

**Slutrapport till Stiftelsen Lantbruksforskning, projekt nr
H0840074**

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

Nils Brown, Ola Pettersson
JTI – Institutet för miljö- och jordbruksteknik

Bakgrund

Trots gynnsamma aktuella förutsättningar 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 använder enbart nötflyt gödsel som substrat används drygt 50 % av den utvunna värmen för substratuppvärmning. Den kvarstående värmen kan användas för varmvattenberedning och uppvärmning (för 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.

Syfte och mål

Syftet med projektet har varit att hitta ökad lönsamhet för biogasbaserad kraftvärmeproduktion på mjölkgårdar genom att hitta alternativ avsättning för den värme som produceras.

Målet med detta arbete var att utreda de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att använda värmen från en biogasdriven kraftvärmeanläggning på en mjölkgård för att kyla mjölk med en värmedriven kylmaskin. De nuvarande ekonomiska förutsättningarna för ett sådant kylsystem har utvärderats i jämförelse med en vanlig kylmaskin med elkompessor.

Målet är även att stämna av den senaste tekniska utvecklingen för sorptionskylteknik mot de tekniska kraven för att kyla mjölk på gården med värmeintag från en biogaskraftvärmeanläggning. Eventuella utvecklingsbehov för kyltekniken för denna tillämpning och möjligheter för en effektivare användning av värmen utvärderas. Kalkyler över ekonomi utförs för de identifierade systemlösningarna. Resultatet ska användas för att informera lantbruket om värmedriven mjölkkylla samt kan användas som underlag för kyl-, mjölk- och biogasbranscherna för att vidareutveckla tekniken.

Genomförande

Projektet har utförts som en litteraturstudie med följande arbetsmoment:

- **Teknikgenomgång:** Befintlig kommersialiserad teknik för mjölkkyllningsändamål kartläggs och beskrivs. Likaså kartläggs den senaste utvecklingen gällande sorptionskylla.
- **Analys av utvecklingsbehov:** Den senaste utvecklingen rörande sorptionskylsystem stäms av mot kraven för att kyla mjölk med överskottsvärme på en mjölkgård i Sverige. Allmänna rekommendationer görs för det framtida utvecklingsbehovet.
- **Beskrivning av typgården:** En typgård med 160 mjölkkor belägen i Västra Götaland beskrivs. Energianvändningen på typgården beskrivs utifrån data från litteraturen (Hörndal, 2007). Gårdens biogaskraftvärmeanläggning, med endast gödsel från besättningen som substrat, beskrivs tekniskt och ekonomiskt enligt Edström m.fl. (2008).

- **Systemlösningar:** Systemlösningar för mjölkkyllning på typgården skapas. Två fall beaktas; ett där typgården drivs med konventionell mjölkning (två gånger om dagen), och ett där typgården drivs med automatisk mjölkning (robotmjölkning). För båda fallen skapas dels referenskylanläggningar med kompressor-kylsystem som standard, dels kylanläggningar med sorptionskyla. Sorptionskylanläggningarna utvärderas tekniskt mot möjligheten att skapa den erforderliga kylan med tillgänglig överskottsvärme från biogaskraftvärmeanläggningen. LCC-beräkningar utförs för samtliga system. Investeringskostnader har inhämtats från maskintillverkare och leverantörer. Energikostnader har baserats på rådande kostnader för svenska lantbrukare. Sorptionskylsystem jämförs ekonomiskt med referenssystem, och med hänsyn till påverkan på lönsamheten för lantbrukarens investering i biogaskraftvärmeanläggningen. Minskade växthusgasutsläpp för sorptionskylanläggningar beräknas också.

Resultat

Mjölkkyllning på en gård

Det krävs enligt EU-standard att mjölk kyls till under 4 °C mindre än 3 timmar efter mjölkning (Svensk Mjolk, 2007). Detta kräver i sin tur att mjölken kommer i termisk kontakt med material några grader under denna temperatur. Därför ska en kylmaskin för mjölkkyllning på en gård ha en förångningstemperatur på köldmediet eller köldbärareframledning vid ungefär 0 °C för att klara EU-standarderna.

Sorptionskyla

Teknikgenomgången har visat att det under 2000-talet pågått en bred utveckling av sorptionskylmaskiner från företag såsom Yazaki (Japan), EAW (Tyskland), ClimateWell (Sverige), Robur (Italien), SolarNext (Österrike) och SolarFrost (Österrike). Den stora drivkraften som bidragit till denna kommersialisering är att producera komfortkyla för villahus i varma länder med solvärme, och flertalet av ovan nämnda företag inriktar sig mot just denna marknad. En klar teknisk skillnad mellan mjölkkyllning och komfortkyla är att kylmaskinen behöver producera köldbärare/köldmedium vid en betydligt lägre temperatur vid mjölkkyllning än vid komfortkyla.

