svara för en mindre del av den kvarstående värmen.

Detta projekt har studerat de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att använda överskottsvärmen från en biogaskraftvärmeanläggning som drivenergi för en sorptionskylmaskin för att kyla mjölk på en mjölkgård.

Ett antal på marknaden förekommande sorptionskylmaskiner utvärderades med avseende på deras förutsättningar att kyla mjölk med överskottsvärme. Ett flertal av dessa maskiners köldmedium baseras på vatten. Därför är de begränsade till att leverera en köldbärare utgående ur kylmaskinen på 5 °C, och klarar därmed inte av EU:s krav att mjölk ska kylas ned till under 4 °C högst 3 timmar efter mjölkning. Av de maskiner som har ammoniak som köldmedium, bygger en (Robur) på en teknik med direktledning av naturgas. En annan anläggning med ammoniak som köldmedium, SolarNext Chillii PSC12, är optimerad för komfortkyländamål, men kan leverera en köldbärare ned till -7 °C med 95 °C varmvatten som drivenergi, och har en coefficient of performance (COP – ett verkningsgradmått för kylmaskiner) på upp till ca 0,6. En ytterligare teknik, SolarFrost IceBook, ligger i utvecklingsstadiet, men vid demonstrationer i laboratorium har det visats att denna kan leverera köldbärare vid -10 °C med drivenergi vid 95 °C och COP upp till 1,1.

I en teknoekonomisk utvärdering, beskrivs en fiktiv typgård belägen i Västra Götaland med 160 mjölkkor och en biogaskraftvärmeanläggning som använder enbart flytgödsel från korna som substrat. Kraftvärmeanläggningen genererar el som används för att täcka den egna gårdens behov. Den utvunna värmen används för substratuppvärmning, varmvattenberedning och uppvärmning av gårdens bostadshus, men det finns ett stort överskott. Två scenarier för denna typgård har studerats: ett med konventionell mjölkning (koncentrerad till två gånger om dagen) och ett med robotmjölkning (med konstant mjölkning dygnet runt).

För varje scenario har en anpassad sorptionskylösning skapats. I scenariet med konventionell mjölkning, kyls mjölken först med en vanlig förkylare för senare nedkylning med hjälp av en iskylanläggning. Iskylanläggningen bedöms vara nödvändig för att kunna anpassa den konstanta värmeproduktionen från kraftvärmeanläggningen till det stora kyleffektbehov som förekommer vid varje mjölkning. Is produceras med en indirekt kopplad sorptionskylanläggning som använder uteluften som värmesänka via ett slutet kyltorn. I köldbärarkretsen kopplas också en luftvärmexlaren för att utnyttja frikyla vid uteluftstemperaturer understigande -12 °C.

I scenariet med robotmjölkning ingår också en förkylare för mjölken. I tanken kyls sedan mjölken ned till under 4 °C i direkt kontakt med köldbärare från en sorptionskylanläggning. Sorptionskylanläggningen drivs med värme från en kraftvärmeanläggning och nyttjar ett slutet kyltorn som värmesänka. Till köldbärarkretsen

kopplas också en luftvärmväxlare för att utnyttja frikyla vid uteluftstemperaturer understigande $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Såväl vid konventionell mjölkning som vid robotmjölkning har beräkningarna visat att sorptionskyllosningarna klarar av att producera det erforderliga kyleffekt-behovet, både när värmebehovet för uppvärmning av gårdens bostadshus är som högst (dvs. när uteluftstemperaturen är låg) och när uteluftstemperaturen är som högst (vid en dimensionerande sommartemperatur av $26\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dessa kriterier fodrar en sorptionskylmaskin med exakt lika egenskaper som en SolarNext:s Chillii PSC12.

En jämförelse mellan sorptionskyllosningar och konventionella kylanläggningar med konventionell mjölkning respektive robotmjölkning visar att LCC-kostnaden är 67 % respektive 100 % högre för sorptionskyllosningarna. Detta beror på en mycket hög inköpskostnad för just sorptionskylmaskinen. Sorptionskyllosningar skapar således inget ekonomiskt värde för överskottsvärmen från biogaskraftvärmeanläggningen. I båda jämförelserna hade referenskylanläggningarna system baserade på standardkompressorkyla (med förkylning).

I den framtida utvecklingen av sorptionskyla för kylning av mjölk krävs en avsevärd reducering av inköpskostnaden för sorptionskylmaskinen. Detta kan ske via en vidareutveckling och anpassning av exempelvis SolarNext:s Chillii PSC12, eller via en sorptionskylmaskin med en ny konstruktion, såsom SolarFrost:s IceBook.

En detaljerad modellering är intressant i den vidare utvecklingen av sorptionskyla för mjölkkyllning. Detta skulle främst möjliggöra en förbättrad dimensionering av systemets komponenter. Hur sorptionskylanläggningen kan anpassas till värmeproduktionen och övriga värmeavvärmare i det småskaliga kraftvärmesystemet bör beskrivas bättre samtidigt som möjligheterna att undvika ett kyltorn för värme-sänkning bör undersökas.

Summary

In spite of the current interest for electricity generation from a small-scale dairy farm-based biogas combined heat and power (CHP) plant, there is a need to develop better solutions to economically exploit the heat generated in such plants. For a plant on a dairy farm using only liquid cattle manure as substrate about 50% of the useable heat from the plant is used for maintaining the desired temperature in the digester. The remaining heat can be used for hot water production and space heating (for example in the farmhouse). However, such end-uses normally only account for a fraction of this remaining heat.

This project has studied the current techno economic conditions for using the heat that would otherwise be wasted from a CHP plant on a dairy farm in Sweden to drive a sorption-cooling machine to cool milk.

A number of recently commercialised sorption-cooling machines were evaluated against the requirements for cooling milk with waste heat. Some of these machines used water as a working medium, and were therefore unable to deliver a cooled fluid at a temperature of less than 5°C . These machines are therefore not capable of cooling milk under 4°C (as required by EU regulations). Other recently commercialised sorption cooling machines used ammonia as a working fluid. One of these,

produced by Robur was powered by a direct combustion of natural gas, and therefore not suited to using waste heat from the CHP plant. SolarNext's ammonia based sorption-cooling machine, the Chillii PSC12 is optimised for space cooling; however, this system is nonetheless capable of producing chilled thermal fluid at temperatures down to -7°C powered by hot water at 95°C with a coefficient of performance (COP) up to approx. 0,6. Another system with ammonia as working fluid, SolarFrost's IceBook is under development, but it has been demonstrated in the laboratory that such a system can produce chilled thermal fluid down to -10°C powered by hot water at 95°C and a COP of up to 1,1. Both these latter sorption cooling machines are capable of cooling milk to below 4°C using waste heat from a CHP plant.

In a further techno economic evaluation, a fictional dairy farm located in Western Götaland, SW Sweden, with 160 milk cows and a biogas CHP plant using only liquid cattle manure from the farm as substrate was described. Electricity generated by the CHP plant went entirely to offset the farm's internal electricity load and recovered heat was used for maintaining the desired temperature in the anaerobic digester, hot water heating and space heating for the farmhouse.

For this fictional farm two separate cases were described:

In one case, the farm was operated with conventional milking for all the cows twice a day. For this case a new milk-cooling system was described including a pre-cooler (with the farms fresh water supply and water being used as drinking water for cattle) and final cooling of milk to below 4°C with an ice bank cooling system where ice is formed on tube banks cooled by chilled thermal fluid at -7°C from a sorption-cooling machine. The icebank solution was deemed necessary in this case due to fact that the peak-cooling loads that occur with each milking need to be coordinated with the assumed-constant heat production from the biogas CHP-plant. Heat was rejected from the sorption-cooling machine with a closed-loop cooling tower to outdoor air. This was deemed necessary to achieve sufficient cooling power during periods with high outdoor temperatures. The chilled thermal fluid loop was also connected to an outside air heat-exchanger to allow the system to exploit free-cooling for outdoor temperatures below -12°C .

In a separate case, the farm was operated with a robotic milking system, with an assumed-constant round-the-clock milk harvest. In this case also a pre-cooler was assumed. Milk was finally cooled below 4°C through direct contact with thermal fluid cooled to 0°C in a sorption-cooling machine and passed through a heat exchanger welded onto the underside of the milk tank (analogous to the evaporator in a standard direct expansion vapour compression cooling system for milk). As above, heat was rejected from the cooling machine via a closed-loop cooling tower to outdoor air. An outdoor air heat exchanger was also connected to the chilled fluid loop in this system to exploit free-cooling for outdoor temperatures below -5°C .

Energy balance calculations showed that for both the conventional and the robotic milking cases, the sorption cooling machines were capable of producing the necessary cooling power both when heat demand from the CHP plant for other end users was highest (i.e. a high demand for space heating during periods with low outdoor temperatures) and when the outdoor temperature was highest (i.e. the dimensioning summer temperature of 26°C for Western Götaland). This assumes

a sorption cooling machine with the same performance as SolarNext's currently commercialised Chillii PSC12.

LCC-comparison between the sorption-cooling systems and reference cooling systems (based on standard vapour compression cooling) for the robot and conventional milking cases showed 67% and 100% higher LCC-costs respectively for the sorption cooling systems. This is due the very high purchase price for the sorption cooling systems. Since the sorption cooling systems have higher LCC-costs, they do not in effect bestow any new value on the waste heat from the CHP plant.

In the further development of sorption-cooling systems for milk it is a priority to reduce the purchase price of the sorption-cooling machine itself. Optimising a currently commercialised machine, such as a SolarNext Chillii PSC12 for operation in the temperature regimes required for milk-cooling as well as dimensioning it specifically for the required cooling load may achieve this. A new design and production method such as that used for SolarFrost's IceBook may also be considered.

A detailed system model is particularly interesting for the future systems development of sorption cooling for milk. This would facilitate, amongst other things an improved dimensioning of system components, investigation of the possibilities to avoid a cooling tower for heat rejection, and a better description of how the sorption-cooling system can be coordinated with heat production from the CHP plant and the system's other heat loads.

Bakgrund

Kraftvärmeproduktion på en mjölkgård

Det finns en stor potential att producera biogas från gödsel på mjölkgårdar. Linne m.fl. (2008) visar att det finns potential att producera 2,7 TWh biogas/år genom att röta gödsel från svenska nötkreatur.

Gödsel innehåller upp till 90 % vatten, vilket gör att det är väldigt dyrt och energikrävande att transportera den från gården där den producerats. För att producera biogas från gödsel på en gård måste därför en småskalig biogasanläggning byggas på just den gården, såväl som att en lönsam avsättning för den producerade biogasen måste finnas i närheten. De flesta gårdar har ett stort behov av fordonsbränsle för jordbruksfordon. Emellertid måste då den rågas som produceras vid normal rötning (med omkring 60 % metan, resten koldioxid) uppgraderas till över 97 % metan och lagras för senare användning. Uppgraderingsteknik kräver stora investeringar och är inte lönsam på enskilda svenska mjölkgårdar. Brålandaprojektet har löst detta med ett koncept att koppla upp ett tiotal närbelägna gårdsanläggningar till en central uppgraderingsanläggning via ett lågtrycksgasnät (Biogas Brålanda, 2009).

Ett annat alternativ som används mycket på gårdsanläggningar i Tyskland och på några anläggningar i Sverige är småskalig kraftvärmeproduktion. Vid en sådan lösning används råbiogas som bränsle i en kolvmotor som driver en elgenerator. Värme utvinns genom att ta tillvara värmen från motorns kylvatten.

Värmeöverskott vid kraftvärmeproduktion på en mjölkgård

Figur 1 visar ett Sankey-diagram för en typisk mjölkgårdsbaserad kraftvärmeanläggning. Från 100 kWh ingående biogas genereras 30 kWh el. Strax över 50 kWh återfinns som värme i motorns kylvatten. 25 kWh av den värmen behövs för rötkammaruppvärmning. Resten av den återvunna värmen, i detta exempel 27,5 kWh, kan användas för externa uppvärmningsändamål. Det är relativt dyrt att bygga kulvertledningar för att transportera värme. Därför bör avsättningen för värmen ligga så nära kraftvärmeanläggningen som möjligt. På en mjölkgård kan detta omfatta varmvattenberedning och uppvärmning av gårdens bostadshus, men det behövs ingen uppvärmning i stallbyggnader på en mjölkgård.

Beräkningar visar att vid kraftvärmeproduktion på en mjölkgård förekommer ett värmeöverskott. Figur 1 visar att av den värme som utvinns från kraftvärmemotorn finns det 17,5 kWh som inte har någon ekonomisk avsättning.

Sorptionskyla för mjölkkyllning

Lönsamheten för en mjölkgårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning vore klart bättre om en nyttig användning för överskottsvärmen kunde hittas. Detta projekt har utförts med målet att beskriva de nuvarande tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att använda överskottsvärmen på en mjölkgård för att driva en sorptionskylanläggning för att kyla mjölk, och därmed minska gårdens interna elbehov.

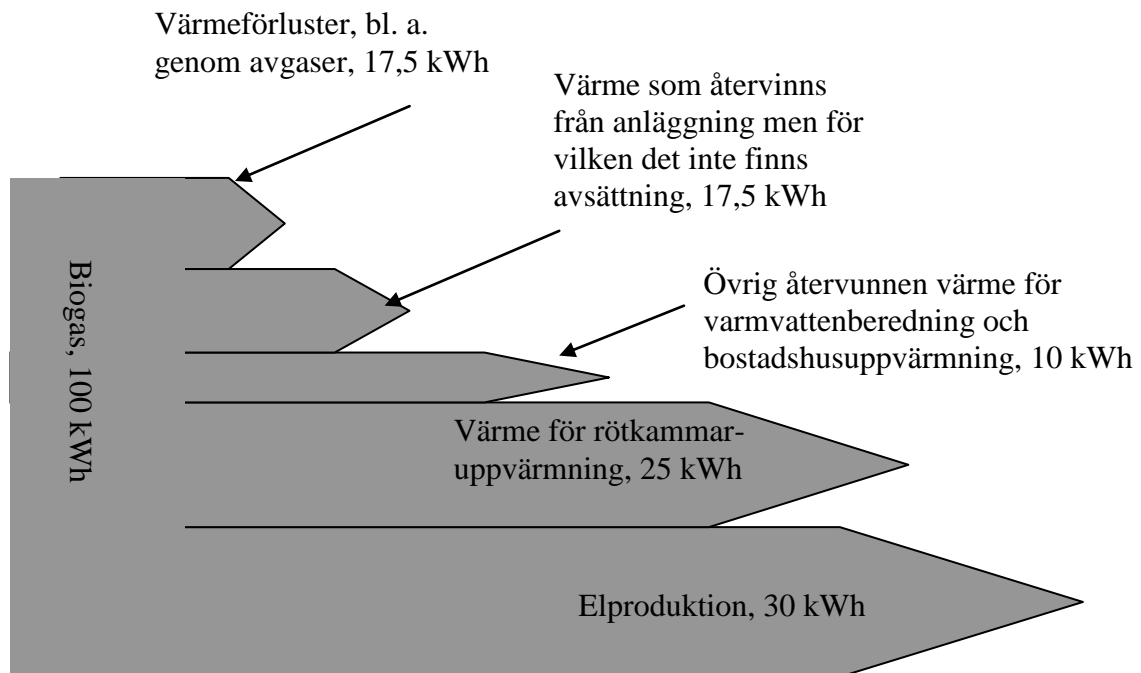
Sorptionskyla är en teknik som har funnits kommersiellt sedan 1960-talet. Till skillnad från vanlig kompressorkyla, som drivs med el, bygger sorptionskylmaskiner på en kylcykel som kan drivas direkt med värme. Beroende på den specifika tekniken kan det föreligga ett litet elbehov för att alstra kyla, men detta brukar endast utgöra 10 % av den el som en kompressorkylmaskin skulle använda för att producera samma kyleffekt.

Fram till 2000-talets början byggdes antingen mycket stora sorptionskylmaskiner för komfortkyllningsändamål i stora fastigheter, eller mycket små sorptionskylmaskiner för kylskåp till fritidsbåtar, husvagnar och hotellrum. Den första typen av anläggning är alltför stor för mjölkkyllningsändamål på en gård, och den andra typen är alltför liten. Under senare år har det emellertid pågått en utveckling mot sorptionskylmaskiner för komfortkyllning av villor och bostadshus. Det är intressant att undersöka hur den senaste utvecklingen kan tillämpas i ett sorptionskylsystem för mjölkkyllning på en gård, och vad det finns för utvecklingsbehov för sorptionskylmaskiner för detta ändamål.

Genomförande

Med fokus på de senast utvecklade maskinerna, utvärderas möjligheten att använda en befintlig sorptionskylmaskin för att kyla mjölk på en gård driven med värme från en biogaskraftvärmeanläggning. Möjligheten att anpassa en sorptionskylmaskin till befintliga tekniska system för mjölkkyllning och för värmeåtervinning från en kraftvärmeanläggning analyseras. Eventuella utvecklingsbehov för sorptionskylteknik utifrån dessa förhållanden utreds.

Med denna utvärdering som underlag skapas en systemlösning för en sorptionsanläggning för mjölkkyllning på typgårdar med robotmjölkning respektive konventionell mjölkning. Referenssystemlösningar byggda på ordinarie kompressorkyla beskrivs också tekniskt och ekonomiskt. De nya lösningarnas tekniska prestanda och ekonomiska lönsamhet jämförs med referenslösningarna. Sorptionslösningarnas effekt på lönsamheten på en gårdsbaserad kraftvärmeanläggning studeras också.



Figur 1. Sankey-diagram för en biogaskraftvärmeanläggning på en mjölkgård.

Kylkrav på mjölkgårdar

Lagstadgade krav för mjölkkyllning

Mjölken från kon håller nästan kroppstemperatur. För att förebygga bakteriell tillväxt måste den kylas. Kylning på gården utökar gårdens egen mjölklagringskapacitet och på så sätt blir de totala transportkostnaderna mellan gården och mejeriet lägre.

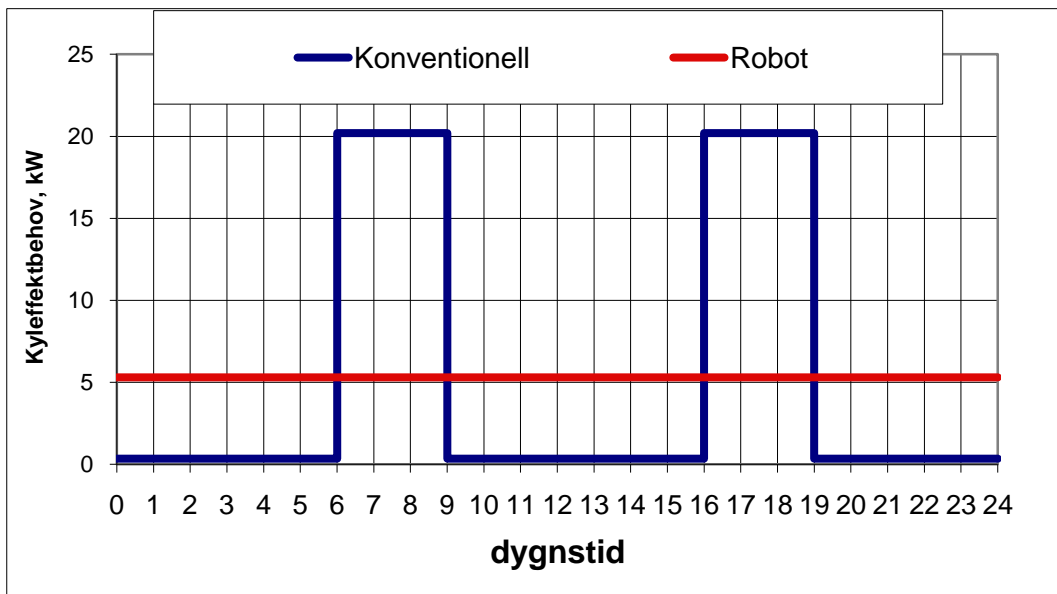
EU-standarden EN 13732, kylklassifikation CII (Svensk Mjolk, 2007) säger att mjölken ska kylas ned från 32 °C till under 4 °C inom 3 timmar efter mjölkningen. EU anger också en standard för arbetstemperatur, SOT (Safe Operating Temperature), med en övre gräns vid 32 °C och en undre på 5 °C. Praktiskt betyder detta att utrymmet där kylsystemets kondensator sitter ska ha en temperatur mellan dessa gränsvärden oavsett väderlek.

