

INTEGRATION AV ABSORPTIONS- KYLMASKINER I FJÄRRVÄRMESYSTEM



Heimo Zinko, Sven-Olof Söderberg, Elsa Fahlén, Alemayehu Gebremedhin
Linköpings Universitet

Forskning och Utveckling | 2004:119

INTEGRATION AV ABSORPTIONSKYLMASKINER I FJÄRRVÄRMESYSTEM

FÖRSTUDIE

Forskning och Utveckling | 2004:119

Heimo Zinko
Sven-Olof Söderberg
Elsa Fahlén
Alemayehu Gebremedhin

Linköpings Universitet

ISSN 1401-9264
© 2004 Svensk Fjärrvärme AB
Art nr FOU 2004:119

I rapportserien publicerar projektledaren resultaten från sitt projekt.
Publiceringen innebär inte att Svensk Fjärrvärme AB tagit ställning till
slutsatserna och resultaten.

Sammanfattning FOU 2004:119 – Integration av absorptionskylmaskiner i fjärrvärmesystem – Förstudie

I ett europeiskt energisystemperspektiv utgör Absorptionskylmaskiner en viktig komponent för att utnyttja energisystemet på ett mera effektivt sätt. Om elkraft från kraftvärme producerad genom förbränning av avfall eller biomassa kan ersätta fossil kondenskraft, kan CO₂-emissionen väsentligt reduceras. Förutsättning är att det finns tillräckligt mycket värmelast som kan ta emot den värmemängd som genereras parallellt med elkraftproduktionen. Dessutom kan användning av värmedrivna kylmaskiner ersätta kompressordriven kylproduktion, vilket innebär att elkraft frigörs för andra ändamål.

Fjärrvärmedriven absorptionskyla ligger i motfas till värmebehovet och är därför en ideal sommarlast i fjärrvärmesystem. Absorptionskylmaskiner (AKM) har dock en systemteknisk nackdel. De kräver relativt höga framledningsreturer (normalt omkring 90°C) och resulterar i höga returtemperaturer, oftast 80°C eller högre. Därför är de föga lämpade i fjärrvärmesystem med pannor innehållande rökgaskylare eller för system med värmepumpar, solvärme eller liknande.

Målsättningen med den föreliggande rapporten var att studera, vilka åtgärder som står till buds och som är brukliga hos tillämpare av absorptionskylmaskiner för att kunna använda AKM på ett systemtekniskt fördelaktigt sätt, dvs. utan att den höga returtemperaturen inverkar på det övriga systemet. Den AKM typ som är av intresse i fjärrvärmesammanhang är i första hand AKM med vatten som köldmediet och Litiumbromid som absorbent (LiBr/vatten AKM).

Informationen i rapporten är hämtad mest från Tyskland, där problemet med anslutning av AKM till fjärrvärmenät har bearbetats systematiskt. Övriga erfarenheter, främst från Asien, är också beaktade, men är inte lika långtgående som i de tyska arbetena. I synnerhet har vi även tagit hänsyn till de erfarenheter som utvunnits med ensteg-dubbellyft kylmaskiner (Single Effect – Double Lift på engelska (förkortat SE-DL)), vilka kan ge relativt låga returtemperaturer.

Rapportens tyngdpunkt ligger på returtemperaturen. För att förstå de viktiga driftparametrar som påverkar returtemperaturen ges först en teoretisk inledning till de värmetekniska sambanden för huvudsakligen förekommande AKM-schemata (avsnitt 2). Vidare beskrivs de huvudsakliga användningsområdena för AKM (avsnitt 3). Därefter diskuteras krav som speciellt fjärrvärme måste ställa på AKM (avsnitt 4). I avsnitt 5 beskrivs sedan den befintliga marknaden och några viktiga projektexempel som förekommer i olika länder. I avsnitt 6 diskuteras generella systemaspekter för inkoppling av AKM i fjärrvärmesystem.

I avsnitt 7 presenteras systemberäkningar som har genomförts med utgångspunkt från driftparametrar för två typer av AKM: Den vanligen förekommande Ensteg (SE) AKM och en Ensteg - dubbellyft (SE-DL) Hybridmaskin som generellt kan leverera lägre returtemperaturer. Dessa kylmaskiner tillämpas i olika konfigurationer på driften av ett typiskt svenskt fjärrvärmesystem och en given kyllast som följer utetemperaturen för Stockholmsklimat 2002. Totalt simuleras nio olika driftfall. Det visas att returtemperaturen är mycket beroende på dimensioneringen av AKM. AKM dimensionerade för baslast levererar högre returtemperaturer än AKM som kan gå på dellast. Rätta reglerstrategier och kopplingssätt är viktiga ingredienser för att uppnå så låga returtemperaturer som möjligt. Det visas att månadsmedelvärdet av returtemperaturen för en AKM i juli kan, med rätt reglerstrategi och optimalt

inkopplingssätt, vara så lågt som 53°C (SE-DL) resp 55°C (SE), men att vissa tider med hög kyllast och höga returtemperaturer är oundvikliga. Flera AKM i kombination med varierande inkopplingssätt mot fjärrvärmesystem (fram/fram koppling i kombination med fram/retur koppling) ger dessa lägre temperaturer, som i genomsnitt ligger 10°C under den konventionella inkopplingen av en AKM.

Sökord: Fjärrvärme, fjärrkyla, absorptionskylmaskin, returtemperatur, driftekonomi.

Tack

Författarna vill härmed tacka Svensk Fjärrvärme och Statens Energimyndighet för finansiering av projektet. Författarna vill även tacka medlemmarna i en referensgrupp: Viktoria Martin, KTH, Anders Tvärne, Capital Cooling Europe och Henrik Feldhusen, Svensk Fjärrvärme, för värdefulla synpunkter till rapporten.

Summary FOU 2004:119 - Integration of absorption chillers into district heating networks – feasibility study

In the perspective of European energy systems absorption chillers represent an important component for the use of the energy system in a more effective way. If electric power from co-generation produced by burning municipality waste products or biomasses can replace fossil condensing power, it will be possible to considerably reduce CO₂-emissions. The precondition is that there is enough heat load available to receive the quantity of heat generated parallel to the production of electric power. Furthermore, the use of chillers operated by heat can replace compressor generated cooling, which means that electric power is set free for other purposes.

Cooling generated by district heating driven absorption chillers is in counter phase to the normal heat load and is therefore an ideal summer load in district heating systems. However, absorption chillers (abbreviated as AKM in this report) have a drawback in the view of district heating operation. They demand relatively high supply temperature (normally at least 90°C), resulting in high return temperatures, often 80°C or more. Therefore, they are not very suitable in district heating systems with boilers containing stack-gas coolers or for systems involving heat pumps, solar heat and the like.

The objectives of this report were to study available measures that are used by operators of absorption cooling machines in order to make it possible to use AKM in a favourable way, i. e. avoiding that high return temperatures affect the rest of the system. The type of AKM of interest in connection with district heating is in the first place AKM with water as cooling medium and lithium bromide as an absorbent (LiBr/water AKM).

The information in the report comes in most cases from Germany, where the problems with connection of AKM to district heating systems have been treated systematically. Other experiences, chiefly from Asia, are also taken into consideration, but are not as far-reaching as the German developments. Special consideration also has been given to the experiences from chillers with Single-Effect/Double-Lift, which can produce relatively low return temperatures.

The main focus of the report is on the return temperature. In order to understand the important operation parameters influencing the return temperature, a theoretic introduction to the most common AKM schemes is presented in the beginning (chapter 2). Furthermore, the most common fields of application for AKM are described (chapter 3). In chapter 4, the special demands on AKM in connection with district heating are discussed. Chapter 5 gives a description of the existing market and some important examples of projects in different countries. In chapter 6 the general system demands for connection of AKM to district heating systems are discussed.

Chapter 7 presents simulations made on the basis of operational parameters for two types of AKM: The most common Single-Effect (SE) AKM and a Single-Effect - Double-Lift (SE/DL) hybrid machine that can deliver lower return temperatures in general. These chillers are applied in different configurations in the operation of a typical Swedish district heating system and for a given cooling load following the outdoor temperature for the climate in Stockholm in 2002. Totally nine different cases are simulated. It is shown that the return temperature at a large degree is depending on the dimensioning of AKM. AKMs dimensioned for base load deliver higher return temperatures than AKMs that can operate under partial load conditions. Right control strategies and connection methods are important ingredients to reach as low return

temperatures as possible. It is shown that with correct control strategy and optimal way of connection, the mean value of the DH return temperature during a month can be as low as 53°C (SE/DL) and 55°C (SE) for a system in July. However, certain periods with high cooling demand and high return temperatures are unavoidable. Such low temperatures, in average 10°C below the conventional use of an AKM, can be reached, if combinations of several AKM are used (combined supply and supply-return connections).

Subjects: District heating, district cooling, absorption chillers, return temperature, operation strategy.

Acknowledgement

The authors like to thank Swedish District Heating Association and the Swedish Energy Administration for financing the project. The authors would also like to thank an advising committee including Viktoria Martin, KTH (Royal Institute of Technology), Anders Tvärne, Capital Cooling Europe and Henrik Feldhusen, Swedish District Heating Association, for valuable comments.

Förklaringar av enheter och beteckningar

En hel del material för denna rapport kommer från olika källor Tyskland. Därför kan det i figurer och i ekvationer förekomma olika beteckningar för samma enhet/parameter. Här nedan ges en sammanställning av alla i rapporten förekommande beteckningar.