För en redovisning av grundläggande uppbyggnad av en sorptionskylmaskin, hänvisas läsaren till JTI-rapporten om detta projekt eller till Granryd, m. fl. (2003). Av de ovan nämnda företagen, använder ClimateWell vatten/LiCl som köldmedium/sorptionsmedium. Yazaki och EAW använder vatten/LiBr som köldmedium/sorptionsmedium. Vatten är mycket vanligt som köldmedium i sorptionskylanläggningar och har den fördelen att det inte har någon negativ miljöpåverkan. Vatten är också mycket lämpligt som köldmedium för att alstra kyla för komfortkyländamål. Det faktum att vatten fryser vid 0 °C gör emellertid att sådana kylmaskiner har tekniska problem att klara temperaturkravet för mjölkkyllning. Detta beror främst på att samtliga dessa kylmaskiner är byggda för indirekt expansion, dvs. att den alstrade kylan levereras till kylaster via en köldbärare. Detta till skillnad från direkt expansion, där kylaster är i direkt termisk kontakt med köldmediet som förångas. Den indirekta expansionen medför att den temperatur som kan alstras från sådana kylmaskinerna ligger några grader över 0 °C, vid 4-5 °C. Temperaturen är därmed inte tillräckligt låg för att kyla mjölken

enligt EU-standarden. Dessutom visar produktspecifikationer att verkningsgraden för kylalstringen (coefficient of performance – COP) är mycket låg vid alstring av en så låg temperaturen.

Robur, SolarNext och SolarFrost har utvecklat sorptionskylsystem med ammoniak som köldmedium. Ammoniak kräver noggrann hantering, men är i övrigt ett inte ovanligt köldmedium för kompressorkylmaskiner. Dessutom möjliggör ammoniak att mycket låga förångartemperaturer kan alstras, ned till -40 °C. Tabell 1 visar driftparametrar för maskiner från dessa företag som är lämpliga för mjölkkyllning.

Tabell 1. Prestanda för sorptionskylmaskiner med ammoniak som köldmedium.

Företag	Solar Frost	Robur	Pink, SolarNext
Produktbenämning	IceBook ⁽²⁾	ACF60-00LB	Chillii PSC12
Köldmedium	Ammoniak	Ammoniak	Ammoniak
Sorptionsmedium	Vatten	Vatten	Vatten
Driftspecifikationer – driftparametrar som redovisade i företagslitteratur, se källor ovan			
Temperatur, ingående vatten, generator, °C	65	150 – 200 ⁽¹⁾	85
Temperatur, ingående vatten, värmesänkning, °C	10	35	29
Temperatur, utgående kylbärare, förångare, °C	-5	7,2	6
COP	0,95	0,53	0,65
Kyleffekt, kW	ej aktuell	13,3	10,6
Lägsta möjliga temperatur, utgående köldbärare, °C	-40	-10	-7
Referens	Kunze, (2008), och Kunze (pers. medd.)	Robur (2009)	SolarNext, (2009) och Pink (pers. medd.)

(1) byggd för direktledning med naturgas

(2) Ingen kommersialiserad teknik ännu

Tabellen visar driftspecifikationer från företagslitteraturen. Den visar också den lägsta temperaturen som respektive kylmaskin kan producera, vilket innebär att alla kylmaskiner producerar kyla vid en tillräckligt låg temperatur för att klara av kravet att kyla mjölk.

Tabellen visar att Roburs kylmaskin byggs för direktledning med naturgas. Maskinen behöver en mycket hög temperatur för att driva kylprocessen. En vanlig småskalig kraftvärmeanläggning utviner värme vid kring 95 °C, varför denna kylmaskin inte är lämplig för att kyla mjölk med.

Till skillnad från Roburs kylmaskin, drivs SolarNexts och SolarFrosts teknik med temperaturer under 100 °C och kan således drivas med värme från en småskalig biogaskraftvärmeanläggning.

SolarNexts teknik är redan kommersiellt tillgänglig. Trots att den inte är optimerad för att producera temperaturer under 0 °C, klarar den av det utan vidare utveckling, men med något sämre COP. SolarFrosts teknik är inte kommersiellt tillgänglig ännu.

Typgårdsbeskrivning

Tabell 2 och 3 visar el- och värmebalanser för gårdens biogaskraftvärmeanläggning. Kraftvärmeanläggningens elproduktion är mindre än gårdens interna behov (både för konventionell och automatisk mjölkning). Tabell 3 visar att det finns ett stort värmeöverskott från anläggningen efter övriga avnämare, såsom substratuppvärmning, varmvattenberedning och uppvärmning.