Praktiska dimensioneringskrav

I praktiken innebär dessa kylkrav att för en gård med konventionell mjölkning förekommer två kyltoppar under dagen, i anknypning till mjölkningarna. Frånsett detta finns ett kylbehov endast för att motverka värmeupptagning av den kalla mjölken från omgivningen. Detta kylbehov är avsevärt mindre än effekttopparna.

På gårdar med robotmjölkning är mjölkproduktionen mer eller mindre konstant under dagen och således är kylbehovet också mer eller mindre konstant.

Figur 2 visar schematiskt förloppet för kylbehovet för gårdar med konventionell mjölkning respektive robotmjölkning. För konventionell mjölkning uppstår kyltoppar i samband med dagens mjölkningar, som i detta fall är kl 06:00 på morgon och 16:00 på eftermiddagen varje dag. Kyleffektbehovet vid robotmjölkning är i stort sätt konstant under dagen på grund av att mjölkproduktionen är mer eller mindre konstant.



Figur 2. Kyleffektbehov för mjölk på en mjölkgård med 160 kor med konventionell mjölkning respektive robotmjölkning.

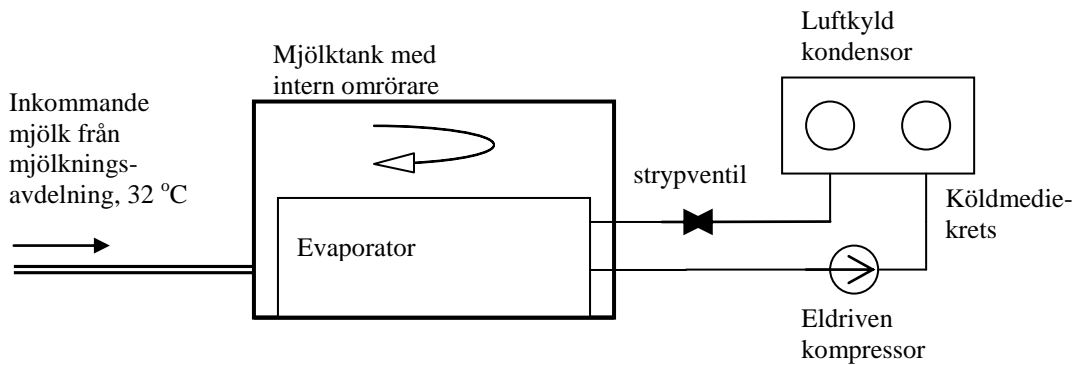
Kylteknik på mjölkgårdar

Idag används kompressorkylteknik för att kyla mjölk på mjölkgårdar. Tekniken fördelas mellan direktexpansionssystem, indirekta expansionssystem och system med iskyla. Alla dessa typer av system kan kombineras med system som förkyler mjölken innan den slutliga nedkylningen till under 4 °C, såväl som system som återvinner värmen från kylanläggningens varma sida.

Direktexpansionskyla

Direktexpansionskyla utgör det tekniskt enklaste mjölkkylningsystemet. Som redovisas i figur 3, omfattar tekniken ett enkelt luftkylt kompressorkylaggregat, där förångaren är fastgjuten till mjölk tankens hela undersida. Både mjölk tanken och förångaren är i rostfritt stål (DeLaval, Internet, 2009).

Mjölken, vars temperatur ligger några grader under kons kroppstemperatur, kommer in till tanken från mjölkningssavdelning för att kylas ned i tanken till under 4 °C. Denna teknik är den vanligaste på svenska mjölkgårdar idag.



Figur 3. Schemabild över direktexpansionskyla för mjölk.

Mjölk tanken är utrustad med en omrörare som används för att undvika termisk stratifiering i tanken. Särskilt ska det förebygga påfrysning av mjölk på tankens undersida, vilket kan inträffa om temperaturen i förångaren hamnar under 0 °C.

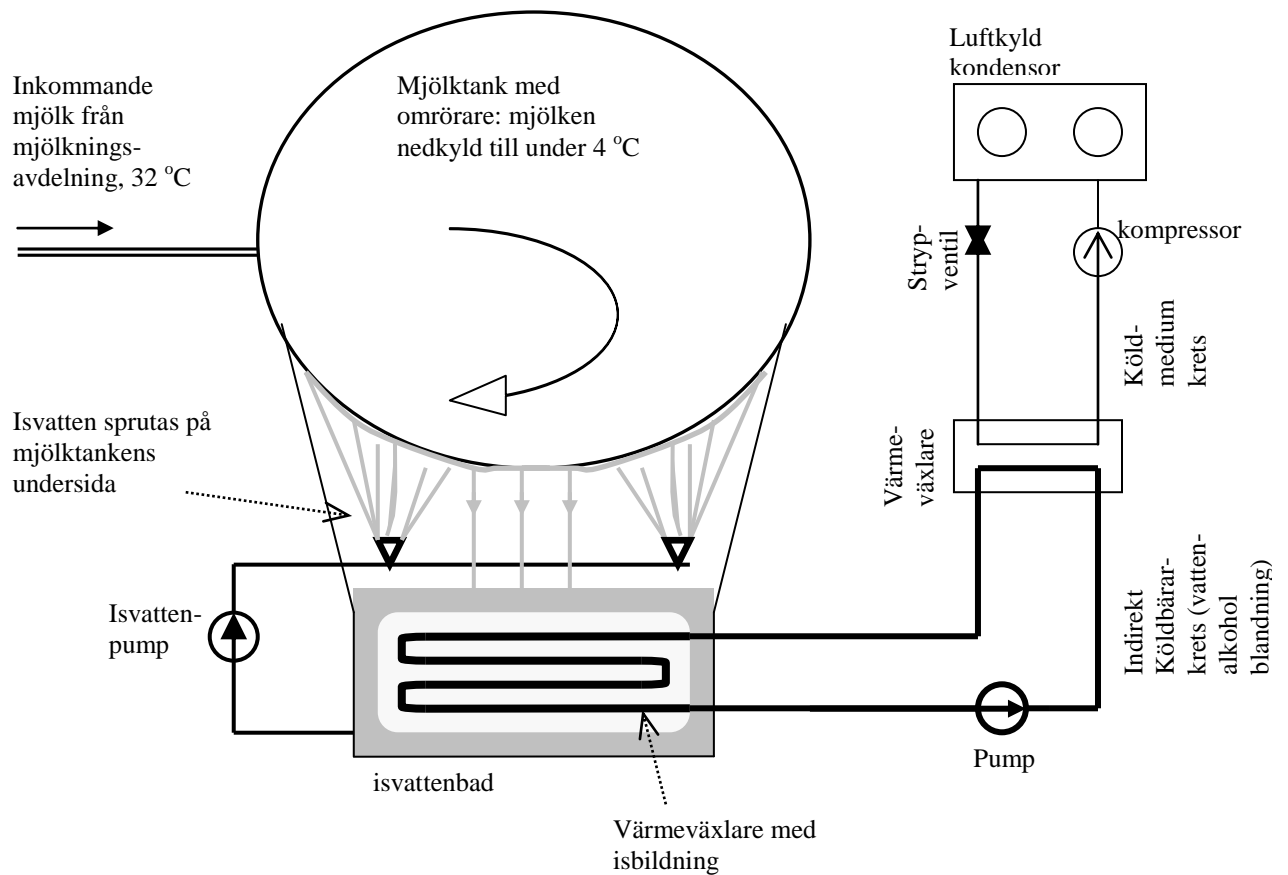
Indirekt kylning med is

Figur 4 visar en schematisk bild på ett iskylsystem för mjölk. I detta system alstras kylan av en kompressorkylanläggning för att överföras till en extern köldbärarkrets (DeLaval, Internet, 2009). Köldbärarkretsen är kopplad till en rörvärmeväxlare i ett vattenbad. Vattenbadet kan antingen ligga vid sidan om eller, som visas i figur 4, direkt under mjölk tanken. När kylanläggningen är i drift, bildas is på rörvärmeväxlaren i vattenbadet. Vattnet precis intill isrören håller i stort sätt 0 °C, så kallat isvatten. Som visas i figur 4 överförs kylan till mjölk tanken genom att isvattnet sprutas på mjölk tankens undersida.

Kyl tanken vid ett iskylsystem är också utrustad med en omrörare för att förebygga termisk stratifiering. Tack vare att kylan överförs till mjölken med isvatten (vars temperatur alltid ligger strax över 0 °C) minimeras risken för att ispartiklar bildas i mjölken.

Ett iskylsystem möjliggör en kompakt och effektiv kyl lagring i isen. Detta gör att det kraftigt varierande effektförloppet, som visas i figur 2, för konventionell mjölkning kan matchas mot en kylanläggning som arbetar mer eller mindre konstant under dygnet med en mer eller mindre konstant eleffekt. Dessutom kan ett iskylsystem drivas nattetid, när elen kan vara billigare att köpa in.

Emellertid är den totala elförbrukningen för att kyla en viss mängd mjölk något större med en iskylanläggning än med en direktexpansionsanläggning. Detta beror delvis på att det förekommer förluster vid islagring. Samtidigt kräver kylalstring för att producera is mer el än vid direktexpansionskyla eftersom det krävs en lägre temperatur från kylmaskinen för att alstra is, vilket medför en relativt högre elförbrukning.



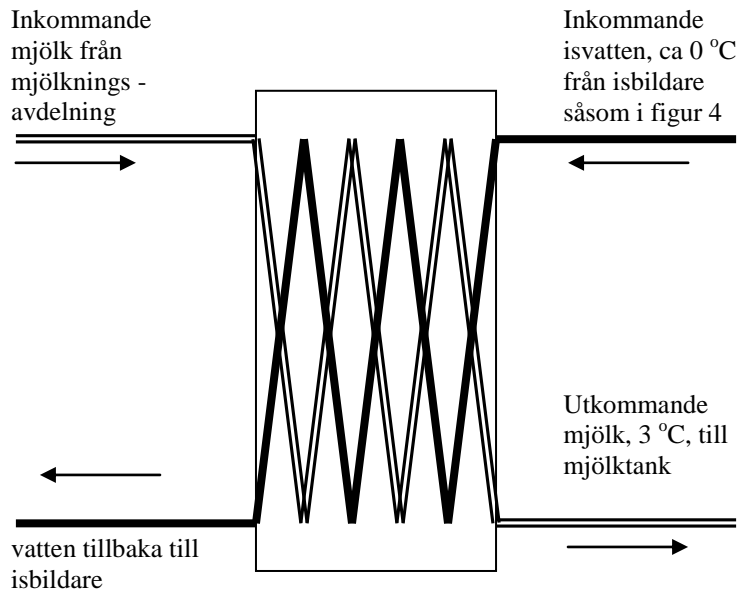
Figur 4. Systemuppbyggnad för is kylsystem för mjölk.

Momentankylning

Is kylsystem kan med fördel kombineras med system för momentankylning av mjölk. I ett sådant system förs mjölken från mjölkkningsavdelningen genom en plattvärmeväxlare innan den kommer till mjölktanken. På andra sidan av plattvärmeväxlaren strömmar isvatten från ett isvattenbad, figur 5, vilket kyler mjölken till under 4 °C. Mjölken skickas därefter till en isolerad mjölktank för lagring (DeLaval, Internet, 2009).

På detta sätt kyls mjölken ned redan innan den går in i mjölktanken. Detta medför minskad bakterielltillväxt och en högre kvalitet på mjölken, samtidigt som fördelarna med iskyla utnyttjas.

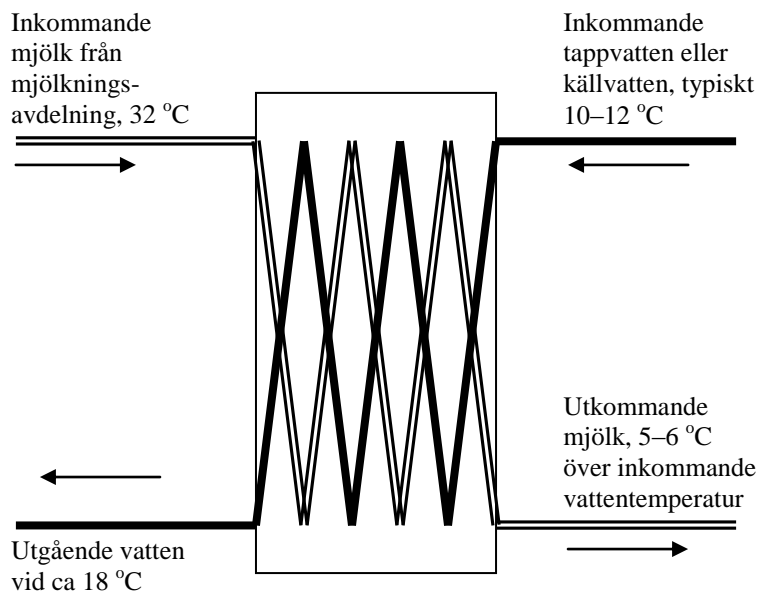
Momentankylning används vid mjölkkningsrobotsystem och på mycket stora gårdar (De Laval, Internet, 2009).



Figur 5. Plattvärmväxlare för momentankylning av mjölk.

Förkylning

Som vid momentankylning, så bygger tekniken för förkylning av mjölk på en motströms plattvärmväxlare (DeLaval, Internet, 2009). I en förkylningsvärmväxlare kyls mjölken från mjölkkningsavdelningen med vatten från gårdens egen kallvattenkälla, figur 6. Den inkommande mjölken till förkylaren håller en temperatur kring 32 °C. När den sedan lämnar förkylaren har temperaturen sjunkit, och ligger 7–8 °C över den temperatur som det inkommande vattnet höll.



Figur 6. Systemskiss över plattvärmväxlare för momentankylning.

Vatten som används i förkylare kan med fördel användas som dricksvatten för kor. Förkylare kan anpassas och användas tillsammans med alla ovanstående system för aktiv kyla – direkt, iskyla och momentan kyla.

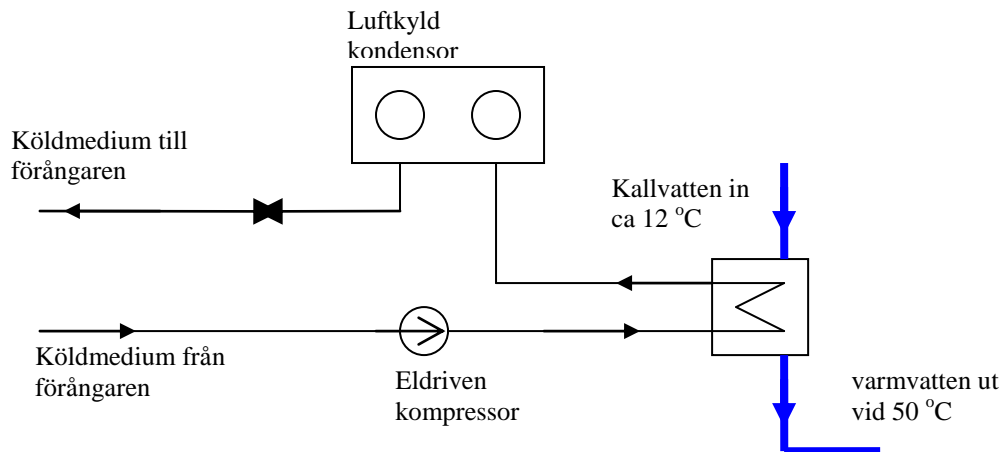
Mjölkkylning för robotmjölkningssystem

Det som är annorlunda vid robotmjölkning kontra konventionell drift är att kor mjölkas mer eller mindre konstant under hela dagen.

För att undvika isbildning i mjölken vid konventionell mjölkning, är kylkompressorerna styrda så att kylningen inte kommer igång förrän mjölkvolymen i tanken motsvarar mellan 5 och 10 % av tankens totala volym. Vid robotmjölkning skulle det ta en mycket lång tid att nå denna volym efter en tömning. Därför är mjölkkyllanläggningen på en gård med robotdrift utrustad med reglerteknik som justerar kylkompressorns kapacitet till mjölkvolymen i tanken. Från mjölkningsroboten sänds information via styrdatoren om hur mycket mjölk som har skickats till kylanläggningen. Utifrån denna information justeras kylkompressorns kylkapacitet. (DeLaval, Internet, 2009 ii).

Värmeåtervinning

Ytterligare ett sätt att ta tillvara den termiska energin i mjölken är att återvinna värmen på kompressorkylanläggningens varma sida för varmvattenberedning. Detta åstadkoms genom att koppla en plattvärmväxlare på köldmediekretsen mellan kompressorn och kondensorn, figur 7. På så sätt kan gårdens behov av varmvatten (upp till 50 °C) tillgodoses. Däremot är det omöjligt att genom denna teknik värma upp vattnet till 80 °C, vilket krävs för diskning av mjölkningssystemet (DeLaval, 2009 i).



Figur 7. Principskiss över värmeåtervinning från kompressorkylsystem för mjölkkyla.

Sorptionskyla

Introduktion

De främsta skillnaderna mellan kompressorkylteknik och sorptionskylteknik är följande:

- Vid vanlig kompressorkylteknik används el för att driva en kompressor, medans sorptionskylteknik drivs direkt med värme. Beroende på vilken typ av sorptionsteknik som används, och för vilket ändamål, kan värmekällan bestå av varmvatten eller ånga, med temperaturer på 60 °C och uppåt, eller så kan maskinen direkteldas med ett lämpligt bränsle.
- Till skillnad från en kompressorkylmaskin som endast har ett köldmedium, behöver alla sorptionskylmaskiner ett mediepar för att alstra kyla. Det ena är ett köldmedium och det andra ett sorptionsmedium. Paret väljs så att sorptionsmediet har en god förmåga att sorbera köldmediet. När sorptionsmediet är i fast form kallas det för adsorption och i vätskeform för absorption.

Teknik för sorptionskyla har funnits kommersiellt sedan 1960-talet (Tang m.fl., 1998). Att marknaden under de senaste 5-6 decennierna har föredragit kompressorkylanläggningar beror dels på fördelaktiga elkostnader, dels på de olika teknikernas effektivitet vid kylproduktion. Emellertid har det funnits en marknad för sorptionskylteknik genom åren vid situationer där

- det finns en billig värmekälla, exempelvis spillvärme från industrin
- elnätet inte är tillgängligt (långt ute på landet eller i husvagnar, husbilar)
- ett tyst kylsystem behövs (t.ex. på hotellrum)

Under 2000-talet har det dessutom pågått en utveckling av nya sorptionskylmaskiner för att använda värme från solpaneler för komfortkylningsändamål.