Förkortningar

A, A0, A1, A2	Olika absorptionssteg eller olika absorbatorer	Different absorber units or absorption steps
AKM	Absorptionskylmaskin	Absorption chiller
COP	Köldfaktor	Coefficient of performance
D1	Desorbator	Desorber
DL-IVVX	Dubbellyft med intern värmeväxlare	Double lift with internal heat exchanger
F, F1, F2	Olika förångarsteg	Different evaporator steps
FV	Fjärrvärme	District heating (DH)
G, G1, G2	Olika generatorsteg	Different generator steps
KKM	Kompressorkylmaskin	Compressor chiller
K, K1, K2	Olika Kondensatorsteg	Different condenser steps
KB	Köldbärare	Refrigerant
KV	Kylvatten	Cooling medium (in cooling tower)
LiBr	Litiumbromid	Lithiumbromide
R1	Resorbator	Resorber
SE	Ensteg	Single effect
SE-DL	Ensteg-dubbellyft	Single effect – Double lift
SR-1C	Fram - retur koppling (1 kundnod)	Supply – return with one customer node
SS-1C	Fram - fram koppling (1 kundnod)	Supply – supply connection, one custom.
SR-2C	Fram - retur koppling (2 kundnoder)	Supply – return with two customer nodes
VV	Varmvatten	Domestic hot water
VVX	Värmeväxlare	Heat exchanger

Enheter

a, A	m ²	Area, Yta	Area (of heat exchangers)
k ₁ , k ₂ , k ₃		Effektkoefficienter för beräkning av sambandet mellan köldeffekt och temperatur	Coefficients for calculation of cooling capacity based on generator- and absorber temperature
$\dot{m}$	kg/sek, kg/h	Mass flöde	Mass flow
Q	Wh, J, kWh	Värme	Heat
$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$	W	Effekt	Power, heating capacity
P	W	Effekt	Power, heating capacity
P	Pa, Bar	Tryck	Pressure
R		Reduktionsfaktor (pga isoterernas olika lutning)	Reduction factor due to different inclinations of isoterer
T	°C, K	Temperatur	Temperature
X		Relation mellan FV-flöde och by-pass-flöde (in SE-DL)	Relation between DH flow and by-pass flow (in (SE-DL AKM))
φ		Effektivitetsfaktor	Efficiency factor
ϕ		Flödesfaktor (maximiflöde i förhållande till designflöde)	Flow factor (maximum flow i relation to design flow)

Subskript, svenska

I den mån det förekommer tyska subskript så är de också definierade nedan

abs	absorbator	absorber
för	förångare	evaporator
gen	generator	generator
kon, kond	kondensator	condenser
LP	lösningsskiv	solution pump
ret	retur	return

Subskript, tyska

abs,ein	absorbator, in	absorber, in
arm	utspädd, svag	diluted
gen,ein	generator, in	generator, in
gen,aus	generator, ut	generator, out
kond, aus	kondensator, ut	condenser, ut
verd	förångare	evaporator
reich	koncentrerad, stark	rich

Tyska ordlista

	<i>Några ofta förekommande tyska ord</i>	<i>Some often used German words</i>
Absorber	Absorbator	Absorber
Eintrittstemperatur	Tilloppstemperatur	Inlet temperature
Fernwärme	Fjärrvärme	District heating
Flüssigkeitsabscheider	Vätskeavskiljare	Liquid separator
Heisswasserspeicher	Hetvattenackumulator	Hot water storage
Kaltwasser	Kylvatten	Cooling water (refrigerant)
Kälteleistung	Kyleffekt	Cooling power
Kühlwasser	Kylkretsavtatt	Cooling (tower) water
Leistungsregelung	Effektreglering	Power control
Regelgrösse (Stellgrösse)	Reglerparameter	Control parameter
Rieselfilm	Fallfilm	Sprayed film
Rippenrohrverdampfer	Flänsrörförångare	Fin-tube evaporator
Rücklauftemperatur	Returtemperatur	Return temperature
Temperaturregelung	Temperatureglering	Temperature control
Spitzenkessel	Topplastpanna	Top load boiler
Vorlauftemperatur	Framledningstemperatur	Supply temperature
Volumenstromregelung	Flödesreglering	Volume (mass) flow control
Wärmetauscher	Värmeväxlare	Heat exchanger

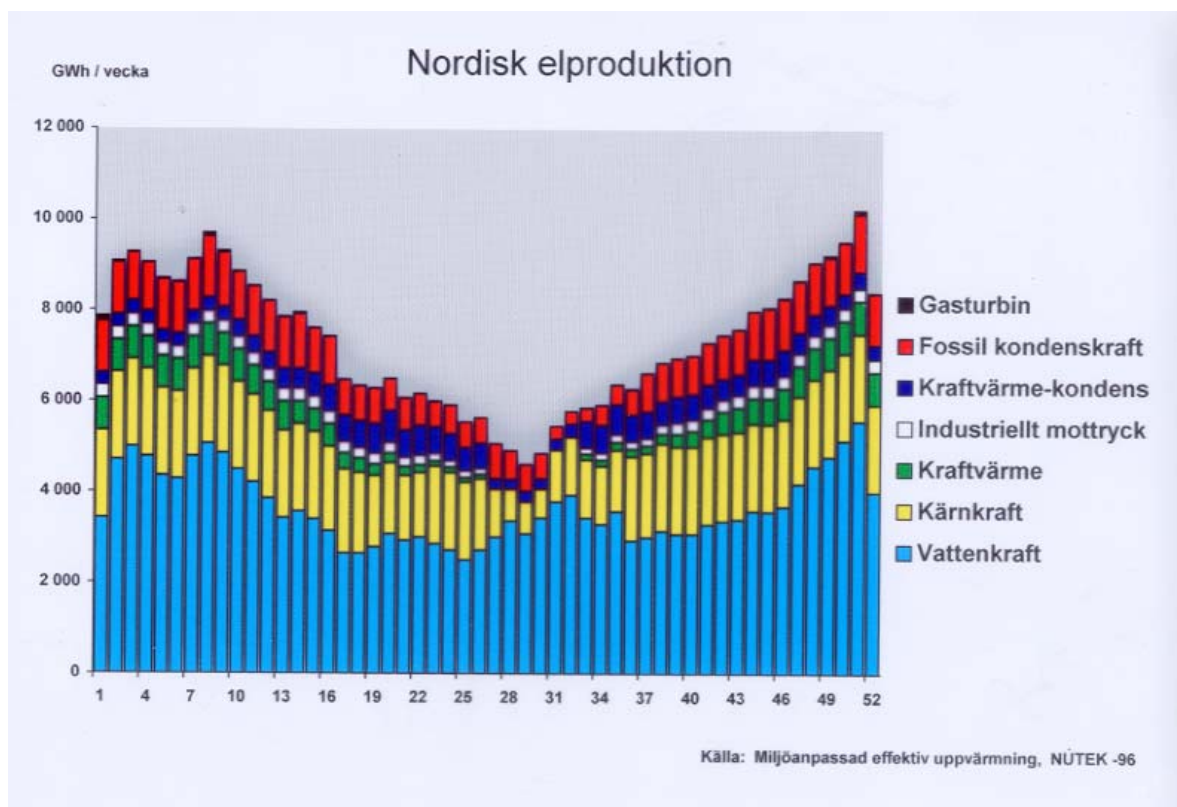
Innehållsförteckning

1.	Inledning	13
1.1.	Bakgrund, problembeskrivning	14
1.2.	Målsättning	14
2.	Absorptionskyla	15
2.1.	Teknik	15
2.1.1.	Princip	15
2.2.	Teori	16
2.3.	Konventionella absorptionskylmaskiner	17
2.3.1.	Funktion för standard LiBr/vatten - AKM med pool-värmeväxlare ..	18
2.4.	Alternativa AKM tekniker	20
2.4.1.	H ₂ O/HN ₃	21
2.4.2.	Alternativa LiBr/Vatten AKM	22
2.4.2.1.	Ensteg (Single-Effect) AKM	22
2.4.2.2.	Dubbelyft med intern värmeväxlare (DL-IVVX)	22
2.4.2.3.	Dubbelyft utan intern värmeväxlare (DL)	23
2.4.2.4.	Ensteg – dubbelyft (Single-Effect - Double-Lift) med stor fjärrvärmeavkyllning	24
2.5.	Reducering av drivtemperaturen	26
2.5.1.	Tillämpningsmöjligheter av de olika processvarianterna	26
2.5.2.	Värmeväxlardesign för lägre drivtemperaturer	26
2.5.2.1.	Standarddesign	27
2.5.2.2.	Alternativa designvarianter av generatorvärmeväxlaren	29
3.	AKM Användning	33
3.1.	AKM drivna med fossilt bränsle	33
3.2.	Trigeneration	33
3.3.	AKM för luftkonditionering	34
3.4.	AKM i fjärrkylesystem	35
4.	Fjärrvärmens speciella krav	38
4.1.	Absorptionskyla och värmelast - två extrema dimensioneringsfall ..	38
4.2.	Olika inkopplingssätt av AKM	39
5.	Marknaden	41
5.1.	Världsmarknaden	41
5.2.	Vanliga AKM-system	41
5.2.1.	Carrier	41
5.2.2.	York	42
5.2.3.	Trane	42
5.2.4.	Entropie	42

5.2.5.	McQuay/Sanyo	43
5.2.6.	Thermax	43
5.2.7.	Broad	43
5.2.8.	Övrigt	43
5.3.	Användningsexempel	44
5.3.1.	Linköping.....	44
5.3.1.1.	Tekniska Verken/Universitetssjukhuset	44
5.3.1.2.	Tekniska Verken/Universitetsområdet	46
5.3.2.	Göteborg	48
5.3.2.1.	Göteborg Energi/Östra sjukhuset.....	49
5.3.3.	Andra FV-anslutna AKM i Sverige (Västerås, Umeå)	50
5.3.4.	Universitet Dortmund	51
5.3.5.	München	52
5.3.6.	SE-DL i Düsseldorf och Berlin	55
5.3.7.	AKM i Cheongju, Korea	56
5.3.8.	Tokyo Water Front projekt.....	56
6.	Generella systemaspekter	57
6.1.	Reglerstrategier	57
6.2.	Generella systemaspekter	57
7.	Jämförelse av olika inkopplingssätt av AKM i fjärrvärmenät ..	59
7.1.	Bakgrund	59
7.2.	Problemställning	59
7.3.	Modellen för fjärrvärme- och fjärrkyla.....	61
7.4.	Absorptionskylmaskiner anslutna till fjärrvärme.....	61
7.4.1.	Alternativa kopplingsscheman för AKM i fjärrvärmesystem	63
7.5.	Systemmodelleringar	65
7.5.1.	Modellen	65
7.5.2.	Beräkningsresultat	67
7.5.3.	Slutsatser från systemmodelleringarna.....	70
8.	Sammanfattande slutsatser	71
9.	Referenser.....	74

1. Inledning

Det har visats i olika studier [2], [3], [4], att en stor miljövinst på europeisk energisystemnivå kan åstadkommas, om elproduktionen kan ställas om så att kolkondenskraft ersätts med el baserad på biomassa. Om elen då samtidigt genereras i kraftvärmesystem och värmen används, blir systemnyttan av biomassaproducerad elkraft extra stor. För varje sparad MWh kolkondenskraft minskar då utsläppen med ca 1 ton CO₂. T ex har man i Ref [2] konstaterat att den sammanlagda nordiska potentialen för biobränslebaserad elkraft i kraftvärmesystem är 150 TWh, vilket kan minska de europeiska CO₂-utsläppen från kraftproduktion med 15 %.



Figur 1-1: Produktionsmix för europeisk kraftproduktion. Diagrammet visar att kolkondens ligger på marginalen även under sommaren.

Production mix for European electricity production. The diagram shows that coal condensing power generation is used on the margin also in summer time.

Vintertid är ovannämnda ersättning av kolkondens med kraftvärmesystem inget större problem. Värmebehovet i Nord- och Mellaneuropa är då stort, och systemtekniskt kan mycket kraftvärme integreras, åtminstone i de länder som har utbyggda fjärrvärmenät.

Problem uppstår dock sommartid, då det fortfarande finns kolkondens på marginalen, se **Figur 1-1**, men då det samtidigt i de flesta fjärrvärmenät endast finns ett litet värmeunderlag.

Det finns alltså ett behov av att utöka värmeunderlaget sommartid. Fjärrvärmedriven *absorptionskyla* nämns som en möjlighet som ligger i motfas till värmebehovet och som därför anses som idealisk komplettering av fjärrvärmesystem.