Tabell 4 visar en ekonomisk beräkning över gårdens biogasanläggning. Trots att gården har ett stort internt elbehov är biogasproduktion inte lönsamt.

Tabell 2. Elbalans för produktion från gårdens biogaskraftvärmeanläggning och gårdens interna elbehov.

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

Tabell 3. Värmebalans för produktion från gårdens biogaskraftvärmeanläggning och gårdens interna värmebehov.

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 4. Ekonomiberäkningar för gårdens biogaskraftvärmeanläggning.

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

Systemlösningar

Tekniska beskrivningar

Tabell 5 beskriver de fyra systemlösningarna – ett sorptionssystem och ett referenssystem, med både konventionell och automatisk mjölkning.

Samtliga lösningar inkluderar en förkylare eftersom detta bedöms vara en billig och lönsam investering. Storleken på tanken är densamma för samtliga lösningar och den är dimensionerad för två dagars mjölkproduktion.

Den erforderliga kyleffekten är betydligt högre för kylsystem för konventionell mjölkning än för automatisk mjölkning. Detta på grund av att vid konventionell drift pågår mjölkning under två koncentrerade perioder, och i anknytning till dessa är kyleffektbehovet högt eftersom mjölk måste nå under 4 °C max 3 timmar efter mjölkningen. Kyleffekten är lägre för system med automatisk mjölkning eftersom

det antas att mjölkning sker i en konstant takt dygnet runt (Gustafsson, pers. medd., 2009).

Båda referenslösningarna använder en direktexpansion kompressorkylanläggning av standardtyp för att kyla mjölk under 4 °C. Sorptionskyllosningar använder en sorptionskylmaskin med egenskaper som SolarNexts Chillii PSC12. I sorptions-systemet för konventionell mjölkning inkluderas ett islagringssystem. Detta är nödvändigt för att anpassa de kyleffekttoppar som förekommer vid varje mjölkning vid konventionell drift till den konstanta värmeproduktionen från kraftvärmelanläggningen. Sorptionssystem för automatisk mjölkning har emellertid endast en indirekt kopplad sorptionskylanläggning eftersom det inte förekommer stora kyleffekttoppar med automatisk mjölkning. Beräkningar har visat att med en sorptionskylmaskin med egenskaper som SolarNexts Chillii PSC12 skulle båda sorptionskyllosningarna klara av kravet att kyla mjölk med den tillgängliga överskottsvärmen. Detta både vid höga uteluftstemperaturer (då COP för kylsystemet är lägst) och vid låga uteluftstemperaturer (när värmebehovet för övriga avnämare, främst bostadshusuppvärmning, är högst).

Tabell 5: Beskrivning av systemlösningar för referens- och sorptionssystem med både konventionell mjölkning och automatisk mjölkning.

	Referenssystem, konventionell mjölkning	Referenssystem, automatisk mjölkning	Sorptionssystem, konventionell mjölkning	Sorptionssystem, automatisk mjölkning
Förkylare	Ja. Plattvärmväxlare med gårdens kallvatten som sedan används som dricksvatten för kor	Ja. Plattvärmväxlare med gårdens kallvatten som sedan används som dricksvatten för kor	Ja. Plattvärmväxlare med gårdens kallvatten som sedan används som dricksvatten för kor	Ja. Plattvärmväxlare med gårdens kallvatten som sedan används som dricksvatten för kor
Tankstorlek, L	8000	8000	8000	8000
Maximal kyleffekt, aktivkyla, kW _{kyla}	10,6	2,9	10,6	2,9
Aktivt kylsystem	Direkt expansion kompressorkylanläggning	Direkt expansion kompressorkylanläggning	Sorptionskylanläggning med egenskaper som SolarNexts Chillii PSC12 med iskyla	Indirekt kopplad sorptionskylanläggning med egenskaper som SolarNexts Chillii PSC12
Elbehov, MWh/år	13,1	14,8	8	6
Värmesänka	Luftkyld kondensor	Luftkyld kondensor	Slutet kyltorn ⁽¹⁾ , för våtdrift vid uteluftstemperaturer överstigande 16 °C	Slutet kyltorn ⁽¹⁾ , för våtdrift vid uteluftstemperaturer överstigande 16 °C
Frikyla			Separat luftkyld värmväxlare kopplad till köldbärarkretsen	Separat luftkyld värmväxlare kopplad till köldbärarkretsen

(1) Ett slutet kyltorn skiljer sig från en konventionell kylmedelkylare genom att vid varm uteluftstemperaturer sprutas vatten över konvektionsytorna i syfte att förstärka värmetransporten från värmebäraren till luften via avdunstning. (se exempelvis Granryd, m. fl. (2003))

Elbehovet för sorptionskyllosningarna beror på att det behövs elmotorer för att driva pumpar och fläktar i systemen, men det är mindre än elbehovet för referenslösningarna.