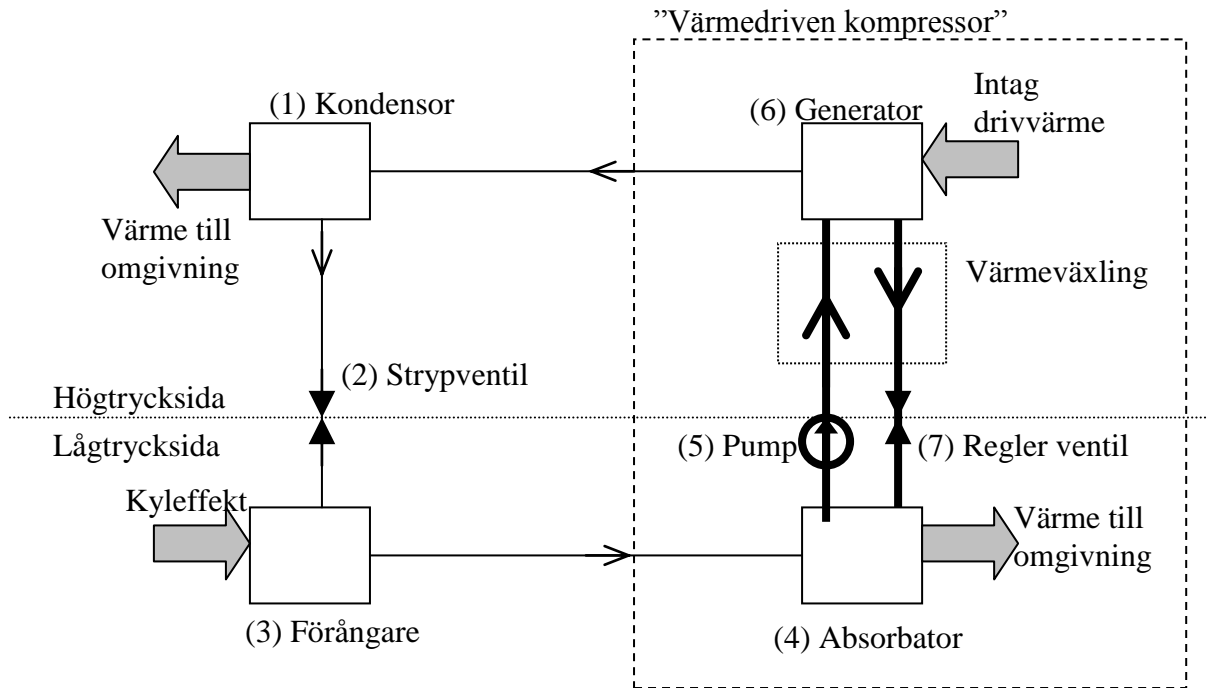
Processbeskrivning – Carrécykel absorptionskylmaskin

Det finns ett flertal olika tekniska lösningar för att använda kemisk sorption för att alstra kyla. Trots att tekniken kan variera, bygger alla sorptionskyllosningar på samma kemiska och termodynamiska processer.

Den tekniska lösning för sorptionskyla som har tillämpats allra mest sedan teknikens utveckling, baseras på Carrécykeln. Carrécykeln antar att sorptionsmediet är i vätskeform, och således är det en absorptionscykel.

Det genom tiderna mest använda medieparet har vatten som köldmedium och litiumbromid som absorptionsmedium. Det har också utvecklats Carrécykel-system med ammoniak som köldmedium och vatten som absorptionsmedium.

Figur 8 visar en systemskiss på en enkel Carrécykel, absorptionskylmaskin (se exempelvis Granryd m.fl., 2003).



Figur 8. Principskiss över Carrécykel-kylmaskin.

Den innehåller, i likhet med en kompressorkylmaskin, följande delar (med numrering enligt figur 8):

1. En kondensator där gasformigt köldmedium kondenserar till en vätska. Värmen som alstras i denna process överförs till omgivningen.
2. En strypventil, där trycket i systemet reduceras.
3. En förångare, där köldmediet förångas vid lågt tryck och låg temperatur. Termisk energi tas in från objektet som ska kylas.

I den streckade rutan till höger i figur 8 ligger den del av systemet som ersätter kompressorn i en kompressorkylcykel. Det kan ses som en värmedriven kompressor och omfattar följande delar:

4. I absorbatorn absorberas gasformigt köldmedium från förångaren i en vätskeformig lösning av köldmedium i absorptionsmediet. Värme utvecklas vid absorption och överförs till omgivningen.
5. Pumpen ökar trycket i köldmedium/absorptionsmedium lösningen, och överför lösningen från absorbatorn till generatorn. Då den specifika volymen för en vätska är betydligt mindre än för en gas, så är energibehovet för denna tryckökning betydligt mindre än energibehovet för tryckökningen i ett gasformigt köldmedium i en kompressorkylcykel.
6. I generatorn tillförs värme för att destillera köldmediet från sorptionsmediet. Rent gasformigt köldmedium strömmar ur generatorn mot kondensorn för att genomgå den vanliga kylprocessen (se punkter 1-3 ovan). Beroende på övriga processparametrar kan värmeförseln till generatorn ske antingen med varmvatten/ånga vid temperaturer mellan 60 och 180 °C, eller så kan ett bränsle, exempelvis naturgas/biogas, direkteldas.

- En lösning med låg köldmediehalt strömmar tillbaka till absorbatoren genom en reglerventil som reglerar trycket mellan systemets högtrycks- och lågtryckssida.

En värmeväxling mellan den ingående och utgående lösningen till/från generatoren bidrar till att öka systemets verkningsgrad.

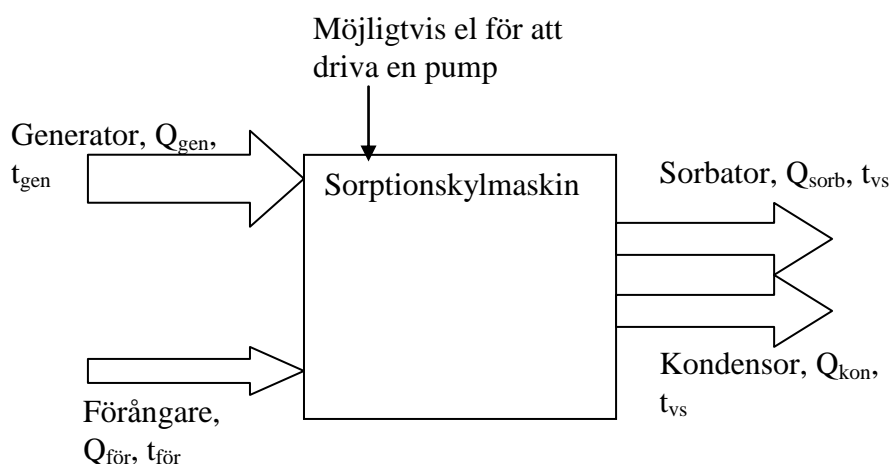
Processviktiga parametrar i sorptionskyla

Oberoende om sorptionskylmaskiner byggs direkt enligt Carrécykeln eller med en annan sorptionsteknik, omfattar alla sorptionskylmaskiner systemdelar som motsvarar generatoren, absorbatoren, kondensorn, tryckregleringsventilen och förångaren. Figur 9 visar de viktigaste tekniska specifikationerna som behövs för att beskriva prestandan för varje sorptionskylteknik.

Tre specifika temperaturer ska definieras i en sorptionskylprocess:

- Generatortemperaturen (t_{gen}). Temperaturen på den värme som används för att driva kylprocessen.
- Värmesänkningstemperaturen (t_{vs}). Det är vid denna temperatur kylmaskinen för bort termisk energi till omgivningen från sorbatorn och kondensorn. Trots att detta sker fysiskt separat vid sorbatorn och kondensorn, överförs värmen vid samma temperatur.
- Förångartemperaturen ($t_{för}$). Det är den låga temperatur vid kylmaskinens förångare som gör att termisk energi förs från objekten som ska kylas till kylmaskinen.

Det är ett termodynamiskt krav att $t_{gen} > t_{vs}$. Enligt definition av en kylmaskin, behövs det också att $t_{vs} > t_{för}$. Alltså definieras relationen mellan dessa temperaturer: $t_{gen} > t_{vs} > t_{för}$.



Figur 9. Schematisk modell för sorptionskylmaskin.

Tabell 1. Förteckning över symboler som används i figur 9 ovan.

Q_{gen}	Drivvärme till systemet vid generatoren
$Q_{för}$	Värmeupptagning av systemet vid förångaren (genom att kyla det objekt som ska kylas)
Q_{sorb}	Värmen som förs bort från systemet till omgivningen via sorbatorn
Q_{kon}	Värmen som förs bort från systemet till omgivningen via kondensorn
t_{gen}	Temperatur vid vilken drivvärme förs till systemet
$t_{för}$	Temperatur vid vilken värme tas upp av systemet vid förångaren
t_{vs}	Temperatur vid vilken värme förs bort från systemet till omgivningen via sorbatorn och förångaren

Tabell 2 sammanfattar de temperaturer som en sorptionskylmaskin ska kunna klara för att kyla mjölk på en gård med överskottsvärme från en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning.

Tabell 2. Krav gällande systemtemperaturer för en sorptionskylanläggning i ett system avsett att kyla mjölk på en gård med överskottsvärme från en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning i Sverige.

Generator	Denna temperatur bestäms utifrån den temperatur som kan återvinnas från en biogaskraftvärmemotor, tillgänglig temperatur 95 °C.
Värmesänka	Denna temperatur bestäms utifrån temperaturen i omgivningen. Vid antagandet att värme ska sänkas till uteluften så kalkyleras en temperatur för värmesänkning några grader över den högsta sommartemperaturen i Sverige, mellan 21 °C och 27 °C beroende på var man är i landet (Jonsson och Bohdanowicz, 2003).
Förångare	Förångartemperaturen måste ligga minst några grader under 4 °C för att möjliggöra att mjölken kyls ned till under 4 °C enligt EU-krav.

Utöver temperaturerna för de värmeöverföringsprocesser som pågår i en sorptionskylmaskin är systemets COP (coefficient of performance) ett viktigt mått på systemets prestanda. Som med övriga kylmaskiner, definieras denna som kvoten mellan den nyttiga kylan som alstras och energiintaget för att producera denna kyla. Alltså:

$$COP = \frac{Q_{för}}{Q_{gen}} \quad \text{Ekv. 1}$$

COP för en viss sorptionskylmaskin varierar kraftigt med de ovan nämnda temperaturerna. 0,5 till 0,7 är en mycket vanlig COP för en sorptionskylmaskin. Alltså är COP:n för sorptionskylmaskiner betydligt lägre än för kompressorkylmaskiner, som för jämförbara temperaturnivåer har en COP kring 2,0 till 2,5. För att kyla mjölk med överskottsvärme måste COP:n för en sorptionskylmaskin vara tillräckligt hög så att effektbehovet för nedkylning kan täckas med tillgänglig överskottsvärme från kraftvärmeanläggningen.

Figur 9 visar också att det kan finnas ett elbehov för att driva en pump som skall möjliggöra kylalstring med sorptionskylmaskinen. Detta elbehov brukar inte överstiga 10 % av vad en kompressorkylanläggning skulle behöva för att alstra en likvärdig kyla. Det är viktigt att elanvändningen för en sorptionskylmaskin för mjölk-

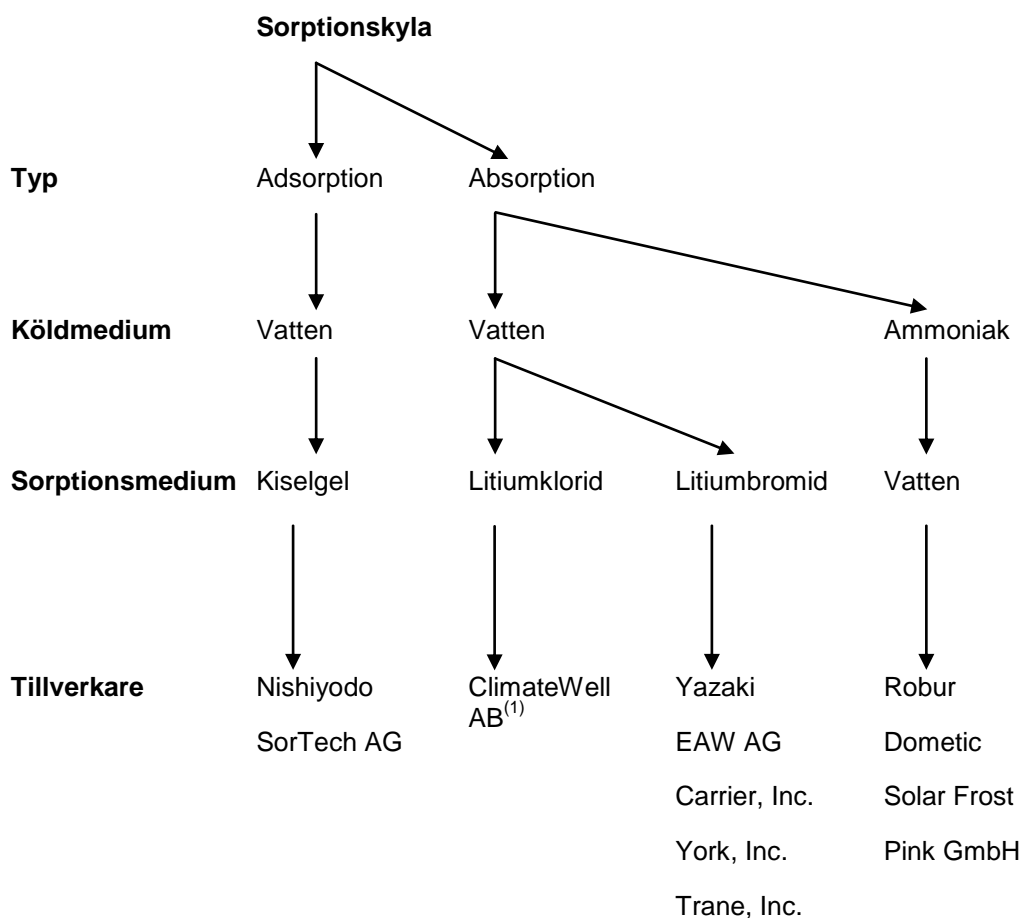
kylningsändamål är så låg som möjligt, inte minst för att ge större elbesparingar och bättre ekonomi jämfört med en referensanläggning.

Teknikgenomgång: Befintliga sorptionskylmaskiner

Tabell 3 redovisar uppdelningar och underkategorier av sorptionskylteknik som används idag. Först klassas maskiner antingen som absorptions- eller adsorptions-maskiner, beroende på om sorptionsmediet är vätskeformigt eller fast. Maskiner byggs med silicagel (fast), litiumbromid, litiumklorid eller vatten som sorptionsmedium. Litiumbromid och litiumklorid är fasta material. Emellertid betraktas kylmaskiner med litiumbromid som sorptionsmedium tillhöra gruppen absorptionsmaskiner, detta beroende på att i sådana maskiner är litiumbromid endast närvarande som löst i vatten (med varierande koncentrationer). ClimateWells teknik bygger, till skillnad från annan sorptionskyla, på litiumklorid som sorptionsmedium, och vid denna teknik är litiumklorid närvarande såväl i fast som lös form, beroende på i vilken del av kylcykeln som den befinner sig i. Här klassificeras tekniken som en absorptionsteknik, men ska egentligen betraktas som både absorption och adsorption. ClimateWell kallar det för ”triple state technology” (tretillståndsteknik).

Vidare är maskiner uppdelade beroende på om vatten eller ammoniak används som köldmedium. Tabellen visar slutligen tillverkare för de olika underkategorierna.

Tabell 3. Underkategorier för sorptionskylteknik.



(1) ClimateWell 10, tekniken som tillverkas och marknadsförs av ClimateWell AB, har både ab- och adsorption, men klassas här som absorption

Tabell 4. Sorptionskylmaskiner.

Företag	Yazaki	EAW	Climate-Well	Solar Frost	Robur	Pink, SolarNext
Produktbenämning	WFC-SC5	Wegracal 15	Climate-Well 10	IceBook ⁽¹⁾	ACF60-00LB	Chillii PSC12
Köldmedium	Vatten	Vatten	Vatten	Ammoniak	Ammoniak	Ammoniak
Sorptionsmedium	Litium-bromid	Kiselgel	Litium-klorid	Vatten	Vatten	Vatten
Driftspecifikationer⁽⁴⁾						
Temperatur, ingående vatten, generator, °C	88	90	80	65	150 – 200 ⁽²⁾	85
Temperatur, ingående vatten, värmesänkning, °C	31	30	30	10	35 ⁽³⁾	29
Temperatur, utgående kylbärare, förångare, °C	7	11	5	-5	7,2	6
COP	0,7	0,7	0,68	0,95	0,53	0,65
Kyleffekt, kW	17,5	15	4	ej aktuell	13,3	10,6
Processbegränsningstemperaturer⁽⁵⁾						
Minimumtemperatur, ingående värmeöverföringsvatten, generator, °C	70	80	50 °C högre än värmesänka	Ej angiven	Ej angiven – direkt gaseldning	75
Lägsta möjliga temperatur, utgående köldbärare, °C	7	6	4	-40	-10	-7
Referens	Yazaki (2007) och Yazaki (2009)	EAW (2008)	Climate-Well (2008)	Kunze, (2008), och Kunze (pers.medd)	Robur (2009)	SolarNext, (2009) och Pink (pers.medd)

- (1) Maskiner enligt specifikationer har endast demonstrerats som prototyp och finns inte kommersialiserad
- (2) Maskinen är uppbyggd för direkt eldning med fossilgas (så kallad naturgas). Emellertid finns det modeller i drift som har byggts om för eldning med termisk olja (Ayadi, 2008).
- (3) Maskinen har direkt kylning av kylmedium mot omgivande luft
- (4) Här redovisas prestanda vid namnskytt kyleffekt.
- (5) Här redovisas de processbegränsningar för systemet

Tabell 4 redovisar driftparametrar för sorptionskylmaskiner på marknaden med en kyleffekt upp till 17,5 kW, en lämplig begränsning för mjölkkylningsändamål. För varje maskin redovisas data i två delar:

Driftspecifikationer: Tillsammans utgör dessa data en komplett beskrivning över prestanda under vanliga driftförhållande för varje maskin. Dessa data skall användas försiktigt vid jämförelse av en maskin mot den andra. För att kunna utföra en direkt jämförelse mellan två maskiners COP så skulle det utföras då alla andra parametrar (dvs. generatortemperatur, temperatur för värmesänka och förångartemperatur) är

likställda. Emellertid är de offentligt tillgängliga prestanda och data för respektive maskin presenterad vid olika värde för de ovan nämnda parametrarna för varje maskin. Ibland redovisar tillverkare prestandadata i diagram. Dessa diagram presenteras inte i denna rapport utan det rekommenderas att studera referenser till respektive maskin redovisade i tabell 4.

Processbegränsningstemperaturer: Under denna rubrik i tabell 4 så redovisas för varje maskin de begränsningarna som finns gällande generator temperaturen och förångartemperaturen. Dessa är viktiga för att kunna stämma av maskinerna mot de redovisade och fastställda kraven för mjölkkyllning enligt tabell 2.