Absorptionskylmaskiner (AKM) har dock en systemteknisk nackdel. Returtemperaturerna från absorptionsvärmepumparnas fjärrvärmeväxlare är höga, oftast 80°C eller högre. Därför är de föga lämpade i fjärrvärmesystem med biobränslepannor med rökgaskylare eller för system med värmepumpar, solvärme eller liknande.

Så länge det finns enstaka fjärrkylelaster i ett system med överskott på värme, är detta kanske inget större problem. En enstaka hög returtemperatur är då kanske inte av särskilt stor betydelse. Men om man, som fjärrvärmebranschen hoppas, vill åstadkomma en utökad marknad för AKM i fjärrvärmesystem, kan AKM skapa allvarliga driftproblem. Det är alltså av stort intresse att få veta hur absorptionsvärmepumpar kan användas på ett effektivt sätt i fjärrvärmesystem.

I princip finns det olika möjligheter att hantera returtemperaturproblemet:

- a) strunta i det och acceptera att AKM lasten är liten i förhållande till VV-lasten.*
- b) använda AKM som ger låga returtemperaturer*
- c) hitta inkopplingslösningar som ger låga returtemperaturer under sommar drift.*

I litteraturen hittar man alla tre sätt. Normalt gäller princip a). I Tyskland har man dock starkt engagerat sig i frågan att utveckla effektivare AKM enligt b). Men man funderar i Tyskland precis som i Holland och Japan över systemlösningar enligt princip c). Även i Västerås har man tillgripit en sådan lösning.

Nedan ges en översikt över det vi tyckte var av intresse i sammanhanget.

1.1. Bakgrund, problembeskrivning

AKM kan användas som alternativ till kompressordrivna kylmaskiner (KKM) för kylning av lokaler och byggnader. Med hänsyn till primärenergianvändning (baserad på termiska kraftverk som fallet är när kolkondens ligger på marginalen) är AKM och KKM ungefär likvärdiga. Fördelen är att i AKM används inga klorväten. Eftersom primärenergiförbrukningen av AKM och KKM är ungefär likvärdig, så krävs det dock normalt en termodynamiskt betingad skillnad mellan elpris och värmepris, dvs ungefär en faktor 2,5 - 3, för att AKM ska kunna anses som ett ekonomiskt lönsamt alternativ till KKM. Den största användningsmöjligheten för AKM finns när drivvärmens härrör från spillvärmearläggningar eller från kraftvärmeverk, i vilka värmedelen betraktas som en biprodukt från elproduktionen. Så är dock normalt inte fallet i Sverige.

En mycket intressant möjlighet för användningen av AKM är drift med värme från fjärrvärmenät, eftersom detta skulle skapa ett extra värmeunderlag på sommaren, då det normala värmeuttaget är som lägst. Det är därför av stort intresse att undersöka, på vilket sätt AKM kan utnyttjas i svenska fjärrvärmenät. En översiktlig beskrivning av tekniken för värmedriven kyla finns bl a också hos Rydstrand, M., Martin V., Westermark, M., referens [30].

1.2. Målsättning

Målsättningen med detta projekt är att studera, vilka åtgärder som står till buds och som är brukliga hos tillämpare av absorptionskylmaskiner för att kunna använda AKM på ett systemtekniskt fördelaktigt sätt, dvs utan att den höga returtemperaturen inverkar på det övriga systemet.

2. Absorptionskyla

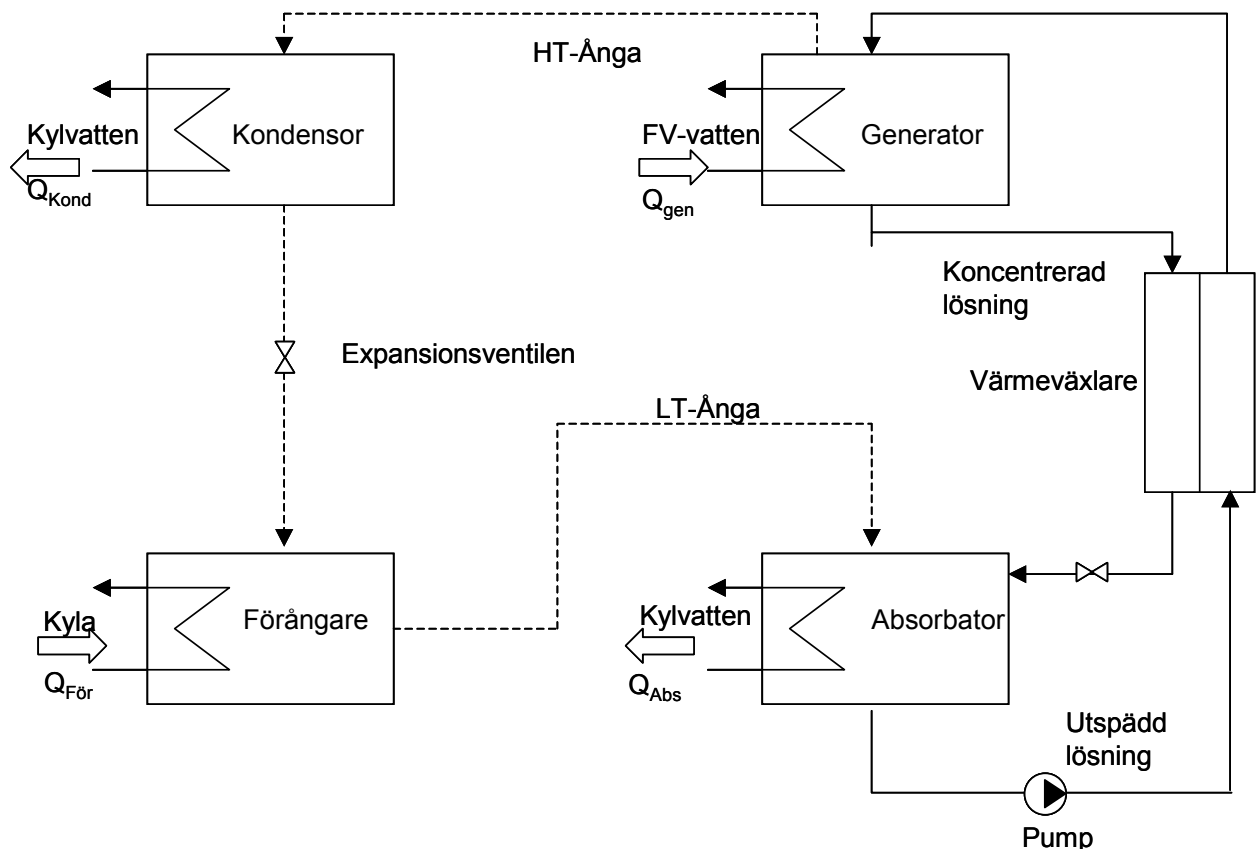
Här ges en sammanfattning av den teoretiska bakgrunden till absorptionskylmaskiner, men även till mera avancerade - och mindre vanligt förekommande - varianter på denna teknik, som en som alternativ till den konventionella ”ensteg-AKM (SE)” analyserade ”ensteg-dubbellyft AKM (SE-DL)”. Läsare som är bekanta med teorin kan hoppa över detta avsnitt och fortsätta till avsnitt 3.

2.1. Teknik

2.1.1. Princip

Absorptionsprocessen arbetar enligt samma princip som andra kylprocesser, där ett köldmedium förångas vid lågt tryck och låg temperatur. Det som främst skiljer absorptionsprocessen från andra kylprocesser är arbetsmediet, nämligen vatten (i litiumbromid-AKM), och att drivenergin till processen är värme. I absorptionsprocessen utnyttjas ett arbetspar, vanligtvis litiumbromid/vatten eller vatten/ammoniak.

En absorptionskylmaskin består i sin enklaste form av fyra huvudkomponenter: Generator, kondensor, förångare och absorbator (**Figur 2-1**). Förutom huvudkomponenterna finns även interna värmeväxlare och pumpar.



Figur 2-1: Schema över absorptionskylmaskin.

Absorption chiller, schematic.

Generators uppgift är att separera arbetsmedierna. Genom att tillföra värme förångas vattnet och lösningen koncentreras. Vattenånga förs vidare till kondensorn och den koncentrerade litiumbromidlösningen återförs till absorbator, vanligtvis via en värme-

växlare. Den värme som används i generatoren kan tas från t.ex. fjärrvärme, gas eller ånga.

Kondensorn har till uppgift att kondensera vattenånga från generatoren genom att denna värmeväxlas mot en kylvattenkrets. Det kondenserade vattnet samlas upp i kondensorn och förs via en expansionsventil till förångaren.

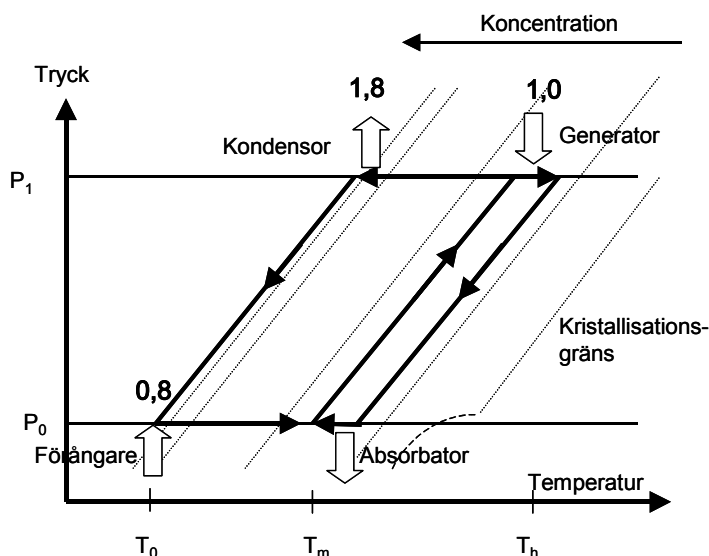
I förångaren är tryck och temperatur så låga att vattnet som sprutas in från kondensorn förångas av värmets som tillförs från den vätska som ska kylas. Vattenånga förs vidare till absorbatoren. I absorbatoren blandas koncentrerad litiumbromidlösning från generatoren och vattenånga från förångaren. Litiumbromiden som sprayas in i absorbatoren absorberar vattenånga och skapar det låga tryck som är nödvändigt för att förångningen ska kunna ske vid låg temperatur. Då litiumbromiden absorberar vattenånga frigörs även en del värme som måste kylas bort för att behålla det låga trycket. Då litiumbromiden späds ut av den absorberade vattenånga kan den inte längre absorbera mer vatten och pumpas därför till generatoren för att koncentreras. En utförlig beskrivning av absorptionskylmaskiner kan fås i [1]. Se även avsnitt 2.4.

2.2. Teori

Digrammet enligt **Figur 2-2** kan tjäna som utgångspunkt för beräkning av verkningsgraden av en AKM. Energiverkningsgraden beräknas som förhållandet mellan (utgående) kallvattnets kyleffekt och (fjärrvärmemediets) tillförda driveffekt. Detta förhållande betecknas som köldfaktor eller "Coefficient of Performance" COP:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{för}}}{\dot{Q}_{\text{gen}} + P_{LP}} \approx \frac{\dot{Q}_{\text{för}}}{\dot{Q}_{\text{gen}}} \quad (1)$$

I princip bör effekten P_{LP} som behövs för lösningspumpens drift inkluderas i Ekvation 1, men oftast är den så liten att den försummas.