Då båda referenssystemen har luftkylda kondensorer av standardtyp. Sorptionssystem har både slutna kyltorn. Detta för att möjliggöra en högre COP för

sorptionskylanläggningar under perioder med höga uteluftstemperaturer. Ett kyltorn innebär högre driftkostnader samt vattenförbrukning i tornet.

Slutligen har det inkluderats en separat frikylavärmeväxlare i köldbärarkretsen för sorptionslösningarna. Detta för att sorptionssystem ska kunna utnyttja den låga temperaturen i uteluften under kalla vinterdagar för att kyla mjölk.

Ekonomiberäkningar

Tabell 6 redovisar att LCC-kostnaderna för de skapade sorptionskyllosningarna är avsevärt högre än för respektive referenskylsystem. Detta beror främst på att investeringskostnaden är drygt 4 gånger högre räknat per kW_{kyla} än för en kompressor-kylanläggning. Investeringskostnaden för sorptionskylanläggningen är baserad på kostnaden för en Chillii PSC12 (Pink, pers. medd.).

På grund av att LCC-kostnaden för sorptionskyllosningarna är högre än för referenslösningarna, skapas inget värde för överskottsvärmen från gårdens biogasanläggning och lönsamheten för biogasanläggningen påverkas negativt av systemet. Skillnaden i LCC-kostnaden är så stor att det skulle behövas ett minst 3 gånger högre elpris än det beräknade för att sorptionssystem skulle bli lönsamma.

Tabell 6: LCC-jämförelse för skapade systemlösningar.

	Referenssystem		Sorptionssystem	
	robot	konvent.	robot	konvent.
Kapitalkostnader				
Inköpskostnad, kkr	141	164	378	493
Transport, installation kostnader, 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				
Årliga elbehovet, MWh	14,8	13,1	6	8
Inköpskostnaden för el, kr/MWh	870	870	870	870
Årlig elkostnad, kkr	12,9	11,4	5,2	7,0
Vattenkostnad för kyltorn				
årlig 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, kkr per kton mjölk	25,6	26,3	41,6	52,5
Minskad växthusgas utsläpp, ton CO₂			9,3	5,4
Reduktion växthusgas utsläpp, kr/ton CO₂			2241	6292

Slutsatser

Med tillgänglig teknik på marknaden idag är det möjligt att bygga en sorptionskylanläggning som drivs med återvunnen värme från en biogas-kraftvärmeanläggning av standardtyp 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 sorptionkylmaskins behov för mjölkkylningsändamål 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 mjölkkyla på en gård med robotmjölkning än på en exakt lika gård med konventionell mjölkning. Detta på grund av att på en gård med konventionell mjölkning behövs energilagring i systemet för att anpassa värmeproduktionen från biogaskraftvärmeanläggningen till kylspetsarna som förekommer i samband med varje mjölkning.

Med befintlig sorptionskylteknik har sorptionskylanläggningen för mjölkkyla 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 krävs utveckling med syftet att inköpskostnaden för sorptionskylmaskiner reduceras kraftigt, så att dessa kan bli en intressant lösning för en mjölkbonde som satsar på biogas.

För den andra så krävs det en noggrann modellering av sorptionkylsystemets funktion för en förbättrad optimering av systemets funktion mot rådande förutsättningar på gården.

Resultatförmedling och publikationer

I denna summering av projektet lyfts bara de viktigaste resultaten fram. En mer omfattande redovisning kommer att finnas publicerad i JTI:s serie "Kretslopp & Avfall" under vintern 2009. Projektet har också presenterats som en JTI webbnöts under hösten 2009.

Referenser

- Edström, M., Jansson, L.-E., Lantz, M., Johansson, L.-G., Nordberg, U., Nordberg, Å., 2008. Gårdsbaserad biogasproduktion. System, ekonomi och klimatpåverkan. JTI-rapport Kretslopp & 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.
- Kunze, G., 2008. SolarFrost: The Icebook. SolarFrost Forschung & Entwicklung GmbH, Purkersdorf, Österrike.
- Kunze, G., 2009. Personligt meddelande, Solar Frost GmbH.
- Pink, W., 2009. Werner Pink, personligt meddelande, Solar Next AG

- 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).
- SolarNext, 2009, Chilli cooling kit PSC12. Produktlitteratur. (på engelska).
SolarNext AG
- Svensk Mjök, 2007. Planering och utformning av mjölk tankrum med anslutande serviceutrymmen. Svensk Mjök.

Personliga meddelande

- Gustafsson, M., 2009. Mjölkgårdsexpert, JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.