Jämfört med kompressorkyla så är marknaden för sorptionskylmaskiner relativt liten. Kompressorkylmaskiner finns i ett flertal modeller i varierande storlek från ett par kW_{kyla} upp till flera hundra kW_{kyla} (se exempelvis Ahlsell, 2009). Sorptionskylmaskiner byggs däremot i ett begränsat antal storlekar. De redovisade kyleffekterna i tabell 4 är kyleffekter för varje företags minsta maskin, vid redovisade driftstemperaturer. Solarfrost Icebook är ett system som för närvarande inte är kommersiellt, och finns bara i prototypform.

Med ett undantag, växlar alla de redovisade kylmaskinerna värme/kyla med övriga objekt *indirekt*. Alltså för alla kylmaskinernas delenheter (generator, sorbator, förångare och kondensor) växlas värme/kyla mot respektive källa/sänka via värmebärande eller köldbärande vätskekretsar (såsom glykol eller saltvatten). Undantaget är Robur ACF60-00LB. För denna maskin är generatoren uppbyggd för direktledning med fossilgas. En sådan maskin har emellertid byggts om för att möjliggöra värmeförsörjning till generatoren med termisk olja (Ayadi, 2004). Värme från sorbatorn och generatoren förs bort direkt till omgivande luft via en inbyggd kylmedelkylare.

Sorptionskylmaskiner med vatten som köldmedium

Tre av sorptionskylmaskinerna i tabell 4 har vatten som köldmedium. Dessa maskiner byggs för komfortkylmarknaden, där vatten är ett perfekt köldmedium och kan nå ned till de temperaturer som krävs för detta ändamål.

Emellertid, på grund av att vatten fryser runt 0 °C (vid alla tryck som är lämpliga för sorptionskylmaskiner) kan temperaturer enbart ned till något över 0 °C erhållas vid förångaren i sådana kylmaskiner. I och med att samtliga dessa kylmaskiner levererar kyla till objektet som ska kylas indirekt förekommer en temperaturslip mellan förångaren och köldbärare. Tabell 4 visar att kylmaskiner med vatten som köldmedium endast kan leverera köldbärare på 4 °C. Alltså kommer dessa maskiner inte att klara av kravet att kyla mjölken till under 4 °C. Att producera köldbärare under cirka 10 °C orsaker dessutom betydligt lägre COP jämfört med de som redovisas för vanliga driftförhållande i tabell 4. Detta orsaker en högre värmeförbrukning för att nå det erforderliga kylbehovet samt högre investeringskostnader för att sänka mer värme från systemet för en given kyleffekt.

En tänkbar lösning vid användning av dessa maskiner för att kyla mjölk är att använda sådana maskiner för en förkylning av mjölken, i kombination med en kompressorkylanläggning för den slutliga nedkylningen under 4 °C. En sådan lösning skulle å andra sidan medföra ett komplicerat system med höga investeringskostnader för två kylmaskiner.

Emellertid är det inte fysiskt omöjligt att en sorptionskylmaskin med vatten som köldmedium kan kyla mjölk ned till under 4 °C. Det är exempelvis tänkbart att vatten förångas i direkt termisk kontakt med mjölken. Att förverkliggöra en sådan lösning skulle behöva en stor utvecklingsinsats.

Sorptionskylmaskiner med ammoniak som köldmedium

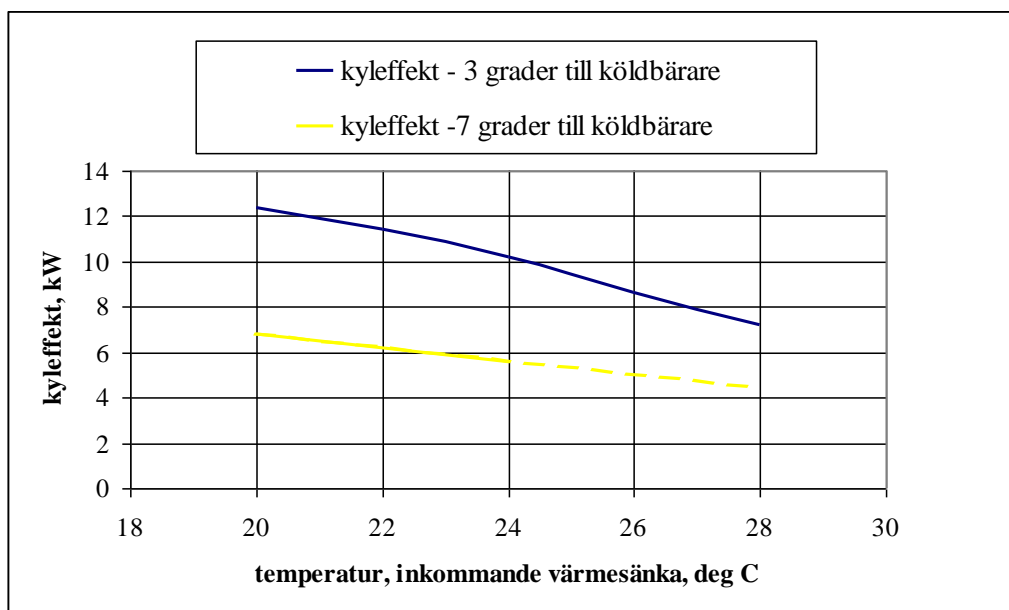
Tabell 4 visar att förutom vatten, finns det kylmaskiner idag som använder ammoniak som köldmedium. Med ammoniak är det tekniskt möjligt att nå temperaturer så lågt som -50 °C. Tabell 4 visar att alla ammoniakmaskinerna på marknaden kan leverera köldbärare med temperaturer under 0 °C. Alltså ska alla dessa maskiner klara kravet att kyla mjölk till under 4 °C.

Företaget Dometic, som nämndes i tabell 3, tillverkar kyl- och frysskåp för husvagnar, kryssningsfartyg och hotellrum. Dessa byggs enligt Platen-Munters cykel (se exempelvis Granryd, 2003). Detta skiljer sig från Carrécykeln genom att Platen-Munters cykel inkluderar en termisk pump, och alltså kan fungera helt utan tillsatt el. För mobila applikationer brukar Dometics kyl- och frysskåp eldas med gasol, och på kryssningsfartyg kan uppvärmning ske med el (i dessa sammanhang är det låg ljudnivå som är viktig, inte energilag för drivenergi). Dessa lösningar byggs i mycket liten skala (max några hundra W). De har mycket låga COP, i storleksordning 0,2 till 0,3. Detta är tillfredsställande för de små anläggningar och speciella applikationer som de används för idag. En kraftig förbättring i COP och utveckling för att drivas med varmvatten från en biogaskraftvärmeanläggning skulle behövas för en effektiv energianvändning vid kylning av mjölk.

Som redovisas i tabell 4, så kräver Roburs kylmaskin direkt bränsleeldning vid generatoren för att driva kylprocessen. Det är fysiskt möjligt att använda en sådan maskin med direkt biogaseldning. Emellertid skulle en sådan lösning förbruka mer biogas för kylningsändamål än om en kompressorkylanläggning skulle drivas med el producerad i en biogaskraftvärmeanläggning. Detta bedöms inte vara ekonomiskt fördelaktigt för biogasproduktion på gården.

Ayadi m.fl. (2008) beskriver hur en Robur kylmaskin har byggts om för att den ska drivas med värmebärande olja vid omkring 200 °C. Det är tekniskt möjligt att återvinna energi från en biogaskraftvärmeanläggning vid temperaturer uppemot 200 °C genom att återvinna värme från avgaser. För att göra det skulle det behövas ett värmeåtervinningssystem med högt tryck med just värmebärande olja eller ånga, och det finns ingen teknik tillgänglig idag för det med konventionella småskaliga biogaskraftvärmemotorer. Även här skulle det krävas utvecklingsinsatser.

SolarNext har kommersialiserat en kylmaskin, Chillii PSC12, med ammoniak som köldmedium. Som visas med driftparametrarna i tabell 4, är maskinen optimerad för att producera en köldbärare vid 6 °C, och är alltså optimerad för komfortkyländamål. Emellertid, enligt personlig kontakt med företaget, ska maskinen klara av att leverera en köldbärare på en så låg temperatur som -7 °C med inkommande drivvärme till generatoren vid 95 °C. Vid sådana drifttemperaturer sjunker COP:n och kyleffekten jämfört med driftparametrarna som redovisas i tabell 4. Figur 10 och tabell 5 redovisar kyleffekt och COP för en Chillii PSC12 för en inkommande generatortemperatur på 95 °C och en utkommande köldbärartemperatur på -3 °C respektive -7 °C (Pink, pers. medd., 2009).



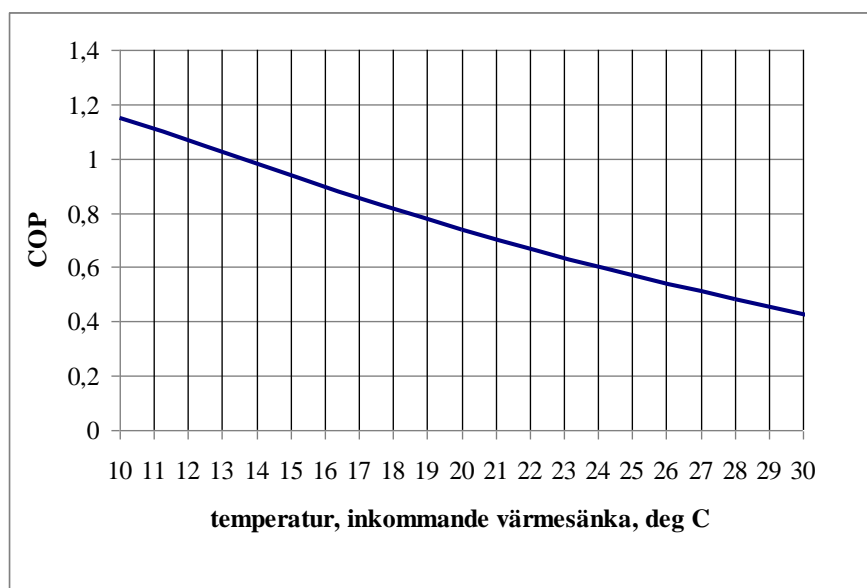
Figur 10. Prestandadata för Chilli PSC12 för utgående köldbärare på -3°C respektive -7°C och generatortemperatur på 95°C (Pink, pers. medd., 2009). Den streckade linjen i figuren är en prognos från data erhållna vid personlig kontakt med företaget.

Tabell 5. COP för Chilli PSC12 vid driftförhållanden lämpliga för mjölkkyla med överskottsvärme från en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning.

Generatortemperatur, $^{\circ}\text{C}$	temperatur värmesänka, $^{\circ}\text{C}$	Köldbärartemperatur, $^{\circ}\text{C}$	COP
95	28	-3	ca 0,45
95	28	-7	ca 0,4

Solar Frost har vidare utvecklat en standard ammoniak sorptionskylare genom att kraftigt förbättra generatorns förmåga att avskilja ammoniak från vatten och samtidigt öka kylcykelns interna värmeåtervinning (Kunze, 2008). Som redovisas i tabell 4, är det med denna teknik möjligt att nå den låga temperatur som behövs för att kyla mjölken i utgående köldbärare med en generatortemperatur kring 95°C (Kunze, pers. medd., 2009). Figur 11 visar COP för SolarFrosts Icebook-teknik med en köldbärartemperatur på -10°C och generatortemperatur på 95°C . COP för denna teknik håller en förhållandevis hög nivå för köldbärartemperaturer lämpliga för mjölkkyllning (även för iskyla) med värmesänkatemperaturer ändå upp till 30°C .

SolarFrosts Icebook är ingen kommersialiserad produkt. Tekniken har praktiskt bevisats i laboratoriet. Just nu pågår kommersialisering av tekniken för komfortkyllningsändamål (dvs. för köldbärartemperaturer kring 10°C). Det finns intresse hos tillverkaren att kommersialisera produkten för köldbärartemperaturer ned till -10°C , men det krävs vidare finansiering.



Figur 11. COP för SolarFrost Icebook som funktion av temperaturen på inkommande värmebärare för värmesänkan. Utgående köldmedeltemperaturen på -10°C och generator temperatur på 95°C (Kunze, pers. medd., 2009)

Diskussion och möjliga spår för vidare utveckling av sorptionskyla för mjölk

Det finns tre möjliga spår för framtida tekniska utvecklingar av ett sorptionskylsystem för mjölk:

Sorptionskylteknik med vatten som köldmedium och direkt förångning.

Denna teknikutveckling kräver att vatten direktförångas mot mjölken. På så sätt ska det vara möjligt att nå en temperatur under 4°C i mjölken via sorptionskylteknik med vatten som köldmedium.

Standard ammoniak sorptionskylteknik med värmeåtervinning vid högtemperatur. För att bygga ett kylsystem med standard ammoniak sorptions-teknik som ska kunna kyla mjölken under 4°C så behövs en hög generator-temperatur, uppemot 200°C . Detta erfordrar en av två möjliga systemlösningar. Den ena är direktledning av biogas för kyländamål (vilket inte är ekonomiskt intressant), och den andra att värme från kraftvärmeanläggningen återvinns vid 200°C , vilket betyder utrustning för värmeåtervinning som inte är aktuell med dagens teknik för mindre biogaskraftvärmeanläggningar.

Vidareutvecklad sorptionskylteknik för ammoniak med standard värmeåtervinning från en biogaskraftvärmeanläggning. SolarNext har en kommersialiserad kylmaskin, Chillii PSC12, som kan kyla mjölk under 4°C med drivvärme till generatoren vid 95°C , trots att denna ännu inte är optimerad för drift i de temperaturområdena. I följande kapitel har en systemlösning för sorptionskyla på en mjölgård skapats, baserad på en kylmaskin med egenskaper som SolarNext:s Chillii PSC12. SolarFrost Icebook skulle också klara av att kyla mjölk med överskottsvärme från en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning, men är inte en kommersialiserad teknik ännu.

Systemlösningar

Typgårdsbeskrivning

Allmänna förutsättningar

För att utvärdera de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att kyla mjölk med en sorptionskylmaskin har en lämplig typgård beskrivits. Allmänna förutsättningar för typgården är:

- 160 mjölkkor
- Mjolkproduktion vid 8076 kg mjölk/mjölkkande ko, år (medelproduktionen för svenska mjölkkor 2007, se SCB, 2009).
- Gödsel hanteras som flytgödsel och det produceras 3212 ton flytgödsel/år vid 9 % torrsubstanshalt (baserat på Edström m.fl., 2008).
- Gården har en biogasanläggning som ska producera biogas med enbart flytgödsel från besättningen som substrat.
- Gården ligger i Götalands norra slättbygder (Gns). Detta är avgörande främst för beräkning av energi och effektbehov för uppvärmning av gårdens bostadshus.
- Systemlösningar kommer att beakta ett fall där gården drivs med konventionell mjölkning och ett fall där gården drivs med ett robotmjölkningssystem.

Bilaga 1 beskriver varför just dessa förutsättningar har valts för typgården. I bilagan också ingår en beskrivning över energianvändning på typgården samt tekniska och ekonomiska uppgifter för gårdens biogasanläggning.

Energibalans för gården med biogasanläggning

Tabell 6 redovisar en elbalans för gården med elproduktion från gårdens biogas-kraftvärmearläggning. Grundberäkningar för denna balans redovisas i bilaga 1. Gårdens egen elanvändning är så hög att trots den interna elproduktionen föreligger ett behov av att köpa el från nätet. Detta betyder att vid reduktion av elanvändning med sorptionskylanläggningen för mjölkkyllning, så minskar andelen el som måste köpas från nätet. Detta ger en kostnadsminskning motsvarande inköpskostnaden för el, vilken är högre än det pris lantbrukaren kan sälja el till nätet för.

Tabell 6. Elbalans för biogasbaserad kraftvärmeproduktion på gården.

Elproduktion, biogasdriven kraftvärmegenerator, MWh/år	141
Internt elbehov för biogasanläggningen, MWh/år	11,8
Internt elbehov på gården och i bostadshus (med kylsystem för konventionell mjölkning respektive robotmjölkning), MWh/år	189/191
Kvarstående behov för inköpt el, MWh/år	53/55

Tabell 7 visar en värmebalans för gårdens biogaskraftvärmeanläggning. Den allra största delen av den nyttiga värmeproduktionen går till substratuppvärmning. Därefter används endast en liten del för uppvärmning och tappvarmvattenberedning. Det finns totalt 105 MWh/år i överskott. Denna värme är tillgänglig för användning för sorptionskylanläggningen. En fullständig beräkning för värmebalans redovisas i bilaga 1.

Tabell 7. Värmebalans för biogaskraftvärmeanläggning på gården.

Nyttig värmeproduktion, biogaskraftvärme, MWh/år	236
Internt värmebehov för substratuppvärmning, MWh/år	104
Värmebehov för varmvattenberedning på gården, MWh/år	4
Värmebehov för varmvattenberedning i bostadshus, MWh/år	3,4
Värmebehov för uppvärmning av gårdens bostadshus, MWh/år	19,8
Överskottsvärme, MWh/år	105

Tabell 8 redovisar resultat från ekonomiberäkning för gårdens biogaskraftvärmeanläggning. Trots den höga interna elförbrukningen finns det ändå ett underskott som gör att anläggningen (utan möjliga intäkter från en sorptionskylanläggning) inte är lönsam. Fullständiga ekonomiberäkningar redovisas i bilaga 1.

Tabell 8. Årlig ekonomi för gårdens biogasanläggning utan sorptionskylanläggning.

Årliga kostnader för biogaskraftvärmeanläggningen, kkr/år	207
Avsatta kostnader från elproduktion, kkr/år	148
Avsatta kostnader från användning av värme från kraftvärmeanläggning, kkr/år	31
Underskott, kkr/år	28

Definition av kylbehovet

Kyleffekt och energibehov

Tabell 9 visar grundläggande dimensioneringsuppgifter för beräkning av kyleffektbehovet. Mjölken ska kylas ned till 3 °C, alltså en säkerhetsmarginal på 1 °C under EU-kravet att kyla mjölk ned till under 4 °C. Det antas att mjölken förkylas med vatten från gårdens kallvattenkälla. Mjölken har en temperatur på 18 °C efter förkylaren. Beräkningsmetodiken för förkylaren redovisas i bilaga 2.

Ett effektbehov för att motverka värmeöverföring från omgivningen till mjölk i tanken har också beräknats med en enkel transmissionsberäkning (se bilaga 3). Detta effektbehov har beräknats vara lika för såväl robotmjölkning som för konventionell mjölkning.

Tabell 10 och 11 visar beräkningar för kylbehov för konventionell mjölkning respektive robotmjölkning på den beskrivna typgården. Det totala dagliga energibehovet för nedkylning är lika både för robotmjölkning och för konventionell mjölkning. Detta beror på att det antas att mjölken har samma temperatur när den kommer från förkylaren i båda fallen, och samma mängd energi måste således kylas bort. Emellertid är effektbehovet avsevärd högre för konventionell mjölkning kontra robotmjölkning. Detta på grund av att vid konventionell mjölkning

överförs mjölk till mjölktanken under endast två perioder under dagen jämfört med robotmjölkning, där mjölkflödet till tanken har antagits vara konstant.

Tabell 10 och 11 gäller endast beräkningar över hur mycket energi som måste föras bort från mjölken, för att uppnå det erforderliga kylbehovet. Således gäller dessa beräkningar inte för någon specifik teknisk lösning, utan utgör ett underlag för analys av systemlösningar.