Figur 2-2: Energiflöden i absorptionskylmaskiner.

Energy flows in absorption chillers.

En reversibel absorptionsprocess är den mest effektiva och bästa av alla processer och för denna kan den ideala Carnot-verkningsgraden COP_C beräknas med hjälp av balansen för tillförd och bortförd energi respektive exergi.

Energibalansen:

$$\dot{Q}_{\text{för}} + \dot{Q}_{\text{gen}} = \dot{Q}_{\text{abs}} + \dot{Q}_{\text{kon}} \quad (2)$$

där subskripterna ”för, gen, abs, kon” står för respektive förångare, generator, absorbator, kondensor.

Exergibalansen:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{för}}}{T_{\text{för}}} + \frac{\dot{Q}_{\text{gen}}}{T_{\text{gen}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{abs}}}{T_{\text{abs}}} + \frac{\dot{Q}_{\text{kon}}}{T_{\text{kon}}} \quad (3).$$

Carnotverkningsgraden kan således beräknas som följer (alla temperaturer måste anges i Kelvin):

$$COP_C = \frac{T_{\text{gen}} - T_{\text{kon}}}{T_{\text{gen}}} \cdot \frac{T_{\text{för}}}{T_{\text{kon}} - T_{\text{för}}} \quad (4).$$

Beräkning av Carnot verkningsgraden förutsätter att alla energiomvandlingsprocesser som äger rum i de fyra komponenterna är ideala, dvs reversibla och vid konstanta temperaturer. Så är inte fallet i verkligheten. Dessutom är lutningen mellan de två isotererna (kurvor med samma koncentration) inte densamma, utan det finns ett visst temperaturberoende samband mellan dessa som kan beskrivas med en reduktionsfaktor R:

$$R = \frac{T_{\text{kon}} - T_{\text{för}}}{T_{\text{gen}} - T_{\text{kon}}} \quad (5).$$

T ex är R för LiBr/vatten-processen vid en koncentration av 55 viktprocent ca 0,88 [20].

Som första approximation för en real 1-steps process kan man således beräkna COP genom kombination av Ekv (4) och (5):

$$COP = \frac{T_{\text{för}}}{T_{\text{gen}}} \cdot \frac{1}{R} \quad (6).$$

Således blir COP för en process med en förångartemperatur på 0°C och med en generatortemperatur på 90°C samt R = 0,88 ca 0,84.

I verkligheten tillkommer dock en hel del värmeförluster och temperaturförluster pga värmeöverföringen. COP bör således multipliceras med en effektivitetsfaktor ϕ som kan beräknas genom att ta hänsyn till de enstaka apparaternas utförande [20].

$$COP = \frac{T_{\text{för}}}{T_{\text{gen}}} \cdot \frac{1}{R} \cdot \phi \quad (7).$$

Effektivitetsfaktorn ϕ gör att typiska värden för COP av AKM ligger omkring 0,7 men att värden av 0,8 har rapporterats för maskiner av nyare konstruktion [24].

2.3. Konventionella absorptionskylmaskiner

Traditionellt finns det AKM på marknaden som behöver en drivenergi på ca 120°C (Ensteg - SE) resp. 170°C (dubbeleffekt - DE). Dessa har köldfaktorer (COP) på 0,7 (SE) resp 1,2 (DE). Huvudtillämpning för dessa AKM är drift i direkt anslutning till produktionsanläggningar där det finns tillgång till spillvärme med dessa höga

temperaturer från avgas- eller kylvatten, exempelvis från gasturbiner eller industriell ånga. Att placera dessa AKM lokalt hos kunder och utnyttja fjärrvärmenäten för drivenergi ger ett betydligt lägre COP och fungerar mindre bra under sommaren, då man vanligen har låga framledningstemperaturer på fjärrvärmen. En annan nackdel med konventionella AKM är att förångningsprocessen i generatoren, dvs den process som använder sig av drivenergin, är nära nog isotherm och därför endast kan åstadkomma en avkylning på ungefär 10°C. En så låg avkylning resulterar alltså i en hög returtemperatur, något som är otjänligt i fjärrvärmesystem, såväl för distributionen (låg värmeeffekt, hög pumpeffekt) som för produktionen (svårt att utnyttja komponenter som kräver låga returtemperaturer såsom värmepumpar, rökgaskylare, kraftvärmekondensorer). En vanlig drifttemperatur i svenska nät under sommaren är ungefär 75/50°C (fram-/returtemperatur). Av denna anledning är huvudintresset i den här rapporten riktat mot AKM och deras olika driftsätt vid lägre drifttemperaturer. Typiska driftparametrar är som följer:

Kyleffekt: 1 MW

Fullast drifttid: ca 500 h

Framledningstemperatur sommar: 75 – 85°C

Returtemperatur: max 65°C, om möjligt lägre

Kallvattentemperatur: 6/12°C

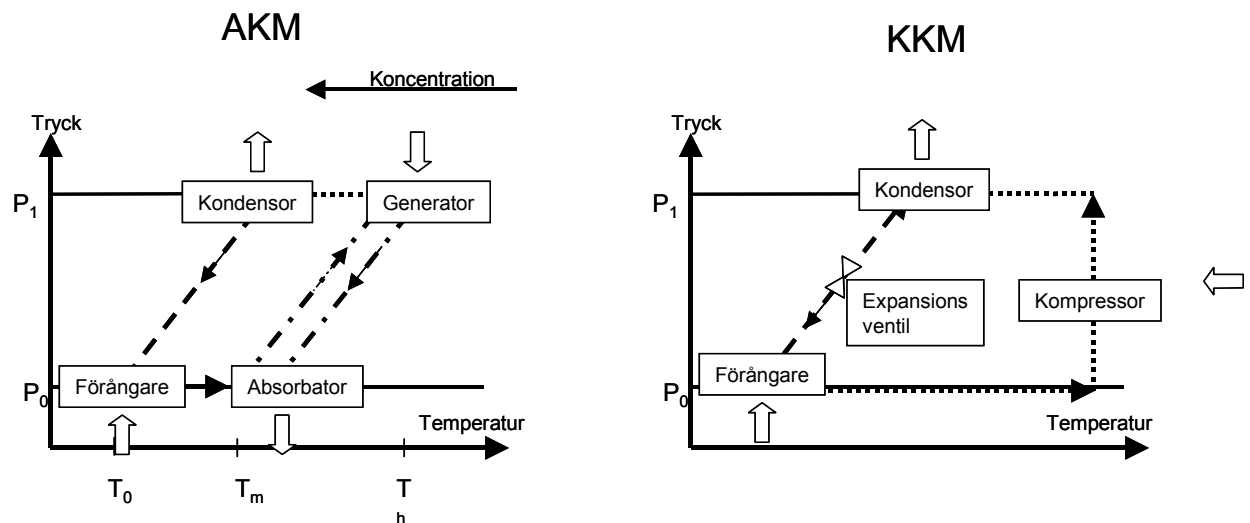
Kyltornstemperatur: 27/35°C

Den mest intressanta AKM som möter dessa kriterier är baserad på arbetsmediet LiBr/vatten.

2.3.1. Funktion för standard LiBr/vatten - AKM med pool-värmeväxlare

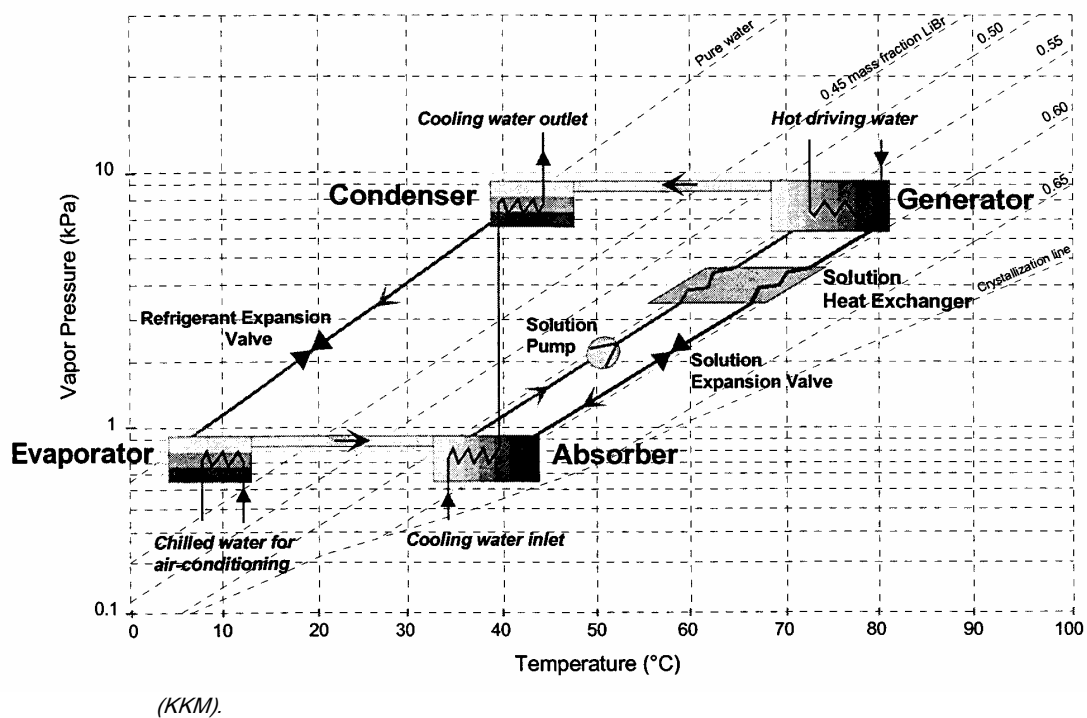
AKM och KKM använder sig av samma princip för att producera kyla. Ett köldmedel förångas vid lågt tryck och låg temperatur. I denna process måste den förångningsvärme tillföras som tas från mediet som ska distribuera kyla (kallvatten). Vid ett högre tryck och högre temperatur kondenseras denna ånga, varvid värme avges som måste kylas bort, t ex i en kylkrets som innehåller ett kyltorn. (Värmepumpar använder samma princip med den skillnaden, att den tillförda lågtemperaturvärmen härrör från en lågvärdig värmekälla och den värme som genereras vid hög temperatur är den värme som utnyttjas). Den väsentliga skillnaden mellan AKM och KKM är sättet att komprimera ångan från lågtryck till högtryck (Figur 2-3). I KKM används en kompressor som drivs av en mekanisk (t ex i bilar) eller elektrisk motor (i de flesta hussystem). I större anläggningar kan drivkraften även komma från en gas- eller ångturbin. I AKM däremot används en princip kallad *termisk kompression*, som använder sig av de egenskaper som härrör från absorptionen av ett köldmedel i ett lösningsmedel.

Grundprincipen för arbetssättet hos en AKM visas i Figur 2-4. Huvudkomponenterna är förångaren (evaporator), absorbatoren, generatoren och kondensorn. **Figur 2-4** visar processdiagrammet för en standard (ensteg) AKM som visas i ett arbetsdiagram för ett bestämt arbetspar (LiBr-vatten). Arbetskurvorna blir då raka linjer. Vidare är kurvorna för konstant koncentration av saltlösningen (*Isoterer*) konstanta linjer. Begränsningen på vänster sida utgörs av rent vatten och på höga sidan av saltets kristallisation. Inom arbetsfältet representerar trycket lösningsmedlets (vattens) ångtryck, vid given temperatur och koncentration.



Figur 2-3: Schematisk jämförelse mellan AKM och KKM.

Schematic comparison between absorption chillers (AKM) and compressor driven chillers



Figur 2-4: Processdiagram för standard LiBr-Ensteg AKM. Enligt referens [18].

Process diagram for standard LiBr-Single-Effect AK [18].

Vid produktion av kyla fråntas kylmediet (kallvatten) värme i förångaren för att förångas vatten vid låg temperatur, ca 4 - 6°C, dvs värme tillförs processen. Ångan breder ut sig och kommer i kontakt med absorbenten. Vid lika temperatur gäller här att ångtrycket över en saltlösning i vatten är lägre än för själva vattnet, vilket är lika med att koktemperaturen för lösningen är högre än för vatten. En typisk absorbatortemperatur är ca 35 – 40°C. Saltlösningen absorberar således vattenånga i absorbatoren vid högre temperatur än förångarens temperatur, varvid absorptionsvärme

frigörs. Det är denna värme som måste kylas bort i ett kyltorn (eller vattenkylare). Samtidigt genererar absorptionsprocessen den låga trycknivån som råder i absorbatoren och förångaren.

Genom absorption av vattenånga blir lösningen *vattenrik*. En lösningsmedelspump pumpar nu den *utspädda* lösningen till generatoren som arbetar vid ett högre tryck och högre temperatur. Processtemperaturen är omkring 70°C. I generatoren drivs en del av vattenångan ut. Den nu *koncentrerade* lösningen expanderar tillbaka till absorbatoren. För att undvika att varmt lösningsmedel strömmar tillbaka till absorbatoren installeras en värmeväxlare mellan den utspädda och den koncentrerade lösningen för att utbyta värme.

I generatoren tillförs själva drivenergin för AKM processen. I regel är drivtemperaturen 90 – 95°C. Det är här fjärrvärme kommer till användning. Generatoren består alltså av en värme-växlare som överför värme till lösningsmedlet på ett sådant sätt, att vattenånga frigörs och strömmar vidare till kondensorn. Här kondenserar vattenånga till vatten vid omkring 40°C och expanderar tillbaka till förångaren. I kondensorn uppstår avvärme ungefär vid samma temperatur som i absorbatoren, som alltså också måste kylas bort i en kylkrets. En typisk temperatur i ett kyltorn är 27 – 35°C.

Den i diagrammet (Figur 2-4) presenterade processen kan således karakteriseras på följande sätt, vilket också beskriver de karakteristiska dragen hos AKM:

Det maximala temperaturlyftet mellan förångare och absorbatoren bestäms av kristallisationsgränsen, vilken är särskilt låg vid låga ångtryck. Om man vill åstadkomma ett större lyft måste *flera lyftsteg* tillämpas.

Lutningen av *isoterkurvan* (dvs linjer av samma koncentration) bestämmer – vid given kyltornstemperatur (absorbator-/kondensortemperatur) – temperaturdifferensen mellan absorbator och generator och således den nödvändiga temperaturen i generatoren. Lägre kylkretstemperatur innebär också möjlighet att tillämpa lägre generatortemperatur.

Om den maximala drivtemperaturen är begränsad, vilket är fallet i fjärrvärmesystem (i synnerhet under sommaren) så kan det nödvändiga temperaturlyftet (som bestäms av kyltornstemperaturen) endast uppnås i flerstegsprocesser.

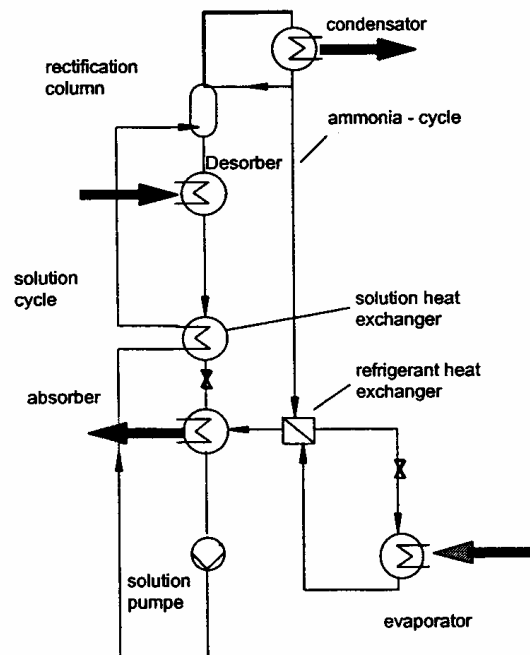
Dessa processkaraktäristika resulterar i tekniska begränsningar för AKM i fjärrvärmetillämpningar. Drivtemperaturen måste vara minst 70 – 75°C. Detta innebär att vid en sommartemperatur på 80°C är avkylningen maximalt 10°C. Oftast är den av tekniskt/ekonomiska skäl (kostnadsoptimering) lägre än så.

2.4. Alternativa AKM tekniker

För att förbättra situationen kan olika tekniska modifieringar göras. Dels kan man arbeta med andra arbetspar. Ett vanligt alternativt arbetspar är vatten/ammoniak. Dess kemofysikaliska parametrar pekar dock mot fel håll, processen behöver vanligtvis högre drivtemperatur. Vidare finns det en rad tekniska varianter på LiBr-AKM, dels dubbeleffekt, och dels dubbellyft/halveffekt [21]. Även typ och utformning av de värmeväxlare som används i absorbatoren och i generatoren har en viss betydelse, vars optimering kan bidra till bättre temperaturutnyttjande [20].

För att uppnå lägre drivtemperaturer kan man också tänka sig arbetspar vars isoter har en brantare lutning. Kandidater är varianter på LiBr/vatten kombinationen, såsom LiBr/ZnCl₂/ LiCl, LiBr/ZnCl₂, LiBr/LiI, m m. Det är dock än så länge oklart, om dessa arbetspar verkligen kan leda till en bättre AKM-ekonomi [22].

2.4.1. H₂O/HN₃



Figur 2-5: Flödesschema för vatten/ammoniak AKM enligt [17].

Scheme for water/ammoniak AKM according to ref [17].

Vatten/ammoniak cykeln fungerar i princip likadant som LiBr/vatten-cykeln, men vid högre tryck och en större temperaturdifferens. Generatoren kräver oftast 140°C och ligger egentligen utanför fjärrvärmeområdet, men intresset är stort för kraftvärmekopplingen eller s k trigeneration, dvs kombinationen kraft-, värme- och kylproduktion (se vidare avsnitt 3.2).

En principskiss för en H₂O/NH₃ -AKM framgår av **Figur 2-5**.

Den största skillnaden mot LiBr/vatten-processen ligger i det faktum, att skillnaden i ångtrycket mellan vatten och ammoniak är förhållandevis litet, vilket medför att det vid generatorens desorptionsprocess genereras en blandning av vatten- och ammoniakånga. Denna blandning måste separeras i en efterkopplad rektifieringskolonn, i annat fall skulle COP reduceras väsentligt. I övrigt förlöper processen likadant såsom den beskrivs för LiBr/vatten.

Till skillnad från LiBr-AKM finns det för H₂O/NO₃-AKM knappast några standard-maskiner på marknaden. Till undantaget hör en ammoniak-AKM från Deutsche Babcock Borsig AG. I Tabell 2-1 jämförs de två huvudtyperna av AKM i jämförbar storlek.

Tabell 2-1: Tekniska data för två typiska AKM med LiBr/vatten resp H₂O/NH₃ som drivmedel.

Technical data for two typical AKM with LiBr/H₂O and H₂O/NH₃, respectively.

Typ	Sort	H ₂ O/NH ₃	Li/Br/H ₂ O
Beteckning		Babcock AK600	Carrier 16JB-047
Kyl-kapacitet nominell	kW _{kyl}	250 ...800	500
Förångnings temp	°C	+1030	4
Kapacitet vid 110/90 , 27/32°C	kW _{kyl}	438	479
Temp på köldmedel	°C	-5	6
COP		0,57	0,69
Innehåll köldmedel absorbent		1700 kg	152 liter 417 liter
Dimension (LxBxH)	m	8x3x3,8	5,1X1,6X2,2
Kostnad	kUS\$	380	

2.4.2. Alternativa LiBr/Vatten AKM

2.4.2.1. Ensteg (Single-Effect) AKM

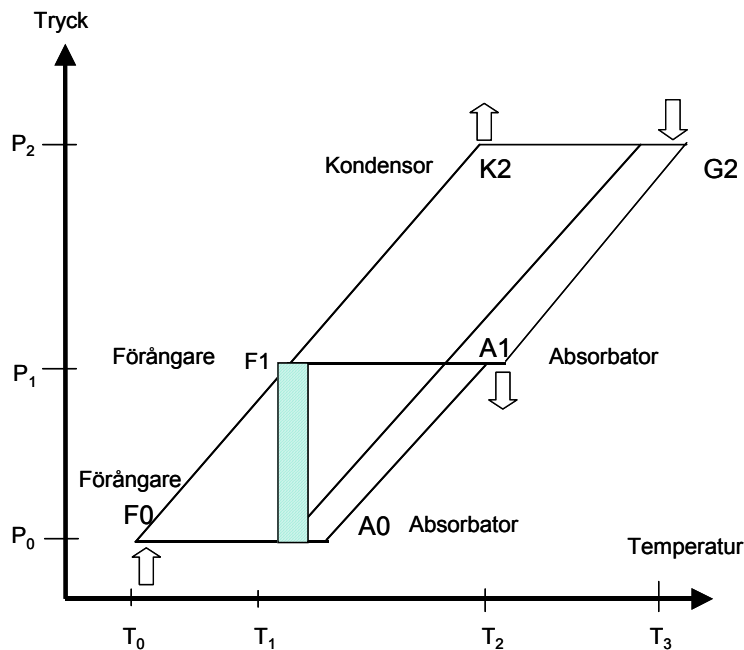
Standard AKM (Ensteg) som finns på marknaden har följande driftparametrar:

Köldfaktor (COP)	0,7 – 0,8
Drivtemperatur:	90°C (in), 80°C (ut)
Kylvatten:	35°C (in), 27°C (ut)
Köldmedium:	12°C (in), 6°C (ut).

Av **Figur 2-2** framgår att med en enhet drivvärme som levereras till generatoren kan 0,8 enheter kyla produceras i förångaren, totalt tillförs alltså processcykeln 1,8 enheter värme. I jämvikt måste alltså denna tillförda värme kylas bort i kondensorn och absorbatorn. För att över huvud taget kunna driva en SE-AKM med någorlunda bra effektivitet, behövs värmeväxlare med mycket låg skillnad mellan lägsta drivtemperatur och processtemperatur i såväl generator som absorbator. Dessa värmeväxlare måste vara specialdesignade, oftast konstruerade som fallfilm- eller plattvärmeväxlare.