Tabell 9. Grundläggande förutsättningar för beräkning av kylbehov på typgården.

Mjolkproduktion, liter/dag	3540
Mjolktemperatur till tanken, °C	18
Mjolktemperatur efter nedkylning, °C	3

Tabell 10. Beräkning av kylbehov på gården för konventionell mjölkning, med och utan förkylning.

Nedkylning per mjölkning	
Mjölkningsrutiner	2 gånger/dag
Mjölkmängd per mjölkning, kg	1770
Kylbehov per mjölkning, kWh	30,8
Kyleffektbehov	
Nedkylningstid, h	3
Kyleffekt för att kyla mjölken, kW	10,3
Kyleffekt för att motverka tankförluster, kW	0,34
Dimensionerande kyleffekt, kW	10,6
Kylenergibehov	
Kylbehov per dag, kWh	70

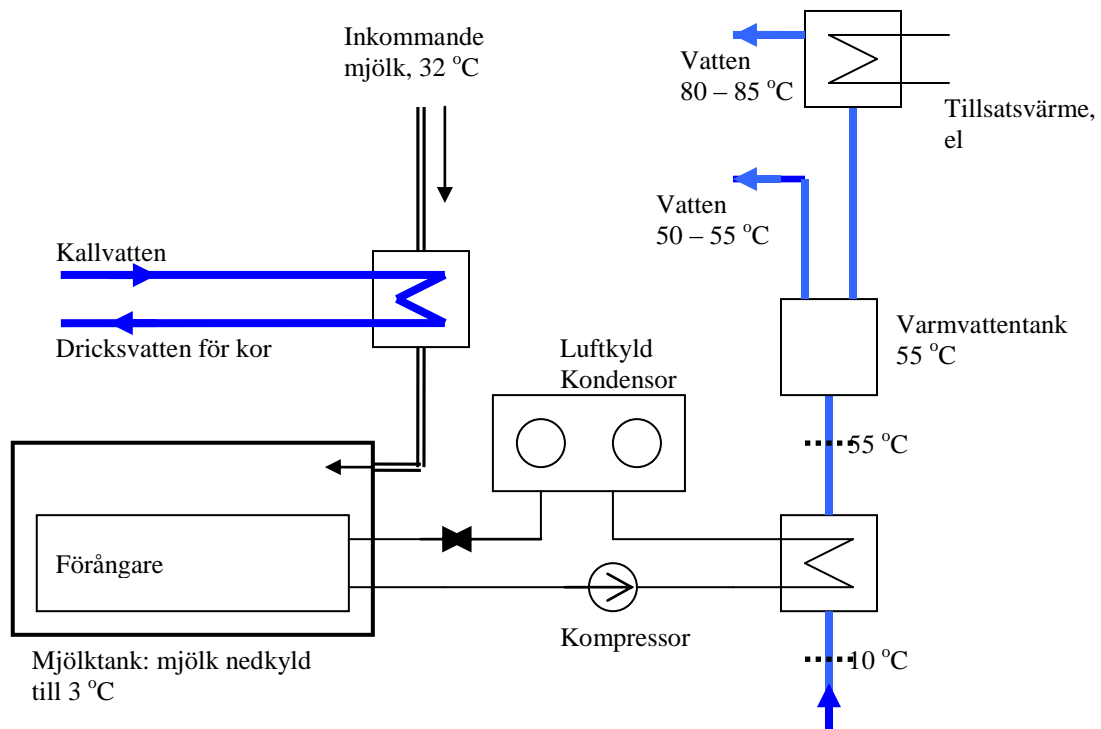
Tabell 11. Kylbehov för gård med robotmjölkning.

Dagligt kylbehov, nedkylning	
Dagligt kylbehov för nedkylning totalt, kWh/dag	62
Kyleffektbehov	
Medelkyleffekt för nedkylning, kW	2,57
Medelkyleffekt, tankförluster, kW	0,34
Dimensionerande kyleffekt, kW	2,91
Kylenergibehov	
Kylbehov per dag, kWh	70

Referensfall

Systemuppbyggnad

Referenssystemet utgörs av en mjölktank med direktexpansionskyla, förkylare och värmeåtervinning för varmvattenberedning. Samma systemskiss gäller för system med robotmjölkning respektive konventionell mjölkning. Som beskrivs senare varierar systemen med avseende på dimensioneringseffekter för komponenter såsom kylanläggningen, rör och värmeväxlare samt styrteknik. Mjölktanken som har en storlek på 8000 L är stor nog för att innehålla mjölk från två dagars mjölkning. En principskiss för referensanläggningen visas i figur 12.



Figur 12. Principskiss över referensmjölkkyllanläggning.

Energianvändning

Som underlag för vidare teknoekonomisk jämförelse mellan kompressorkylanläggningar och nya sorptionslösningar, har elbehovet beräknats för mjölkkyllning med referenssystem för robotmjölkning respektive konventionell mjölkning, se tabell 12.

Beräkningsmetodiken utgår från antagandet att elbehovet för mjölkkyllning kan, med tillfredsställande noggrannhet, beräknas från årsmedelvärdet för vald systemprestanda. Beräkningarna uppdelas i kylbehovet för nedkyllning av mjölken och nedkyllning för att motverka värmeupptagningen i tanken från omgivningen. De erforderliga kyleffekterna är tagna från de tidigare redovisade beräkningarna i tabell 10 och 11. COP-tal för kylmaskinerna har framräknats från specifikationer för en exempelkylanläggning (Tecumseh, 2009i). Till det framräknade elbehovet för kompressorer har ett elbehov för kondensatorfläktar adderats. Den slutliga elanvändningen för nedkyllning är något högre för robotmjölkning, vilket beror på att elanvändningen för kondensatorfläkten är något högre för robotmjölkningssystem.

Tabell 12. Elbehov för nedkylningsändamål för referensfall konventionell mjölkning och robotmjölkning.

	Konventionell mjölkning	Robotmjölkning
Nedkylning		
Erforderlig kyleffekt, nedkylning	10,3	2,9
COP	2	2
Erforderlig eleffekt, nedkylning	5,1	1,5
Fläkeffekt, kW	0,14	0,06
Totalt eleffektbehov, nedkylning, kW	5,28	1,51
Nedkylningstid, h/dag	6	24
Elbehov, nedkylning, kWh/dag	31,7	36,4
Tankförluster		
Kyleffekt, kW	0,34	0,34
COP	2	2
Erforderlig eleffekt	0,17	0,17
Tid för kylning enbart på grund av tankförluster, h/dag	24	24
Elbehov, kyla, kWh/dag	4,08	4,08
Totalt kylbehov		
Totalt elbehov, kyla, kWh/dag	35,8	40,4
Totalt elbehov, kyla, MWh/år	13,1	14,8

Sorptionskylsystem

Dimensioneringskrav för sorptionskylsystem

Tabell 13 sammanfattar dimensioneringskrav för sorptionskylsystem för typgården med både robotmjölkning och konventionell mjölkning. Temperaturkraven för drivenergin sätts av den temperatur som kan återvinnas från en standard biogaskraftvärmeanläggning. Sorptionskylanläggningar, mer än övriga kylsystem, gynnas av en låg temperatur för värmesänkan. Därför skulle en sorptionskylanläggning för mjölk kunna få nytta av en billig källa för kallvatten, exempelvis en bäck. Emellertid, för att de skapade systemlösningarna ska ha så breda tillämpningsmöjligheter som möjligt, så antas det att en sådan källa inte är tillgänglig. Därför antas det vid skapande av systemlösningar att värme ska sänkas till uteluften.

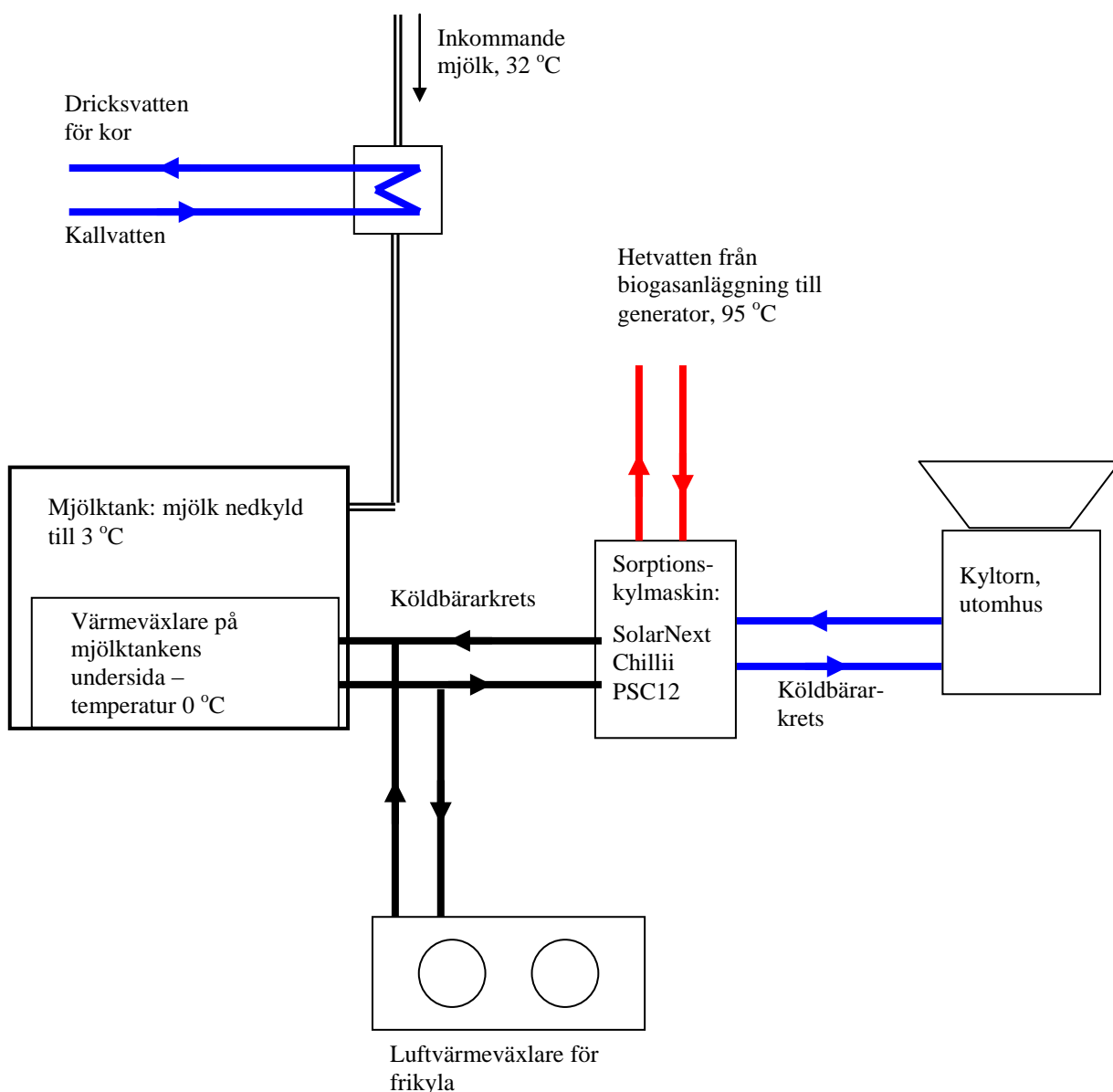
Värmeeffekten från gårdens biogaskraftvärmeanläggning ställer ett dimensioneringskrav på sorptionskylsystemet. Anläggningen har en konstant värmeproduktion på 15 kW (efter att uppvärmningsbehov för substrat har tagits bort). Utöver kylproduktion antas det för typgården att denna värmeproduktion ska kunna täcka varmvattenberedning för gården och för gårdens bostad samt uppvärmning av gårdens bostadshus. Uppvärmningen av gårdens bostadshus är kraftigt beroende på utomhustemperaturen. Ett dimensionerande krav för kylsystemet är att den erforderliga kyleffekten kan produceras även när värmebehov för övriga avnämare är som högst. Tabellen visar den vinterdimensionerande utetemperaturen när värmebehovet för övriga avnämare är som högst, vilket i sin tur ställer ett dimensioneringskrav för sorptionskylsystemet.

Den erforderliga kyleffekten för scenariet med robotmjölkning är lägre på grund av att det antas att mjölkproduktionen är jämnt fördelad under dagen (se tabell 11).

Tabell 13. Sammanfattning av dimensioneringskrav för sorptionskylanläggning.

	Robotmjölkning	Konventionell mjölkning
Temperaturer		
Drivenergi	Systemet ska drivas med värme från biogaskraftvärmeanläggningen med hjälp av en vattentemperatur på 95 °C.	
Värmesänka	Det antas att värme från kylmaskinen måste sänkas med hjälp av utomhusluften. Detta ställer krav att värme kan sänkas till luft vid 26 °C (detta är den dimensionerande utetemperaturen sommardag i Västra Götaland)	
Nedkylning	Mjölken ska kylas ned till 3 °C.	
Kyleffektbehov	En maximal kyleffekt på 2,9 kW behövs till mjölken. Med antagandet att mjölkproduktionen är konstant dygnet runt är detta effektbehov också konstant.	En maximal kyleffekt på 10,3 kW behövs till mjölken. Denna kyleffekt förekommer under 3 timmar direkt efter påbörjad mjölkning. Övriga tider är kyleffekten mindre än 1 kW.
Värmeeffekt	Värmeproduktionen på biogasanläggningen är 15 kW. Den dimensionerande utetemperaturen för uppvärmningssystemet är -22 °C.	

Systemlösning – Robotmjölkningssystem



Figur 13. Sorptionskylösning för typgårderna med robotmjölkning.

Figur 13 redovisar en möjlig systemlösning för sorptionskyla för typgårderna med robotmjölkning. Tabell 14 visar prestandaparametrar för systemet. I likhet med referenssystemet inkluderar denna lösning en förkylare eftersom det är en billig och lönsam lösning som reducerar behovet av aktivkyla.

I likhet med referenssystemet har mjölktanken dubbelbotten. I referensfallet utgjordes dubbelbotten av en förångare för nedkyllning via direkt expansion (DX). I detta fall används dock dubbelbotten istället som en värmväxlare mellan systemets köldbärare och mjölk i tanken. Temperaturen för köldbärare inkommande till tanken är strax över 0 °C. Eftersom värme överförs från mjölken till köldbäraren, så är utkommande temperaturen för köldbäraren några grader högre.

Tabell 14. Prestandaparametrar för systemlösning vid sorptionskylsystem för typgården med robotmjölkning.

Kyleffekt	
Kyleffektbehov, kW	2,9
Effekt från Chillii PSC12 vid dimensionerande systemförhållande	7,2
Temperatur	
Temperatur i köldbärare utgående ur kylmaskinen, °C	0
Temperatur för drivvärme till generator, °C	95
Dimensioneringseffekt, pumpar och fläktar	
Köldbärarpump, kW	0,15
Shuntump för generator, kW	0,05
Kyltornsfläkt, kW	0,2
Kylvattenpump, kW	0,13
Elbehov för kylmaskin, kW	0,35
Total eleffekt, kW	0,88

Kylan produceras främst i sorptionskylmaskinen. Maskinen drivs med värme från kraftvärmeanläggningen vid 95 °C. Den tidigare analysen har visat att en kylanläggning av SolarNext Chillii PSC12-typ skulle klara av erforderliga temperaturnivåer och effekter. Utöver sorptionskylmaskinen finns det en luftvärmeväxlare parallellt inkopplad på köldbärarkretsen. Dess funktion är att systemet ska kunna få nytta av den kalla uteluften under vintern, för att kyla mjölken. Frikylvärmeväxlare bidrar också till att den värme som producerats i biogaskraftvärmeanläggningen ska kunna täcka gårdens effekttoppar för bostadsuppvärmning.

Värme från kylmaskinen ska sänkas till uteluftens temperaturnivå. I detta systemförslag har ett kyltorn valts för systemet. Denna lösning har bedömts vara nödvändig (utöver en vanlig kylmedelkylare) för att kylmaskinen ska kunna sänka värmen vid en dimensionerande sommartemperatur för uteluften på 26 °C (Pink, pers. medd., 2009). Kyltornet är av ”closed-loop” typ, vilket betyder att värmebäraren går i en sluten krets men att vatten sprutas över värmeöverföringsytor i tornet vid behov (alltså vid höga uteluftstemperaturer). Tornet dimensioneras för våtdrift vid uteluftstemperaturer överstigande 16 °C. En vidare beskrivning över ett sådant kyltorns funktion ges i Granryd m.fl. (2003).

Ett kyltorn är inte en optimal lösning. Kyltorn förbrukar vatten, vilket ökar driftkostnader och resursanvändning. Samtidigt finns det en risk med kyltorn att legionellatillväxt sker om vattnet i kyltornet inte behandlas ordentligt.

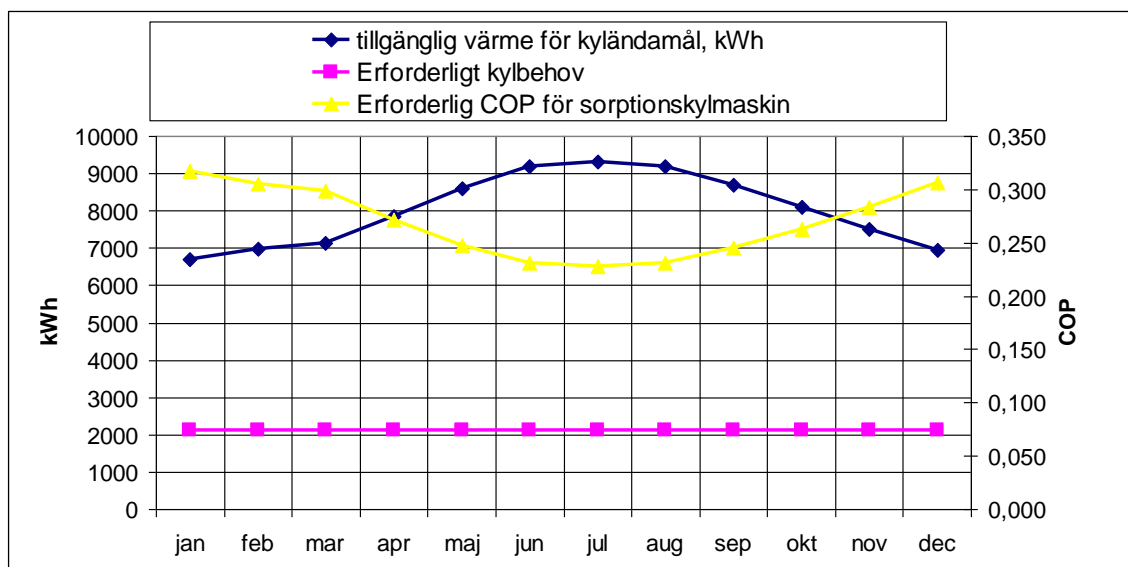
Tabell 14 visar också det erforderliga kyleffektbehovet för systemet. Kyleffekten vid systemdimensionerande utetemperatur (sommartid) från en Chillii PSC12 är över två gånger större än den effekten. Alltså är en Chillii PSC12 överdimensionerad för detta kylbehov.

Tabell 14 visar också dimensionerande effekter för systemets alla tillhörande pumpar. Sammanlagt är det totala eleffektbehovet 880 W, drygt 30 % av det redovisade kyleffektbehovet. De största förbrukarna är kylmaskinen samt kyltornet.