2.4.2.2. Dubbellyft med intern värmeväxlare (DL-IVVX)

Denna AKM-typ använder en tvåstegsprocess som arbetar på tre trycknivåer, se Figur 2-6. Komponenterna generator G2, kondensor K2, förångare F0 och absorbator A0 har samma funktion som i motsvarande SE-cykel. Värmen som genereras i A0 blir dock inte bortkyld utan används i en medeltryckförångare F1 för att förångna en del av kondensatet som kommer från kondensorn K2. Denna ånga absorberas i medeltryckabsorbatorn A1.



Figur 2-6: Schema för en dubbellyft AKM med intern värmeväxlare.

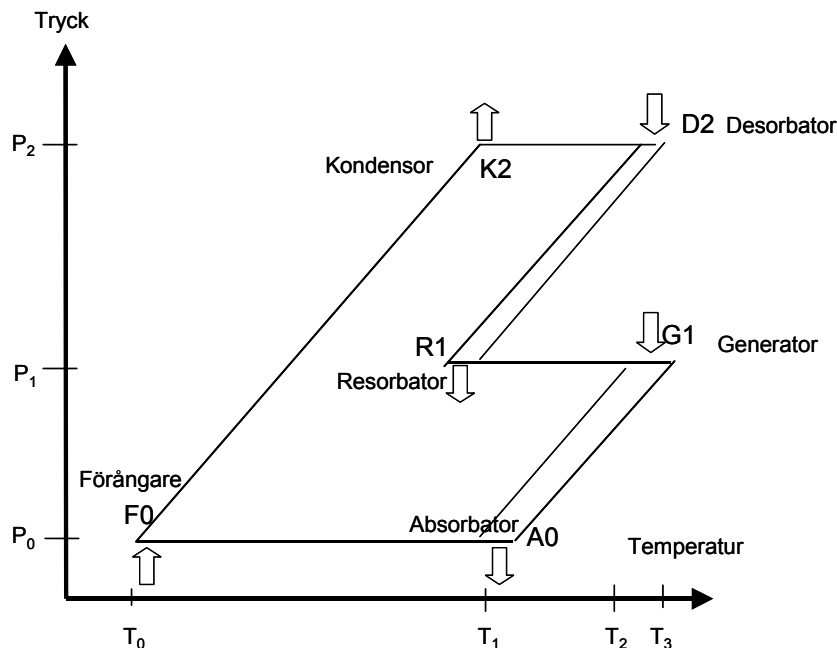
Scheme for a Double-Lift AKM with internal heat exchanger.

Maskinen utnyttjar alltså den interna värmen effektivare och avger endast värme i K2 och i A1. Temperaturnivån i absorbatorn A1 är betydligt högre än i SE-cykeln, vilket innebär att avvärme kan föras bort i ett torrt kyltorn istället för en våt kylning som behövs i SE-kretsen (sommartid). Om man förutsätter samma kyltornstemperatur som i SE, så kan drivmediet i generatoren istället avkylas till en lägre temperatur, omkring 50 – 55°C. Dubbellyft-AKM med internvärmeväxlare har dock ett mycket större antal komponenter och blir väsentligt dyrare än SE-AKM. Största nackdelen är dock att köldfaktorn endast blir omkring 0,4, dvs. COPn är hälften så stor som för SE-AKM pga det dubbla temperaturlyftet. 1,4 enheter drivvärme kyls bort i A1 och kondensorn K2.

2.4.2.3. Dubbellyft utan intern värmeväxlare (DL)

I denna variant av dubbellyft (**Figur 2-7**) finns det två olika lösningsmedelkretsar med olika koncentrationer (A0-G1 och R1-D2). Utdrivning av ånga sker i generator G1 resp desorbator D2 vid temperaturnivån T2-T3, vilket kan vara så låg som 50°C (retur) - 70°C (fram). Absorption sker dels i absorbatorn A0 och dels i resorbatorn R1¹. Fjärrvärmesystemet tillförs i G1 och D2 och kan således utnyttjas med en större avkylning jämfört med SE-cykeln. Om fjärrvärmesystemet är t ex 80°C, så kan fjärrvärmevattnet vid lämplig dimensionering av värmeväxlaren kylas ner till 50°C. I jämförelse med DL-IVVX finns det färre komponenter, framför allt bortfaller den interna värmeväxlaren. COP är dock även i detta fall begränsad till ca 0,4.

¹ Desorbatorn resp resorbatorn har liknade funktioner som generatoren resp. absorbatorn. Vid tillförsel av värme kan vatten drivas ut från lösningen (desorbator), vid avkylning kan vattenångan gå i lösning (resorbator).

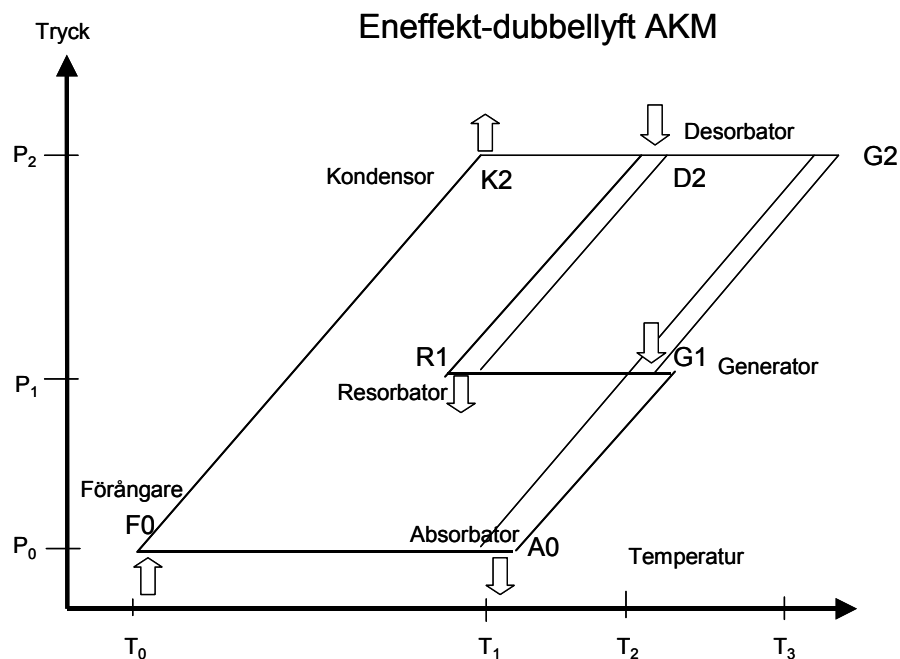


Figur 2-7: Schema för dubbellyft AKM utan intern värmeväxlare.
Scheme for a Double-Lift AKM without internal heat exchanger.

2.4.2.4. Ensteg – dubbellyft (Single-Effect - Double-Lift) med stor fjärrvärmeavkylning

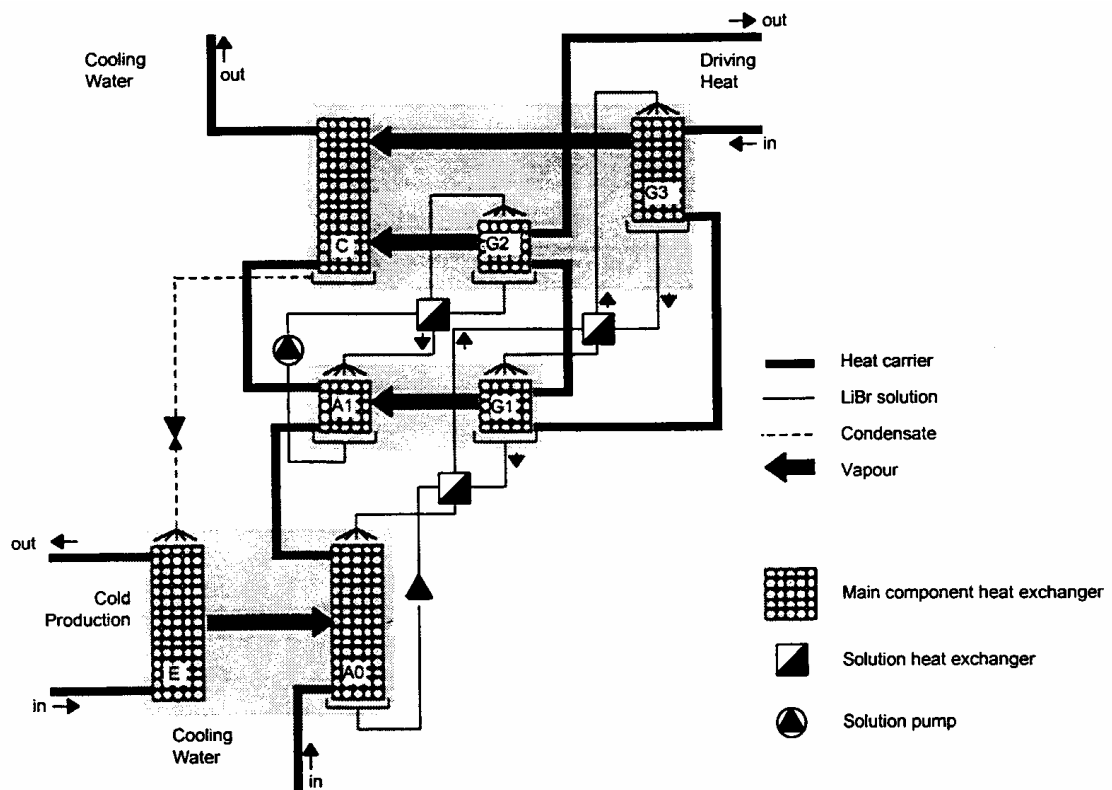
Om man kombinerar funktionerna SE och DL får man en AKM-cykel som även kombinerar fördelarna hos båda cyklerna (**Figur 2-8**). Framförallt kan man uppnå en stor avkylning av fjärrvärmemediet. I processen finns det två lösningskretsar med olika koncentrationnivåer. Lösningen i den stora kretsen A0-G2-G1-A0 koncentreras genom värmetillförsel i generatorerna G1 och G2. Den utdrivna ångan strömmar från generatoren G2 till kondensorn K2 resp från generatoren G1 till resorbatorn R1, där resorption sker i en utspädd lösning. Denna lösning pumpas till desorbatorn D2 där den blir återkoncentrerad. Avdriven vattenånga strömmar från D2 till kondensorn K2. I denna cykel finns det *tre* olika inkopplingsmöjligheter för fjärrvärme: G2, G1, D2 med tre olika temperaturnivåer. Fjärrvärmeavkylningen är således störst i denna SE-DL cykel. Värme måste kylas bort från kondensorn K2, resorbatorn R1 och absorbatoren A0. Köldfaktorn ligger nu mellan värdena för DL-AKM och SE-AKM, dvs mellan 0,4 och 0,8, beroende på hur ångvägen G1-R1 utnyttjas. Maskinen är alltså en hybrid av SE och DL och kan alltefter förhållandena köras som ren SE-AKM eller ren DL-AKM och i glidande kombination av båda, med en COP som motsvarar bidraget från båda cyklerna. I kretsen behövs det alltså totalt tre lösningsvärmeväxlare och två lösningspumpar (Figur 2-9), dvs en lösningsmedelvärmväxlare och en lösningsmedelpump mer än i SE-AKM). SE-DL processen kan t ex köras med 90°C framledningstemperatur och fjärrvärmevatten kan kylas ner till 60°C eller lägre beroende på dimensioneringen av generatoren.

Det är denna SE/DL-process som trots det större antalet komponenter och därav resulterande högre pris kan vara intressant för användning i fjärrvärmetillämpningar.



Figur 2-8: Schema för ensteg – dubbellyft AKM med stor avkylning.

Scheme for Single-Effect – Double-Lift AKM with large cooling of DH-system.



Figur 2-9: Tekniskt schema över ensteg - dubbellyft AKM lämplig för fjärrvärmedrift.

Technical Scheme of a Single-Effect - Double-Lift AKM suitable for district heating applications (Ref [18],[25]).

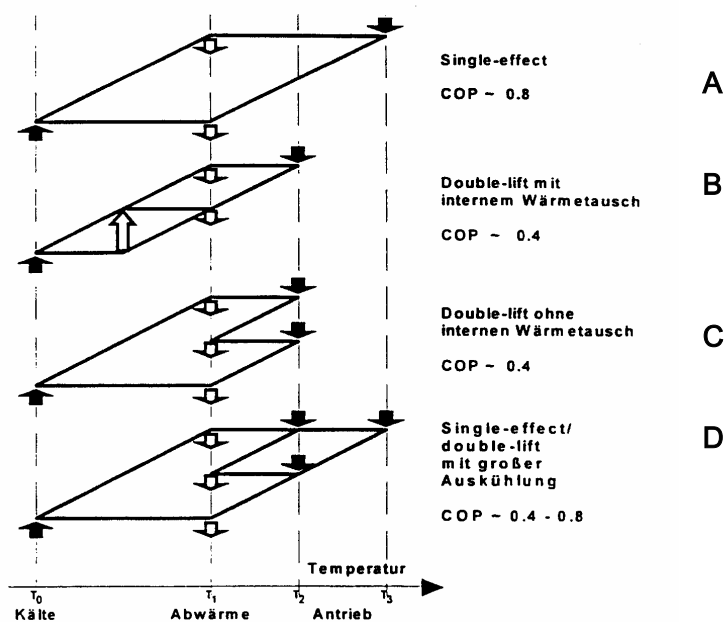
2.5. Reducering av drivtemperaturen

2.5.1. Tillämpningsmöjligheter av de olika processvarianterna

Figur 2-10 visar alla fyra processvarianterna i en översiktsbild. Bilden visar att processen Dubbellyft möjliggör ungefär en halvering av temperaturdifferensen mellan drivtemperatur och kyltemperaturen i kyltornskretsen. Den lägsta drivtemperaturen blir T2 istället för T3. Som det framgår av

Figur 2-4 är temperaturen T3 (generatorns processtemperatur) ca 70°C och kondensorns prerocesstemperatur T1 ca 40°C. T2 ligger då ca i mitten mellan T1 och T3, dvs vid ca 55°C, vilken är den lägsta möjliga generatortemperaturen. Fördelen med DL-processen (med eller utan värmeväxlare) är att AKM-cykeln över huvud taget kan köras vid låga drivtemperaturer. Men detta sker på bekostnad av COP: Lägre drivtemperatur innebär termodynamiskt helt enkelt lägre processarbete, dvs COP blir ungefär 0,4.

I processen ensteg - dubbellyft kan fjärrvärmemediet avkylas till samma temperatur T2 som för DL. Här kan man fritt välja vilken andel lösningsmedel som körs via ensteg respektive via dubbellyft. Om man fördelar andelarna lika mellan båda cyklerna blir COP ungefär 0,6.



Figur 2-10: Jämförande översikt över 4 olika AKM varianter enligt [22]:

A: SE, B: DL-intern VVX, C: DL, D: SE-DL.

Comparison of for different AKM types: A: SE, B: DL-internal HEX C: DL, D: SE-DL.

2.5.2. Värmewäxlardesign för lägre drivtemperaturer

När vi diskuterade fjärrvärmemediets temperaturnivåer för AKM i föregående avsnitt så förutsatte vi generatorutföranden vars medeltemperaturdifferens mellan fjärrvärmemediet och processmediet är ca 20°C. En processtemperatur på 70°C kräver då därför en fjärrvärmeingångstemperatur på minst ca 90°C. Oftast krävs ännu högre temperaturer. Temperaturnivåerna är då baserade på den standarddesign som AKM-

tillverkarna som York eller Carrier erbjuder. Självklart kan avancerad värmeväxlar-design medföra att kravet på fjärrvärmemetemperaturen blir lägre. Detta har undersökts i detalj i en doktorsavhandling av Peter Noeres vid Umsicht, Tyskland [20]. Med hjälp av ett statistiskt simuleringsprogram kunde Noeres simulera sambandet mellan olika driftparametrar. I det följande återges vissa resultat ur denna avhandling.

2.5.2.1. Standarddesign

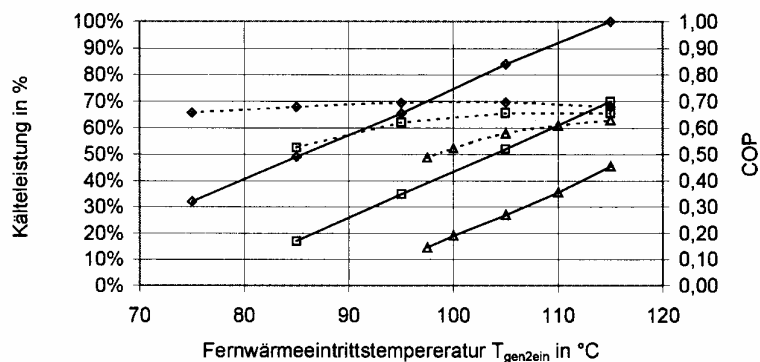
I standard-AKM används som värmeöverföringskomponenter (med undantag av lösningsmedelvärmväxlaren) rörvärmväxlare (kondensor och absorbatör) resp. flänsrörvärmväxlare (generator, förångare) inbäddade i en tank, se **Figur 2-15**. Mediet utanför flänsarna kan bestå av ånga eller vätska som strömmar med låg hastighet.

I diagrammet Figur 2-11 visas sambandet mellan fjärrvärmemetemperatur, köldeffekt (i procent av designvärdet vid 115°C FV-framledningstemperatur) och COP för olika kyltornstemperaturer (temperaturer in i absorbatören). Det linjära sambandet mellan kyleffekt och generatortemperatur framgår tydligt. Vidare visas att COP i det här fallet är begränsad till ca 0,7 för låga absorbatortemperaturer, men sjunker, när denna temperatur ökar. Resultaten gäller för Yorks YIA AKM-serie enligt produktbladet [26].

Ur diagrammet kan man härleda ett enkelt samband för köldeffekten:

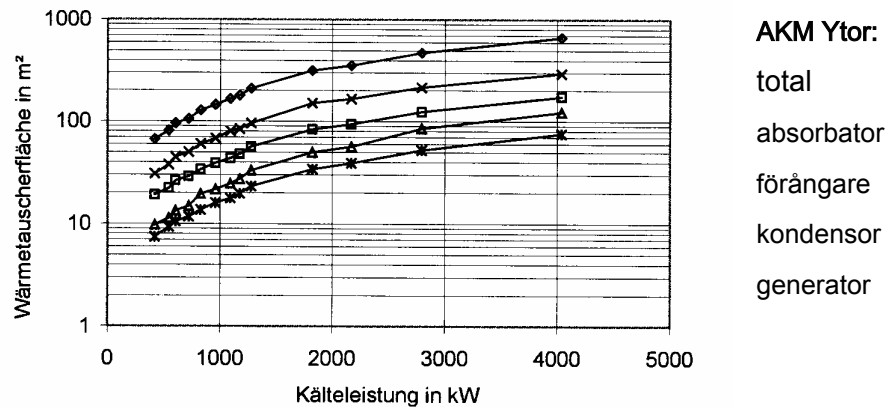
$$\dot{Q}_{\text{för}} = k_1 \cdot T_{\text{gen},\text{in}} + k_2 \cdot T_{\text{abs},\text{in}} + k_3 \quad (8).$$

Enligt sambandet i diagrammet Figur 2-11 kan k_1 , k_2 , k_3 beräknas till respektive 0,01728, -0,3992 och 0,0985 för en kylmedeltemperatur av 6/12°C. Figur 2-11 visar att kylkretsens temperatur in till absorbatören är en viktig parameter för den uppnåbara köldeffekten och COPn i en AKM. Ju lägre absorbatortemperatur, desto högre blir köldeffekten i samma maskin.



Figur 2-11: Effektkarakteristik av en AKM enligt [20] och [26]. Heldragna linjer: Effekt. Streckade linjer: COP. Tre olika absorbatortemperaturer (◇27, □35, △41°C). Lägst absorbatortemperatur ger högsta kapacitet.

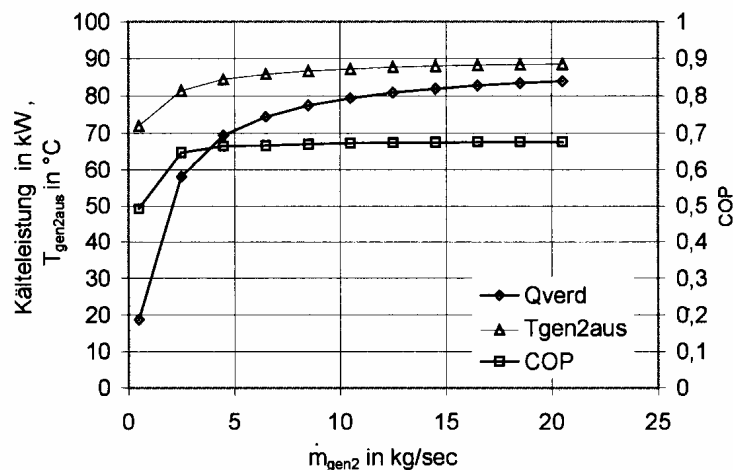
Cooling capacity of an AKM according to ref. [20] and [26]. The full lines denote cooling capacity, the dashed lines the COP. Three different absorber temperatures are depicted: (◇27, □35, △41°C). Lowest absorber temperature means highest capacity.



Figur 2-12: Beräknade värmeväxlarytor enligt [20].

Calculated heat exchanger areas according to Ref. [20]. Surface areas for the following components are depicted from the top: Total, absorber, evaporator, condenser, generator.