Energibalans

Enligt typgårdens beskrivning, så används värme från kraftvärmeanläggningen för varmvattenberedning (för gårdsändamål och i gårdens bostad) och för uppvärmning av gårdens bostad. Figur 14 visar månadsmedelvärde för den nyttiga värmen producerad på gårdens biogaskraftvärmeanläggning, som inte redan används enligt typgårdsbeskrivning. Den visar också det erforderliga månadsvisa kylbehovet. Kvoten mellan dessa variabler har beräknats för att visa den minimala COP:n som skulle behövs för en möjlig sorptionskylanläggning för mjölken.

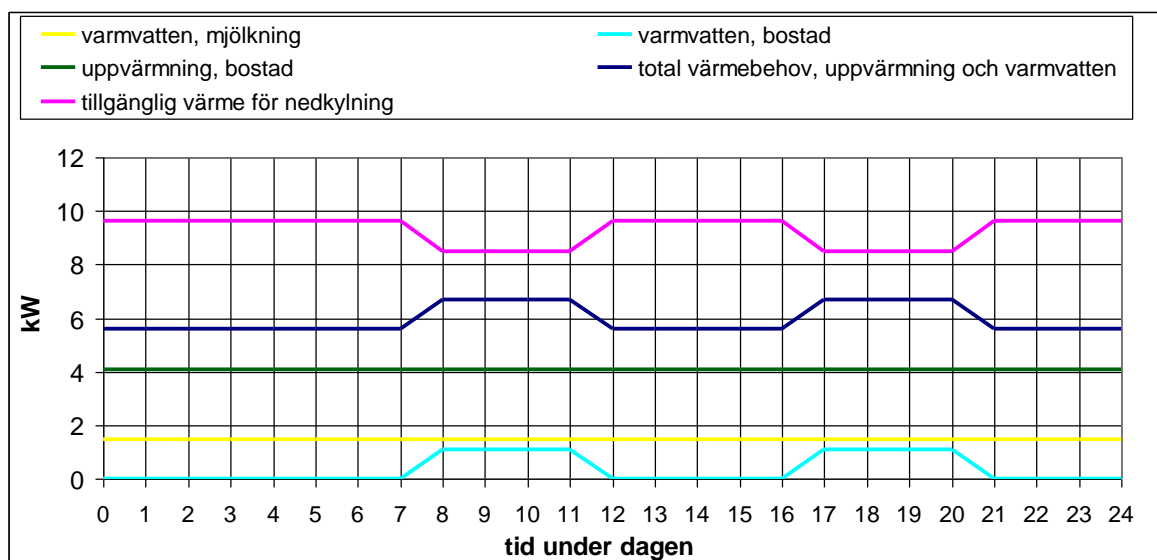
Under juli månad behövs en minimal COP på 0,23. Detta kan jämföras med COP:n för Chillii PSC12 vid 26 °C temperatur på värmesänkan, som ligger vid 0,5. Alltså skulle en Chillii PSC12 klara att leverera den erforderliga kylan (med -3 °C för utgående köldbärare och 95 °C för vätska inkommande generatoren [Pink, pers. medd. 2009]). Under kalla årstider finns mindre värme tillgänglig, men de lägre utomhustemperaturerna möjliggör högre COP för kylanläggningen även under den tiden.



Figur 14. Värme som är tillgänglig för nedkylningsändamål, kylbehov på gården.

Utöver att det är viktigt att det finns totalt tillräcklig värmemängd för att tillgodose kylbehovet för mjölken, ska även värmen vara tillgänglig vid just de tidpunkterna då kylbehovet förekommer. Detta ställer krav på kylsystemet då effektbehov för värmen i övrigt är större, alltså vid låga utomhus temperaturer.

Värmeväxlaren för frikyla i figur 13 är dimensionerad så att det totala kylbehovet för mjölkkyllning klaras vid en utelufttemperatur på -5 °C. Det är antaget att ned till -5 °C skall hela kyleffektbehovet täcks av sorptionskylmaskinen. Figur 15 visar en värmeeffektbalans för ett dygn vid -5 °C. Utöver kyla ska värme från gårdens biogaskraftvärmeanläggning tillgodose gårdens behov av varmvatten samt uppvärmning av bostaden.



Figur 15. Värmebalans under ett dygn vid -5°C utomhustemperatur.

Effektbehov för uppvärmning av bostadshuset ligger konstant vid strax över 4 kW (på grund av att uteluftstemperaturen antas ligga konstant vid -5°C). Varmvatten för diskning av mjölkningsutrustning fördels jämnt under dygnet. Detta antas vara lämpligt eftersom diskning utförs vid förutsägbara tider under dygnet. Varmvatten till bostaden produceras under morgontiden och kvällstiden. Av den 15 kW värme som återvinns från biogaskraftvärmemotorn, så finns det alltså mellan 8,5 och 9,6 kW tillgänglig under dagen för nedkylning. Dessa värmeeffekter skulle behöva en sorptionskylmaskin med en minimal COP på 0,34. Detta är klart lägre än COP på 0,6 som kan uppnås med Chillii PSC12 (se tabell 4 och 5).

El- och vattenbehov för systemlösningen

Tabell 15 redovisar det årliga elbehovet för denna systemlösning. Detta ger en elbesparing på 54 % av den el som används för att driva referensanläggningen.

Tabell 15. Elbehov för sorptionskylösning för typgård med robotmjölkning.

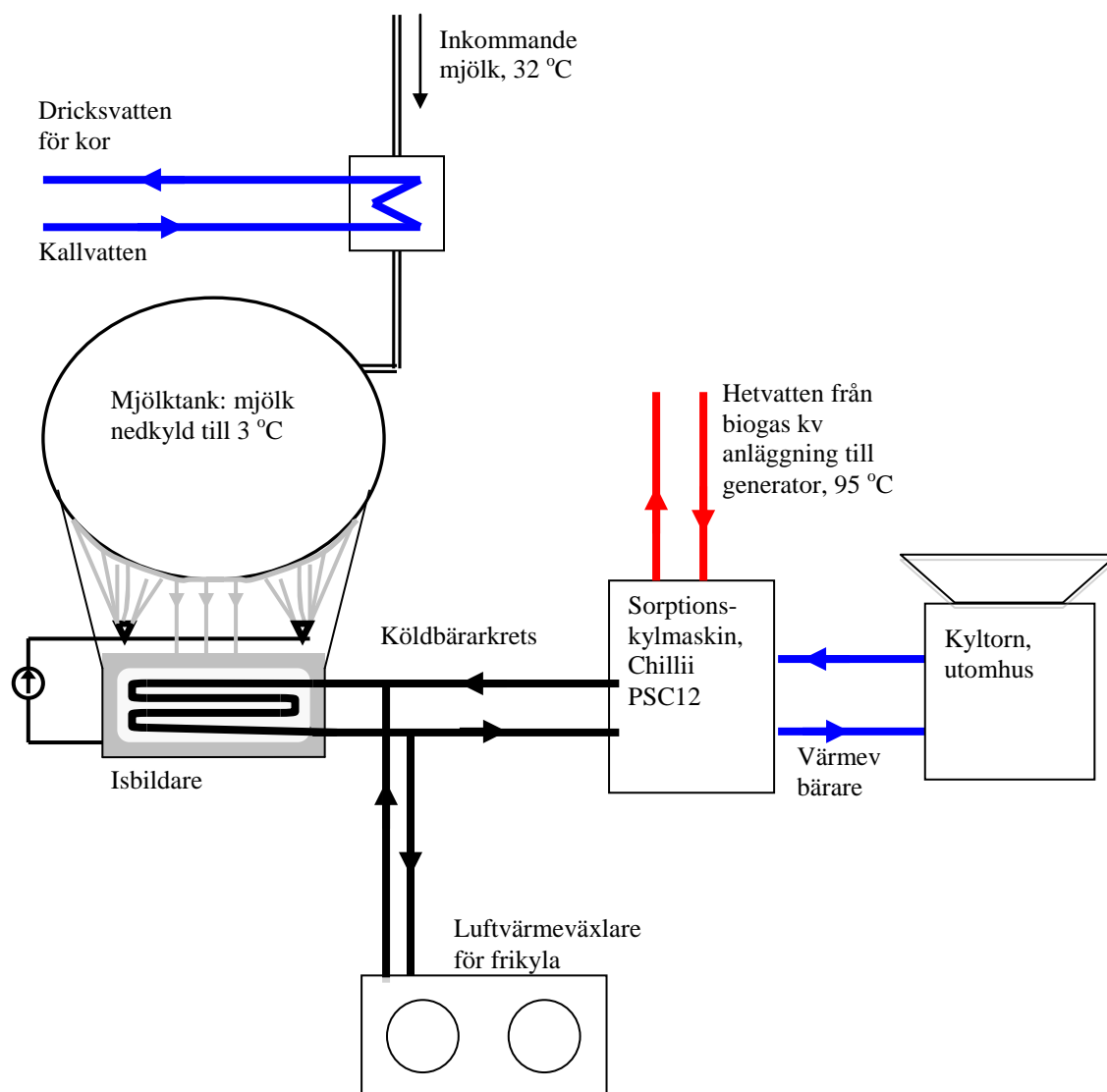
	Elbehov, kWh/år
Köldbärarpump	1314
Shuntpump för generator	438
Kyltornsläkt	53
Kylvattenpump	1139
Elbehov för kylmaskin, frikyla	3066
Totalt elbehov	6009

Tabell 16 visar det årliga vattenbehovet för kyltornet. Kyltornet är byggt så att det behövs vatten endast under årets varma perioder. Det har uppskattats att vatten behövs i kyltornet alla tider då temperaturen överstiger 16°C . Detta ger ett totalt vattenbehov på drygt 11 m^3 .

Tabell 16. Vattenbehov för kyltorn.

Användningstid för vattensprutning i kyltornet (resten av tiden kan kyltornet drivas torrt), h	1314
COP under användningstiden	0,5
Bortförd värme till vattnet totalt, kWh	8022
Vattenbehov per år, kg	10752

Systemlösning – Konventionell mjölkning



Figur 16. Sorptionskylsystem för konventionellt mjölkningssystem.

I likhet med referenssystemet inkluderar denna lösning en förkylare eftersom det är en billig och lönsam lösning som reducerar behov för aktivkyla. Sorptionskylsystemet är uppbyggd på samma vis som exemplet med robotmjölkning, med en sorptionskylmaskin, kyltorn samt luftvärmväxlare för frikyla. Emellertid så inkluderas i den totala systemlösningen en iskylanläggning intill mjölktanken. En principskiss för denna lösning visas i figur 16, och systemparametrar visas i tabell 17.

Tabell 17. Systemparametrar vid sorptionskyllösning för system med konventionell mjölkning.

Kyleffektbehov, medelvärde, kW	3,2
Temperatur	
Temperatur i utgående köldbärare, °C	- 7
Varmvattentemperatur till generator, °C	95
Dimensioneringseffekt, pumpar och fläktar	
Köldbärarpump, kW	0,15
Shuntpump för generator, kW	0,05
Kyltornsfläkt, kW	0,2
Kylvattenpump, kW	0,13
Elbehov för kylmaskin, kW	0,35
Isvattenpump	0,1
Luftpump för isvattenanläggning	0,15
TOTAL eleffekt, kW	1,13

I systemet behövs det en energilagring för att jämna ut värmeproduktionen från kraftvärmeanläggningen (som är i stort sätt konstant) mot kylbehovet med effekttoppar i anknytning till mjölkningstiderna. Det enda alternativet till islagring är att energi lagras i system som hetvatten i en ackumulatortank, så att kylan kan produceras i en kylmaskin direkt vid behov. Tabell 18 jämför lagring med iskyla med energilagring med en ackumulatortank. Ackumulatortankslösning har till sin fördel att temperaturen i köldbärare utgående från kylmaskinen endast behöver vara 0 °C (som med systemlösningen för robotisk mjölkning). Emellertid så behöver kylmaskinen ha en dimensionerad kyleffekt som är drygt fyra gånger större med ackumulatortankslösningen. Samtidigt tillåter islagring en betydligt högre lagringsdensitet (räknat per kWh/kg vatten/is) än energilagring i en ackumulatortank (den är drygt 10 gånger större för is än för vatten med de rådande systemparametrarna). Detta gör att investeringskostnaden för lösningen med ackumulatortanken skulle bli drygt 70 % högre. Därför har det bedömts att det är bättre för den nuvarande lösningen att använda iskyla.

Tabell 18. Jämförelse mellan energilagring i ackumulatortank eller som is för sorptionskylsystem för typgården med konventionell mjölkning.

	Akkumulatortank	Iskyla
Kyleffektbehov för kylmaskin	10–11 kW	3–3,5 kW
Köldbärartemperatur	En köldbärartemperatur på 0 °C räcker för systemet	En köldbärartemperatur mellan -5 °C och -10 °C erfordras (Chillii PSC12 klarar -7 °C)
Energilagring	En lagringsvolym på 5500 liter vatten skulle behövas i en ackumulatortank, räknat med driftparametrar för Chillii PSC12	Islagring ger en hög energilagringsdensitet. Emellertid når Chillii PSC12 endast -7 °C, vilket gör att värmeöverföringsytan mellan köldbäraren och islagringen behöver vara något större än med ett standard islagringssystem för mjölkkylla

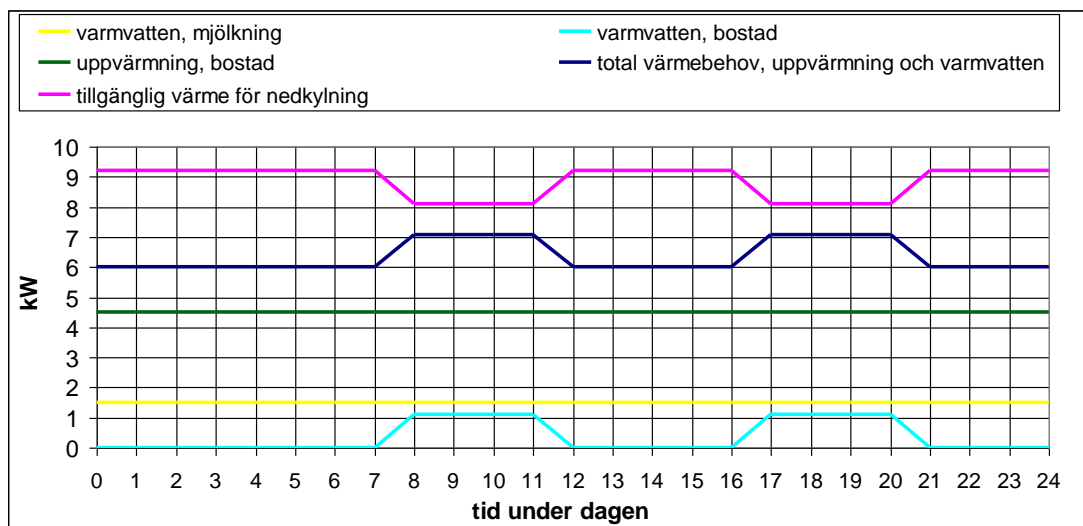
Kyleffektbehovet enligt tabell 17 är något större än det rena kyleffektbehovet som räknades fram i tabell 10 på grund av att det antas förekomma förluster i samband med islagringssystemet.

Tabell 17 visar också dimensionerande effekter för systemets alla tillhörande pumpar. Sammanlagt är det totala eleffektbehovet 1,13 kW, strax under 40 % av det redovisade kyleffektbehovet. Det stora effektbehovet förekommer på grund av elbehov för kylmaskinen samt för kyltornet.

Energibalans

Värmebehovet för kyländamål är något högre än med system för robotmjölkning på grund av den lägre köldbärartemperaturen för iskylanläggningen (se tabell 17). Det lägsta kravet på systemets COP, för sorptionskylanläggning, vilket redovisas i figur 14, är tillräckligt lågt för att det skall kunna uppnås i denna systemlösning också med en befintlig kylanläggning (såsom typ Chillii PSC12).

Figur 17 visar att i systemet ingår också möjligheten att utnyttja frikyla. Iskyla behöver en köldbärare vid -7°C och därför behövs en uteluftstemperatur på -12°C för att hela kylbehovet ska kunna täckas med frikyla (med en antagen temperaturdifferens mellan uteluft och köldbärare på 5°C). Därför antas det vid denna analys att sorptionskylanläggningen ska kunna klara av det totala kylbehovet ändå ned till en utetemperatur på -12°C . Figur 17 visar en värmebalans för värmen producerad i gårdens biogaskraftvärmeanläggning för en dag vid -12°C i uteluften. Det visar att det vid detta tillfälle finns mellan 8,1 och 9,2 kW värme tillgänglig för att driva sorptionskylmaskinen. Detta skulle kräva ett minimum COP på 0,39. En kylmaskin med liknande egenskaper som en Chillii PSC12 skall klara att nå detta COP med en säkerhetsmarginal.



Figur 17. Värmebalans för system vid en dag med -12°C i uteluftstemperatur.

El- och vattenbehov för kylanläggningen

Tabell 19 visar det totala elbehovet för denna systemlösning. Jämfört med elbehovet för referensfallet så sparar detta system 37 % av den elen som används i referenssystemet.

Tabell 20 visar det uppskattade vattenbehovet för systemets kyltorn.

Tabell 19. Elbehov för sorptionskylösning för typgården med konventionell drift.

	Elbehov, kWh/år
Köldbärrarpump	1314
Shuntump för generator	438
Kyltornsflykt	53
Kylvattenpump	1139
Elbehov för kylmaskin	3066
Isvattenpump	876
Luftpump för isvattenanläggning	1314
Totalt elbehov	8199

Tabell 20. Vattenbehov för kyltorn vid sorptionskylsystem för konventionell mjölkning.

Användningstid för vattensprutning i kyltornet (resten av tiden kan kyltornet drivas torrt), h	1314
COP under användningstider	0,5
Bortförd värme till vattnet totalt, kWh	8914
Vattenbehov per år, kg	11972

Ekonomi

Tabell 21 redovisar en beräkning på livscykelbasis över kostnaden för att kyla mjölk med såväl referens- som sorptionskylanläggning för typgården med robotmjölkning respektive konventionell mjölkning.

Beräkningarna utfördes med antagande att företagaren investerar i helt ny utrustning i varje fall. Investeringskostnader för standardmjölkkylningsutrustning har inhämtats från en tillverkare. Övriga tillverkare kontaktades vid flera tillfällen men av konkurrensmässiga skäl var ovilliga att diskutera lantbrukarens inköpskostnader för deras produkter.

Redovisade inköpskostnader för värmeåtervinningsutrustning för varmvattenberedning har inte inkluderats i inköpskostnader. Investeringskostnader för varmvattenberedning för sorptionskylsystem ingår inte heller, och således är systemgränserna jämförbara mellan referens- och sorptionslösningar.

Tabell 22 visar inköpskostnader för sorptionskylsystem. Kostnaden för delarna av systemet där befintlig utrustning för mjölkkylning finns har bearbetats från inhämtade kostnadsuppgifter från mjölkkylningsutrustningstillverkaren. Inköpskostnaden för lösningen för konventionell mjölkning är högre på grund av den högre kostnaden för iskylutrustning. Inköpskostnader för sorptionskylmaskinerna baseras på inhämtade kostnadsuppgifter för en befintlig Chillii PSC12. Kostnaden för lösningen för den konventionella gården är högre på grund av de strängare dimensioneringskraven för kylmaskinen för iskyla (för bl.a. kyltornet).

Elkostnaden baseras på kostnaden för lantbrukare att köpa el från nätet. Tabell 21 visar att i båda fallen ger den nya sorptionskylösningen avsevärd högre totala årliga kostnader. Tabellen visar att detta främst beror på de höga investeringskostnaderna för sorptionskylanläggningen. I båda fallen svarar sorptionskylanläggningen för den allra största delen av inköpskostnaden för de nya lösningarna.

Beräkningen i tabell 21 baseras på antaganden att den överskottsvärme som producerats i gårdens biogaskraftvärmeanläggning levereras till ingen kostnad. Detta antagande är relevant när gårdens biogaskraftvärmeanläggning är lönsam utan värmeavsättning för mjölkkyllning. Det grundläggande ekonomiska syftet för de nya sorptionskylösningarna är att de skapar värde för överskottsvärmen. Resultatet från LCC-jämförelsen visar att på grund av att de nya lösningarna kostar mer ur LCC-synpunkt än referenslösningarna, skapar de nya lösningarna inget värde för överskottsvärmen.

Det minskade växthusgasutsläppet för sorptionskylösningarna har beräknats för marginalel (kolkondens) med utsläpp på 1,21 kg CO₂ ekv./kWh_{el} (Johansson & Brandt, 2007).

Tabell 21. Livscykelkostnadsberäkning för referens- och sorptionskylanläggning.

	Referenssystem		Sorptionsystem	
	robot	Konventionell	robot	konventionell
Kapitalkostnader				
Inköpskostnad, kkr	141	164	378	493
Transport- och installationskostnader, kkr	20	20	30	30
Livslängd, investering, år	12	12	12	12
Ränta, %	4%	4%	4%	4%
Årliga kapitalkostnader, kkr/år	17,2	19,6	43,4	55,7
Energikostnader				
Årligt elbehov, MWh	14,8	13,1	6	8
Inköpskostnad för el, kr/MWh	870	870	870	870
Årlig elkostnad, kkr	12,9	11,4	5,2	7,0
Vattenkostnad för kyltorn				
Årligt vattenbehov för kyltorn, kg			10752	11947
Specifik kostnad för vatten, kr/m ³			14	14
Årlig kostnad för vatten, kkr			0,15	0,17
Underhållskostnader, kkr	3	3	5	5
Totala årliga kostnader, kkr	33,0	34,0	53,8	67,8
Total kostnad kr/ton mjölk	25,6	26,3	41,6	52,5
Minskade växthusgasutsläpp, kg			9,3	5,4
Kostnad för reduktion av växthusgasutsläpp, kr/ton CO ₂			2241	6292

Tabell 22. Jämförelse över inköpskostnader för kylanläggningar.

	Sorptionskylanläggning	
	robot	konventionell
Mjölktank och förkylare, kkr	108	148
Absorptionskylanläggning inklusive kyltorn, kkr	250	325
Frikyla värmväxlare, kkr	20	20
Total inköpskostnad, kkr	378	493

Standard sorptionskylteknik byggs med rörkopplingar mellan värmväxlare för systemets olika värmeintag och värmesänkning. En sådan lösning används för SolarNext:s Chillii PSC12. SolarFrost:s sorptionskylteknik, IceBook byggs annorlunda, med ett antal hoptryckta metall skivor, eller ”sidor” (Kunze, 2008). Enligt företaget tillåter detta att en IceBook kan tillverkas billigare än en sorptionskylmaskin med rörkopplade värmväxlare. IceBook är inte ännu en kommersialiserad teknik, emellertid kan inköpskostnaden för en komplett kylanläggning baserad på IceBook teknik för att klara av kraven att kyla mjölk för typgården i denna studie vara så låg som 30 kkr. Tabell 23 redovisar den möjliga inköpskostnaden för ett komplett mjölkkylningsystem baserad på IceBook teknik.

Tabell 23 visar också resultaten från en LCC-beräkning för sorptionskyllosningar baserad på IceBook-teknik. Övriga kostnader, förutom kapitalkostnader, antas vara desamma som för övriga sorptionskyllosningar vilka redovisats i tabell 21. Beräkningen visar att med dessa kraftigt reducerade inköpskostnader så kan LCC för sorptionskyllosningen understiga LCC för referensanläggningen (specifikt för lösningen för robotkyla). Emellertid är den totala besparingen mycket liten, endast 2,6 kkr/år.

Årliga kostnader för gårdens biogaskraftvärmeanläggningen uppgår till 207 kkr/år. Alltså motsvarar besparingen för denna sorptionskylanläggning drygt en halv procent av kostnaderna som måste täckas för att biogasanläggningen ska vara lönsam. Alltså kommer denna sorptionskyllosningen att ha endast en minimal påverkan på lönsamheten för en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning. Dessutom ska det poängteras att den låga inköpskostnaden för en sorptionskylanläggning baserad på IceBook teknik gäller för tillverkning av kylmaskinen på industriella produktionsvolym, medan tekniken inte är kommersialiserad ännu.

Tabell 23. Ekonomiberäkning för sorptionskyllosningar med SolarFrost IceBook sorptionskylmaskin.

	Sorptionskylanläggning med SolarFrost IceBook kylteknik	
	robotmjölkning	konventionell mjölkning
Mjölktank och förkylare, kkr	108	148
Absorptionskylanläggning inklusive kyltorn, kkr	30	39
Frikyla värmväxlare, kkr	20	20
Total inköpskostnad, kkr	158	207
Total årlig kostnad för system med IceBook kylteknik, kkr/år	30,4	37,4
Årlig besparing jämfört med referens, se tabell 21, kkr/år	1,1	-3,4

Diskussion

Sorptionskylmaskiner allmänt

Teknikgenomgången har visat att det finns ett flertal nya små sorptionskylmaskiner som har kommersialiserats under senare år. Dessa är främst utvecklade för komfortkyla i villor och drivna med solvärme. Emellertid är utbudet för sorptionskylmaskiner fortfarande kraftigt mindre än utbudet för kompressorkylmaskiner. Detta har gjort att trots att det finns på marknaden en teknik som kan redan idag användas för att kyla mjölk på en gård, är det inte optimerad för det ändamålet.

Tekniska förbättringar för systemlösningar

Analysen har visat att en av de redan kommersialiserade sorptionskylteknikerna, SolarNext:s Chillii PSC12, tekniskt klarar av att kyla mjölk på en gård med överskottsvarme från en gårdsbaserad biogaskraftvärmeanläggning. Samtidigt visade analysen att det finns utvecklingsbehov för att denna teknik ska optimeras för de speciella driftförutsättningarna, dvs. både för att använda värmen från en biogaskraftvärmeanläggning och att kyla mjölken enligt EU:s krav. Detta kräver utvecklingsinsatser från företagen. Dessutom skulle det vara intressant om maskiner byggda på samma teknik som Chillii PSC12 var tillgängliga i flera storlekar vad gäller kyleffekt.

Utöver Chillii PSC12 finns IceBook-tekniken, en sorptionskylmaskin från företaget SolarFrost GmbH. Denna teknik är inte kommersialiserad ännu och utveckling kommer också här att behövs.

Det är önskvärt att kyltornet i systemlösningarna kan bytas ut mot en annan typ av värmesänka för sorptionskylmaskinen. Kyltorn förbrukar vatten vid drift. Samtidigt behövs vattenbehandling för att förebygga tillväxt av legionellabakterier i det ljumma vattnet som förekommer vid drift av kyltornet. Detta innebär en noggrann tillsyn och höga underhållskostnader. Alternativet till ett kyltorn är en torr kylmedelkylare. Torra kylmedelkylare är de allra vanligaste lösningarna för värmesänkning för standard kompressorkylmaskiner i fastigheter. Emellertid är prestanda för sorptionskylmaskiner mer beroende av en låg temperatur vid värmesänkan än kompressorkylmaskiner, och därför har ett kyltorn bedömts vara nödvändigt för de skapade lösningarna.

Det finns flera vägar att gå i den vidare systemutvecklingen mot att undvika ett kyltorn, och det bör undersökas om en bättre optimerad sorptionskylmaskin skulle kunna drivas med en torr kylmedelkylare istället för ett kyltorn.

Dessutom är det möjligt att en förbättrad kylmedelkylare kan användas. Kunze (pers. medd.) berättar att SolarFrost har under utveckling en torrkylmedelkylare som kunde leverera en värmebärare 2 °C över utelufttemperaturen. Det ska jämföras mot en standard kylmedelkylare som klarar av att producera en värmebärare 4 – 5 °C över utelufttemperaturen.

En frikylalösning gav möjlighet för ett sorptionskylsystem att ta tillvara på den kalla luften under vintertid i Sverige. Emellertid är frikylalösningen inte optimerad ännu. Vid en framtida systemmodellering kan det vara intressant att integrera värmeväxlaren för frikyla med kylsystemets värmesänka (kyltorn eller kylmedelkylare osv.).

Jämförelse mellan sorptionskyla för robotmjölkning respektive konventionell mjölkning

Analysen av systemlösningarna har visat att det är betydligt lättare att bygga ett system för drift med robotmjölkningssystem. Detta beror på att mjölkning med en robot sker konstant under dagen och alltså är kylbehovet jämnt under dagen. Det jämna kylbehovet från sorptionskylanläggningen kan lätt anpassas till den antagna jämna värmeproduktionen från gårdens biogaskraftvärmeanläggning.

Emellertid förekommer toppar i kyleffektbehovet vid varje mjölkningstillfälle för scenariet med konventionell mjölkning. För att klara detta så behöver energi från kraftvärmeanläggningen lagras på något sätt. Den skapade systemlösningen byggdes på energilagring i form av is eftersom investeringskostnaderna var lägre för detta än för det främsta alternativet, en ackumulatortank.

Följande nackdelar framträder i systemet för konventionell mjölkning: Den skapade lösningen behöver en lägre köldbärartemperatur för att skapa is än lösningen för robotmjölkning. Behovet för energilagring innebär att kylmaskinen ska dimensioneras för en något större totalkyleffekt på grund av förluster som förekommer vid lagring. Detta innebär högre investeringskostnader för lantbrukaren. Investeringskostnader är också högre på grund av investeringen i islagringsenheten. Dessutom orsakar iskylsystem en någon högre elförbrukning på grund av pumparna som används i iskylsystemet.

Reducerade kostnader för sorptionskylmaskiner

Att LCC för de skapade systemlösningarna var betydligt högre än för referensfall berodde mest på att inköpskostnaden för sorptionskylmaskinen var betydligt högre än för motsvarande kompressorkylmaskin.

Den sorptionskylteknik på marknaden som är mest lämplig för denna lösning, Chillii PSC12 är dock inte anpassad för mjölkkyllning varken i den specifika effektdimensioneringen eller för de erforderliga temperaturnivåerna för mjölkkyllning. Alltså skulle inköpskostnaden troligen minska vid ett system som var dimensionerad specifikt för det erforderliga effektbehovet, samt anpassat för gällande temperaturförhållande för mjölkkyllning.

SolarFrost använder en annorlunda konstruktionsmetod i tillverkning av IceBook sorptionskylmaskin, vilket enligt företaget möjliggör en avsevärt lägre inköpskostnad för kylmaskinen. Detta gör att en sorptionskyllosning byggd med IceBook sorptionskylteknik har en lägre LCC-kostnad än det jämförbara referenssystemet (detta för ett system för robotmjölkning). Emellertid är IceBook ingen kommersialiserad teknik ännu, och vidare utveckling behövs.

Slutsatser

Det finns idag teknik tillgänglig på marknaden för att bygga en sorptionskylanläggning som kan drivas med värme återvunnen från en standardbiogaskraftvärmeanläggning, och som klarar av att kyla mjölk på gården enligt EU-kravet.

Specifikt för detta system har det visats att det finns tillräckligt med värme från en kraftvärmeanläggning för att täcka en sorptionskylmaskins behov för mjölkkyllningsändamål under alla årstider (med befintlig sorptionsteknik), samtidigt som

värmebehovet för varmvattenberedning och bostadshusuppvärmning också kan täckas.

Det är mycket lättare att bygga ett sorptionskylsystem för mjölkkylla på en gård med robotmjölkning, än på en annars exakt lika gård med konventionell mjölkning. Detta på grund av att det behövs energilagring i systemet för att anpassa värmeproduktionen från biogaskraftvärmeanläggningen till kyltopparna som uppstår i samband med varje konventionell mjölkning.

Med befintlig sorptionskylteknik har sorptionskylanläggningen för mjölkkylla med robotmjölkning drygt 70 % högre LCC-kostnad än referenssystemet. För en gård med konventionell mjölkning är LCC-kostnaden för sorptionslösningen drygt dubbelt så hög.

Det finns två huvudområden som bör prioriteras för fortsatt arbete. För det första så krävs utveckling för att inköpskostnaden för sorptionskylmaskiner ska kunna reduceras kraftigt, så att sorptionskylla kan bli en intressant lösning för en mjölkbonde som satsar på biogas. För det andra så krävs det en noggrann modellering av sorptionskylsystemets funktion för en förbättrad optimering av systemets funktion mot rådande förutsättningar på gården.

Referenser

- Ahlsell, 2009. Kylkatalogen 2009/2010.
- Andersson, M., 1984. Drinking Water Supply to Housed Dairy Cows. PhD dissertation. Institutionen för husdjurens utfodring och vård, Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU, Ultuna.
- Aton, 2007. Energideklarering av bostadsbyggnader Metoder för besiktning och beräkning Version 2. Reviderad januari 2007. ATON Teknikkonsult AB på uppdrag av statens energimyndighet.
- Ayadi, O., Doell, J., Aprile, M., Motta, T., 2008. Solar Energy Cools Milk. Eurosun 2008. 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings 7th to 10th October, Lisbon, Portugal.
- Bennich, P., 2008. Mätningar av hushållsel – tankar om framtiden. Presentation om energimyndighetens projekt om hushållselanvändning 2008-08-25. Overheads på webben http://www.energimyndigheten.se/Global/Filer%20-%20Forskning/AES/Forskningsarena%20Katrineholm%2025-26%20aug/Peter_Bennich.pdf
- Biogas Brålanda, 2009. Broschyr: Clean Fuel Concept, Biogas Brålanda. Infoblad.
- ClimateWell, 2008. Product description, ClimateWell 10 Ver 092/2 EN. Produktlitteratur. ClimateWell AB, Hägersten, Sverige (på engelska).
- Dahlroth, B., 2007. Säkrare Värmeförsörjning! Tillstånd, Förbättringsmöjligheter, Beredskapsåtgärder. VÄRMEK på uppdrag av den svenska energimyndigheten.
- DeLaval, 2009 i. DeLaval heat recovery system. Wash away high heating costs. Informations blad (på engelska).
- DeLaval, 2009 ii. DeLaval plate heat exchanger BHSS. Product data sheet (på engelska).
- EAW, 2008. Absorptionskälteanlag Absorptionskälteanlage 15 KW Kälteleistung Für den Betrieb mit Heizwasser. EAW Energieanlagenbau Westenfeld GmbH (på tyska).

- Edström, M., Jansson, L.-E., Lantz, M., Johansson, L.-G., Nordberg, U. & Nordberg, Å., 2008. Gårdsbaserad biogasproduktion. System, ekonomi och klimatpåverkan. JTI-rapport Kretslopp och avfall 42. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala
- Granryd, E., Ekroth, I., Lundqvist, P., Melinder, Å., Palm, B., Rohlin, P., 2003. Refrigerating Engineering. Institution för Energiteknik, Avdelning för Tillämpad Termodynamik och Kylteknik. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige.
- Jonsson, H., Bohdanovicz, P. 2003. Sustainable Energy Utilisation. Kurskompendium, Institutionen för energiteknik, KTH, Stockholm.
- Johansson, S., Brandt, N., 2007. Riktlinjer för att beräkna resultat för klimatprojekt inom ramen för Stockholms handlingsplan mot växthusgaser, Stockholm stads Klimatinvesteringsprogram och Miljömiljarden. Institutionen för industriell ekologi, Kungliga tekniska högskolan, KTH, Stockholm.
- Kunze, G., 2008. SolarFrost: The Icebook. SolarFrost Forschung & Entwicklung GmbH, Purkersdorf, Österrike.
- Linne, M., Ekstrandh, A., Englesson, R., Persson, E., Björnsson, L., Lantz, M., Den svenska biogaspotentialen från inhemska råvaror. Avfall Sverige rapport 2008:02.
- Robur S.p.A., 2009, PRO – Hydronic heating and cooling with absorption heat pumps, chillers and chiller-heaters. Robur S.p.A., Italy (på engelska).
- SCB, 2009. Jordbruksstatistisk årsbok 2009 med data om livsmedel. ISBN 978-91-618-1493-0. Statistiska centralbyrån, Örebro.
- SolarNext, 2009, Chillii cooling kit PSC12. Produktlitteratur. (på engelska). SolarNext AG.
- Svensk Mjök, 2007. Planering och utformning av mjölktankrum med anslutande serviceutrymmen. Svensk Mjök.
- Svedinger, S., Ascard, K., Dolby, C.-M., Lundqvist, P., Nilsson, C., Ventorp, M., 1995. Byggnader för jordbruket. Planering och utrustning. LTs förlag, Stockholm.
- Tank, T., Villareal, L., Green, J., 1998. Guideline: Absorption Chillers. New Buildings Institute Advanced Guidelines Series. New Buildings Institute, Fair Oaks, CA, USA. (på engelska).
- Tecumseh, 2009 i. Specifications: TAGD4614ZHR Condensing unit. Tecumseh Europe/ L'Unite Hermetique. (på Engelska)
- Yazaki, 2007. WFC-SC5 specifications. Produktlitteratur. Yazaki Europe Ltd. (på engelska)
- Yazaki, 2009. Water Fired Single-Effect Chillers and Chiller-Heaters. Performance Characteristics. Produktlitteratur. Yazaki Energy Systems, Inc. (på engelska).

Internet

- DeLaval, Internet, 2009 i. Cooling technology at: http://www.delaval.com/DairyKnowledge/EfficientCooling/Cooling_Technology.htm (på engelska). 2009-10-22
- De Laval, Internet, 2009 ii: De Laval buffer controlled cooling, BCC. http://www.delaval.com/Products/Milk-Cooling/Cooling-for-VMS/default.htm?wbc_purpose=BasicAbout. (på engelska) 2009-10-22.

Personliga meddelande

- Kunze, G., 2009. Solar Frost GmbH.
- Pink, W., 2009. Werner Pink, Solar Next AG

Bilaga 1. Beskrivning av typgården

Allmänna förutsättningar för typgården är:

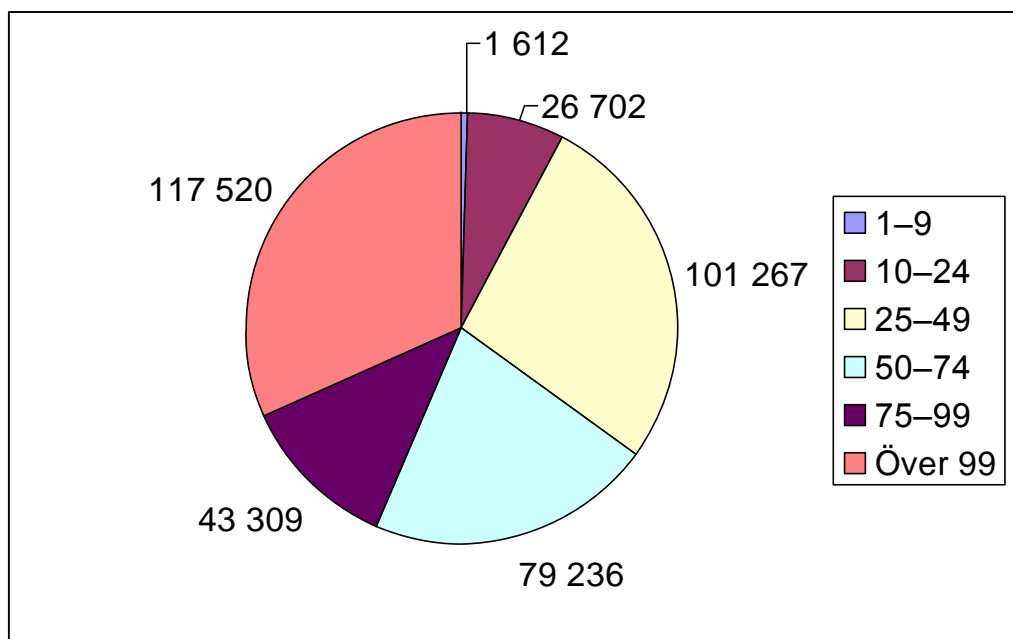
- 160 mjölkande kor
- Mjolkproduktion vid 8076 kg mjölk/mjölkkande ko, år (medelproduktionen för svenska mjölkkor 2007).
- Gödsel hanteras som flytgödsel och det produceras 3212 ton flytgödsel/år vid 9 % torrsubstanshalt.
- Gården har en biogasanläggning som ska producera biogas med enbart flytgödsel från besättningen
- Gården ligger i Götalands norra slättbygder (Gns)

I denna bilaga beskrivs varför just dessa förutsättningar har valts för typgården. I bilagan ingår också en beskrivning över energianvändning på typgården samt tekniska och ekonomiska uppgifter för gårdens biogasanläggning.

Gårdens allmänna förutsättningar

Besättningens storlek

Antalet mjölkkor har valts utifrån att det ska vara representativ för en stor mjölkgård i Sverige. Figur B1.1 redovisar antal mjölkkor per besättningsstorlek i hela Sverige år 2007. Medelbesättningen för kategori 99 mjölkkor och över är 160, och därför väljs typgården ha 160 mjölkkor.



Figur B1:1. Antal mjölkkor per besättningsstorlek i Sverige (SCB, 2009).

Mjölproduktion

Mjölproduktion på gården har satts till medelproduktion för en svensk mjölkko enligt den senaste statistiken (SCB, 2009). År 2007 fanns det totalt 369646 mjölkkor i Sverige, och det vägdes in 2986 kton mjölk. Typgården väljs att ha en mjölkproduktion som motsvarar medelmängd mjölk per kor enligt dessa statistiker, alltså 8076 kg/mjölko.

Energianvändning

Energianvändning på gården

Tabell B1:1 redovisar energianvändningen för gårdens verksamhet, uppdelad per användnings ändamål. Uppgifter är framräknat från mätningar på en mjölkgård utfördes av Hörndahl (2007). Det är antaget att gården har ett utfodringssystem med tornsilo, stationär blandare och rälsgående vagnar. Tabellen visar energianvändning för gården med en vanlig kompressorkylanläggning där värme återvinns från kompressorns varma sida för att värma varmvatten. Det är dessutom antaget att en förkylare är inkopplad för mjölkkyllning.

Skillnader mellan mjölkkyllningsteknik för robotmjölkning respektive konventionell mjölkning beskrivs tidigare i rapporten.

Tabell B1:1. Energianvändning för gården (Hörndahl, 2007) inklusive bostadshus.

	kWh/mjölko, år	MWh/år
Utfodring	292	47
Ventilation	3	1
Utgödsling	43	7
Belysning	230	37
Mjölkkyllning (konventionell/robot)	82/93	13/14,8
Varmvatten:		
El	26	4
Återvunnen från mjölkkyllning	52	8
Vakuumpump	226	36
Övrigt	230	37
Totalt elbehov (konventionell/robot)	1185	189/191

Vattenanvändning på gården

Varmvatten används vid två olika temperaturnivåer på gården:

- Vatten vid 80 °C. Detta vatten används vid diskning av mjölkkningsutrustning som är i direkt kontakt med mjölken. En hög temperatur krävs för att säkerställa att den nödvändiga reningsgraden för utrustningen uppnås.
- Vatten vid 55 °C som används för övriga delar av tvättcykeln.

Utöver det har det visats att mjölkproduktion per ko är högre med dricksvatten som ligger vid 17 °C, alltså en temperatur något över normal svensk grundvattentemperatur (Andersson, 1984).

Tabell B1:2 visar den beräknade dagliga vattenanvändningen på typgården för de ovanstående ändamålen.

Tabell B1:2. Varmvattenanvändning på typgården.

Ändamål	Liter vatten/dag	Källa
Varmvatten för icke-diskningsändamål (55 °C)	447	De Laval, 2009 i
Dickvatten för mjölkkningsutrustning (80 °C)	134	De Laval, 2009 i
Dricksvatten för kor (räknat med 75 liter/ko, dag)	12 000	Anderson, 1984

Energianvändning i gårdens bostadshus

Gården antas ha en bostad med 150 m² uppvärmd yta och bebodd av 4 människor.

Ett hus med byggår 1980 med egenskaper enligt (Dahlroth, 2007) föreslås. Tabell B1:3 redovisar de olika byggnadsdelarnas värmeisolerande egenskaper. Tabell B1:4 redovisar husets dimensioner och ventilationskrav.

Tabell B1:3. Husets U-värde.

	Material	U-värde, W/m ² , K	Byggnadsdels area, m ²
Fönster	3-glasfönster	1,8	31,2
Fasad	120 mm mineralull, gips, trä	0,31	164,8
Grund	50 mm XPS, 130 mm betong, parkett	0,26	75
Tak	150 mm mineralull, gips, papp, trä	0,21	75

Tabell B1:4. Husets dimensioner och ventilationskrav.

Husets uppvärmda yta	150 m ²
Antal våningar	2
Area/våning	75 m ²
Längd väggar	7,5 x 10 m
Fönster	16 fönster med medelytan 1,95 m ² /fönster
Höjd/våning	2,8 m
Ventilationskrav	0,5 l/m ² , s (Enberg, 2006)

Dimensionerande effektbehov

Enligt Jonsson och Bohdanovicz (2003) är dimensionerande utetemperaturen för gårdens geografiska läge -22 °C. Det antas att inomhustemperaturen är 21 °C, men att 4 °C av uppvärmningsenergin kommer från internlasterna såsom människor, elapparater m.m. Alltså ska den aktiva uppvärmningen täcka all uppvärmning upp till 17 °C. Dimensionerande effekt för uppvärmning är alltså 8,2 kW. 1,1 kW i dimensionerande effekt antas för varmvattenberedning, och alltså är det totala effektbehovet 9,3 kW.

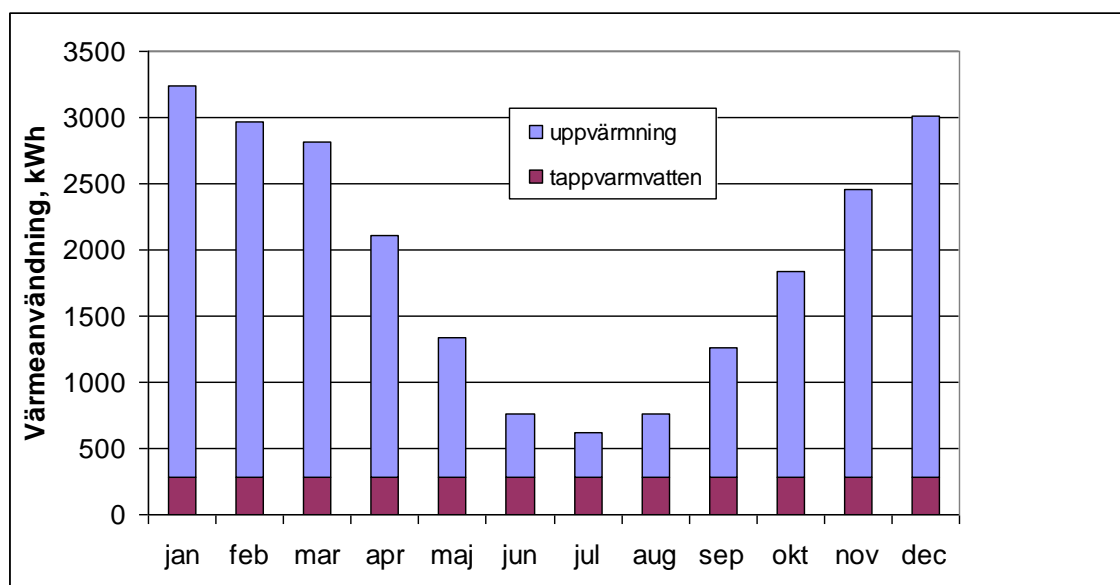
Värmebehov under året

Figur B1:2 och tabell B1:5 visar det månadsvisa energibehovet för gårdens bostadshus. Energibehov för uppvärmning har räknats från månadsmedeltemperaturer samt värmeöverföringsegenskaper ovan. Energibehov för varmvattenberedning har beräknats enligt tabell B1:6.

Tabell B1:5. Uppvärmningsbehov för gårdens bostadshus.

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Månadsmedeltemp ¹ , °C	-3,3	-3,4	-0,2	4,5	10,5	14,6	15,7	14,7	10,8	6,9	1,9	-1,6
Uppvärmningsenergi, kWh	2962	2688	2534	1825	1058	476	340	478	983	1554	2172	2728
Tappvarmvatten, kWh	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
TOTAL, kWh	3243	2968	2815	2105	1338	756	620	758	1264	1835	2453	3008

(1) SMHI:s månadsmedeltemperaturer för Skara 1961–1990



Figur B1:2. Värmebehov för gårdens bostadshus, tappvarmvatten.

Tabell B1:6. Beräkning av tappvarmvattenbehov (Aton, 2003).

Varmvattenbehov	16 m ³ /pers, år	(Aton, 2007)
Temperaturskillnad, kallvatten – tappvarmvatten	(55 – 10) = 45 °C	
Antal personer i hushållet	4	Det antas att alla har samma varmvattenbehov
Total årligt energibehov, tappvarmvatten	3360 kWh/år	Årligt energibehov, 4 pers

Elbehovet för huset uppskattas till 5200 kWh/år enligt Energimyndighetens senaste mätningar (Bennich, 2008).

Biogaskraftvärme på gården

En röt-kammare dimensioneras för att kunna röta all producerad gödsel på gården. Tabell B1:7 visar dimensioneringsberäkning som utfördes för typgårdens röt-kammare. Beräkningsmetodiken baseras på Edström m.fl. (2008).

Tabell B1:7. Dimensioneringsberäkning för röt-kammare.

Dimensionering röt-kammare	
Gödselproduktion	3212 ton/år
Torrsubstans nötflytgödsel, %	9 %
Organiskt innehåll	82 %
Specifik metanproduktion	200 NL/kg VS
Metanproduktion	14,8 Nm ³ /ton våtvikt
HRT	23 dagar
Aktiv volym, RK	202 m ³
Total volym, RK	225 m ³

El- och värmeproduktion på biogaskraftvärmeanläggningen

Tabell B1:8 visar el- och värme produktion på gårdens biogaskraftvärmeanläggning. Beräkningar baseras på Edström m.fl. (2008) och som i den rapporten antas det att biogasproduktion sker vid en konstant effekt under hela året. Därför är el- och värmeproduktion också konstant.

Tabell B1:8. El- och värmeproduktion på gårdens biogaskraftvärmeanläggning.

Energiproduktion	
Biogasproduktion, brutto	471 MWh/år
Elproduktion, brutto	141 MWh/år
Nyttig värmeproduktion, brutto	236 MWh/år
Processelektricitet för biogasanläggning	0,025 kWh el/kWh biogas
	11,8 MWh el
Processvärme för substratuppvärmning	22 % av gasproduktion
	104 MWh/år
Netto elproduktion	130 MWh el
Netto värmeproduktion	132 MWh värme
Medeleffekt, nettovärmeproduktion	15,1 kW

Ekonomiberäkning för gårdens biogaskraftvärmeanläggning

Tabell B1:9 redovisar beräkning över kapitalkostnader för biogaskraftvärmeanläggningen, uppdelad mellan rötkammare och kraftvärmeanläggningen.

Tabell B1:9. Kapitalkostnader för biogaskraftvärme på typgården.

Rötkammare	
Specifik investering	3,6 kkr/m ³ aktiv volym
Total investering, biogasanläggning	729 Kkr
företagares investering	510 Kkr
Ränta	4%
Avskrivning	12 År
Kapitalkostnader	54,3 kkr/år
Kraftvärmeanläggning	
Kraftvärme motorstorlek	17 kW, el
Ränta	4%
Total investering, kraftvärme	388 Kkr
Företagares investering	272 Kkr
Avskrivning	8 År
Kapitalkostnader	40,3 kkr/år
Total kapitalkostnad	94,6 kkr/år

Tabell B1:10 visar totala årliga kostnader för biogaskraftvärmeanläggningen.

Tabell B1:10. Totala årliga kostnader för biogaskraftvärmeanläggningen.

Driftkostnader	
Elektricitet	0,65 kr/kWh
	7,7 kkr/år
Underhåll	2,5 % av tekniska komponenter
	18 kkr/år
Lönekostnader	250 kr/timme
	173 timmar/år
	43 kkr/år
Försäkring	21 kkr/år
Rötrestens värde (detta räknas som en intäkt för anläggningen)	-12 kkr/år
Total kostnad, rötkammare	132 kkr/år
Drift- och underhållskostnader	0,2 kr/kWh el
	28 kkr/år
Mätning och rapportering	6 kkr/år
Total kostnad, kraftvärme	74 kkr/år
Total årlig kostnad, biogaskraftvärme	207 kkr/år

Tabell B1:11 redovisar årliga inkomster för gårdens kraftvärmeanläggning.

Tabell B1:11. Årliga inkomster från biogaskraftvärmeanläggning.

Intäkter från gröna certifikat	
Elproduktion, brutto	141 MWh/år
Certifikatpris	250 Kr/MWh
Total intäkt gröna certifikat	35 kkr/år
Intäkter från att ersätta tidigare inköpt el	
Elproduktion, netto	130 MWh/år
Utbyteskostnad	870 Kr/MWh
Total intäkt elförsäljning	113 kkr/år
Inkomst från värmen från kraftvärmeanläggning	
Elersättning (varmvattenberedning på gården)	4 MWh/år
Enhetskostnad	870 kr/MWh
Kostnadsbesparing	3 480 kr
Inkomst från värmen från bostadshusuppvärmning, varmvatten	
Oljeersättning (bostadshusuppvärmning, varmvatten)	23,2 MWh/år
Enhetskostnad	1170 kr/MWh
Kostnadsbesparing	27 100 kr/år
Total inkomst, all värme- och elersättning	179 kkr

Tabell B1:12 sammanfattar lönsamheten för gårdens biogaskraftvärmeanläggning (utan sorptionskyla) med resultat från beräkningar från tabell B1.11 och B1.12. Beräkningen visar att anläggningen inte är lönsam i nuläget.

Tabell B1:12. Kostnadsunderskott för biogaskraftvärmeanläggning utan sorptionskylmaskin.

Årliga kostnader för biogaskraftvärmeanläggning, kkr/år	207
Avsatta kostnader från elproduktion, kkr/år	148
Avsatta kostnader från användning av värme från kraftvärmeanläggning, kkr/år	31
Underskott, kkr/år	28

Bilaga 2. Förkylning

Tekniken för förkylning beror inte på vad som används för aktiv kylteknik och tillämpas likadant för både elkompresor kylanläggning och sorptionskylning.

En temperatur för inkommande vatten på 10 °C har antagits. Inkommande mjölktemperaturen sätts enligt EU-krav för mjölkkyllning (Svensk Mjolk, 2007) till 32 °C. Förkylare dimensioneras för att ta ett dubbelt så stor vattenflöde som mjölkflöde (DeLaval, 2009 ii).

Okända variabler i systemet är alltså utkommande temperaturer för mjölken och vattnet. Med antagande att vatten och mjölk har lika värmekapaciteter, så är temperatur ökningen i vattnet hälften så stor som temperatursänkning i mjölken (på grund av flödeskvoten). Vatten temperaturen ska dessutom hållas under 20 °C för att undvika risk för legionella tillväxt.

Tabell B2:1. redovisar beräkningen över förkylningssystemet för mjölkproduktion för en dag. I tabellen har den mängd vatten som används för förkylning visas understiga det vattnet som korna dricker under dagen.

Tabell B2:1. Beräkning över förkylare för att kyla mjölk.

Inkommande mjölktemperatur, °C	32
Inkommande vattentemperatur, °C	10
Utkommande mjölktemperatur, °C	18
Utkommande vattentemperatur, °C	17
Energi från mjölk, kWh/dag	57,6
Volym mjölk/dag, liter	3540
Ratio vatten–mjölk	2
Totalt producerad vattenmängd, liter	7080
Vattenbehov per ko och dag, liter	75
Totalt vattenbehov för mjölkkor, liter	12000

Bilaga 3. Beräkning av kylförluster från mjölktanken

Tabell B3.1 visar beräkningen för kylförluster från mjölktanken. Hänsyn tas endast till transmission genom tankväggen. Beräkningen är därför en över-skattning på de faktiska kylförlusterna. Beräkningen visar att kylförluster utgör endast en liten andel av det totala kyleffektbehovet.

Tabell B3:1. Beräkning av effektbehovet för kyleffekt.

Tankdimensioner	
Total tankvolym, m ³	8
Längd utvändigt, m	2,5
Längd invändigt, m	2,38
Inre cylinderradie, m	1,03
Total yta, m ²	22,19
U-värde för tanken (enbart transmission)	
Vägg tjocklek, m	0,065
Väggmaterial	polystyren
Värmeledningstal, W/m, K	0,034
U-värde, W/m ² , K	0,523
Temperatur för beräkning	
Maximal tillåten inomhustemperatur, °C	32
Mjölktemperatur, °C	3
Maximal värmeupptagning, W	336,6

JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik...

... är ett industriforskningsinstitut som forskar, utvecklar och informerar inom områdena jordbruks- och miljöteknik samt arbetsmaskiner. Vårt arbete ger dig bättre beslutsunderlag, stärkt konkurrenskraft och klokare hushållning med naturresurserna.

Vi publicerar regelbundet notiser på vår webbplats om aktuell forskning och utveckling vid JTI. Du får notiserna hemskickade gratis om du anmäler dig på www.jti.se

På webbplatsen finns även publikationer som kan läsas och laddas hem gratis, t.ex.:

JTI-informerar, som kortfattat beskriver ny teknik, nya rön och nya metoder inom jordbruk och miljö (4-5 teman/år).

JTI-rapporter, som är vetenskapliga sammanställningar över olika projekt.

Samtliga publikationer kan beställas i tryckt form. JTI-rapporterna och JTI-informerar kan beställas som lösnummer. Du kan också prenumerera på JTI-informerar.

*För trycksaksbeställningar, prenumerationsärenden m.m.,
kontakta vår publikationstjänst (SLU Service Publikationer):
tfn 018 - 67 11 00, fax 018 - 67 35 00
e-post: bestallning@jti.se*



JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering

Box 7033, 750 07 UPPSALA Telefon: 018 - 30 33 00

Besöksadress: Ultunaallén 4 Telefax: 018 - 30 09 56

Webbplats: www.jti.se