Diagrammet i **Figur 2-12** illustrerar sambandet mellan värmeväxlaryta (rörinsida) och köldeffekt för en typisk dimensionering för standard LiBr-AKM med kylmedeltemperatur 6/12°C, kyltornstemperatur 27/32°C och generatortemperatur 108/115°C. Den inre värmeöverföringsytan är ungefär 0,15 – 0,2 m²/kW och den yttre vid flänsrör ca 0,32 m²/kW. Dessa resultat visar att absorbator-värmeväxlarens dimensionering spelar en viktig roll vid design av AKM, dels för att den behöver den största ytan och dels för att absorptionstemperaturen är bestämmande för såväl köldeffekten som COP.

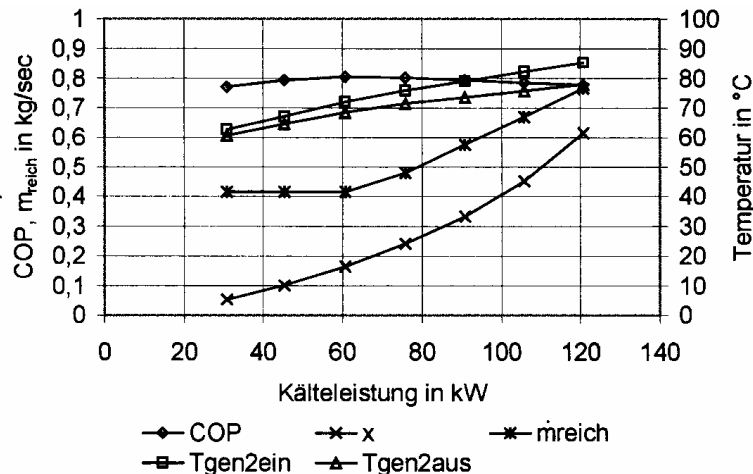


Figur 2-13: Köldeffekt, FV-returtemperatur och COP som funktion av hetvattenflöde genom generatorm enligt [20]. ◇ Förångareffekt, △ Tretur generator, □ COP.

Cooling capacity, DH-return temperature and COP as a function of hot water flow through the generator according to [20]. ◇ Evaporator power, △ Tretur- generator, □ COP.

Ett sätt att reglera AKM visas i Figur 2-13. Här återges det beräknade sambandet mellan köldeffekt och hetvattenflödet. Genom att reglera hetvattenflödet är det möjligt

att reglera en AKM utan att nämnvärt minska COPn. Vid alltför små flöden sjunker dock COP. En annan möjlighet att variera kyleffekten är *temperaturreglering* med hjälp av returflödet från generatoren och konstant massflöde. Samtidigt regleras även flödet av den koncentrerade lösningen för att säkerställa en bra värmeövergång i fallfilmabsorbatorn. Detta kan åstadkommas genom att införa en by-pass mellan den koncentrerade och den utspädda lösningen för att cirkulera ett större lösningsflöde genom generatoren. I **Figur 2-14** visas att det på så



Figur 2-14: Dellastegenskaper av AKM vid temperaturreglering [20]. Tgen2ein = Tgen-in, X = förhållandet mellan FV-flöde och bypassflöde, Tgen2aus = Tgen-ut, mreich = mkoncentrerad. Abscissa visar kyleffekten.

Partial load operation of AKM in the case of temperature control according to [20]. The German abbreviations denote the following parameters: Tgen2ein = Tgen-in; X = relation between DH flow and by-pass flow, Tgen2aus = Tgen2out; mreich = mreach. Abscissa shows cooling capacity.

sätt är möjligt att uppnå nästan konstant hög COP inom ett reglerområde av 30 till 120 % av normvärdet. Vid 30 % kyleffekt kan hetvattenreturtemperaturen i generatoren sänkas till 60°C.

Ytterligare en möjlighet att öka COP och köldeffekten är att förbättra värmeväxlarna eller deras ytor, detta för att öka avkylning av hetvattenmediet och minska temperaturfallet vid värmeöverföring och därmed sänka drivtemperaturen.

2.5.2.2. Alternativa designvarianter av generatorvärmeväxlaren

Pga de i standardutförandet stora temperaturdifferenser mellan primär- och sekundärsida i generatoren är det särskilt viktigt att uppnå en optimal värmeväxlarkonstruktion. I Tabell 2-2 ges en sammanställning över de karakteristika som gäller för tre olika typer av värmeväxlare som är lämpliga att använda i ensteg AKM.

Noeres [20] simulerade tre olika generatorkonfigurationer avseende fjärrvärmemediets fram- och returtemperatur (se Figur 2-15).

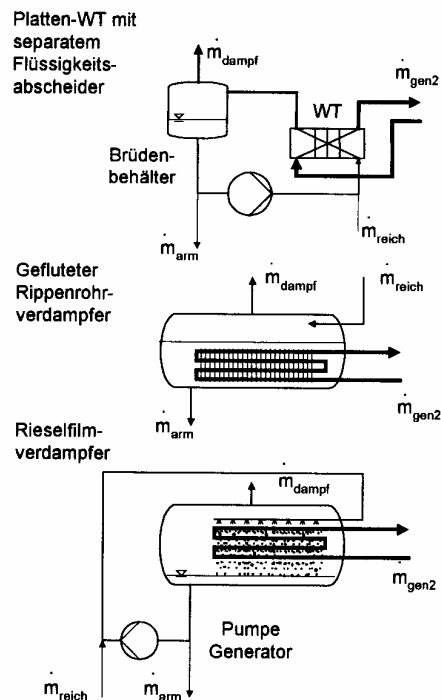
Figur 2-16, Figur 2-17 och Figur 2-18 visar den specifika värmeöverföringsytan, kyleffekten och COP för olika fjärrvärmeframledningstemperaturer och som funktion av fjärrvärmereturtemperaturen. Det visar sig att såväl sprayfilm- som plattvärmeväxlare vid lägre fjärrvärmeframledningstemperaturer kräver mycket mindre ytor än den vanliga flänsrörsgeneratoren. Samtidigt framgår av beräkningarna att köldeffekten kan

förbättras avsevärt med dessa båda värmeväxlarkonfigurationer. Detta innebär också att vid bibehållen generatortemperatur kan avkylningen av fjärrvärmevattnet öka och pga högre absorbatortemperatur högre COP åstadkommas. COP av 0.83 har uppgivits för nyare AKM som nu erbjuds marknaden [29].

Tabell 2-2: Jämförelse av olika värmeväxlare för ensteg AKM.

Comparison of different types of heat exchangers for Single-Effect AKM.

Typ	Flänsrörförångare	Sprayfilmförångare	Plattvärmeväxlare med vätskeavskiljare
Flödestyp	tank med omröring	kors-/motström	motström
Hjälpenergibehov för	--	Lösningssirkulation	Lösningssirkulation
Regleringsmöjlighet	Stor tröghet pga hög volym och låg genomströmning	Mindre volym ger bra reglering	Mycket bra
Övrigt	Tröga driftegenskaper	Viktigt med jämn lösningss fördelning	Cirkulationspump och vätskeavskiljare behövs
Konstruktion	Driftegenskaper kan förbättras med speciell flänsdesign. Inte så bra vid låga hetvattentemperaturer	Stora värmeöverföringsvärden kan uppnås, men driftförhållandena är inte särskilt väl kända. Extra lösningss pump krävs.	Stora värmeöverföringsvärden kan uppnås, väl simulerbar, extra lösningss pump krävs.
Kostnader			Endast halva kostnaden jmf med flänsrör VVX



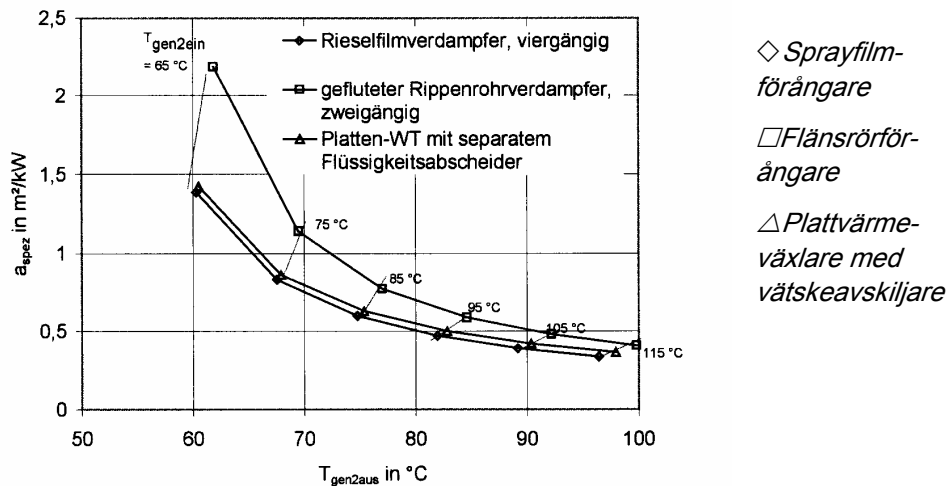
Plattvärmeväxlare med vätskeavskiljare

Flänsrörväxlare i tank

Sprayfilmförångare

Figur 2-15: Schema över olika generatorutföranden enligt [20].

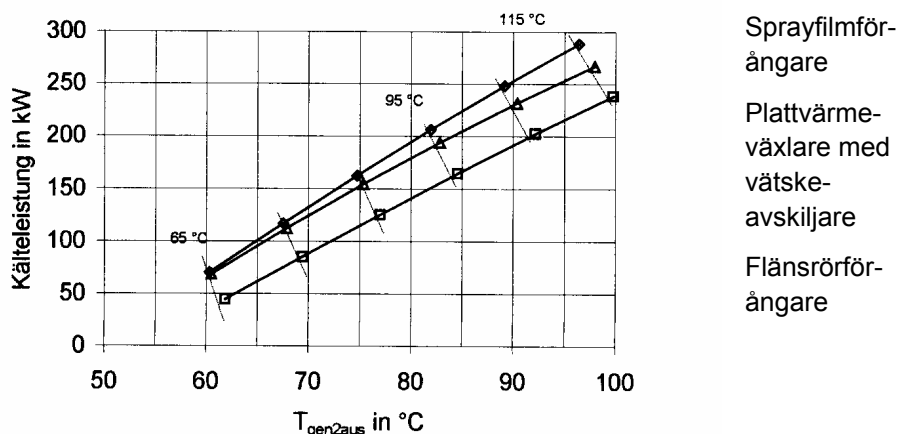
Scheme of different generator designs [20].



Figur 2-16: Spec. behov för VVX-yta a_{spec} vid olika temperaturer T_{gen-in} och T_{gen-ut} för AKM i tre olika generatorutföranden enligt [20].

Specific HEX-area a_{spec} at different temperatures T_{gen-in} and $T_{gen-out}$ for three different designs of generator heat exchanger in AKM according to Ref. [20]. The three designs are from top to bottom: Fin-tube evaporator, spray film evaporator, flat plate HEX with liquid separator.

Figur 2-16 visar att generatorkonstruktioner i utföranden som plattvärmewäxlare eller sprayfilmförångare avsevärt kan minska behovet på värmewäxlarytor; alternativt kan en större temperaturdifferens över generatoren åstadkommas. Därmed blir det billigare att tillämpa större ytor med större avkylning som följd. T_{ex} kan en sprayfilmförångare med samma

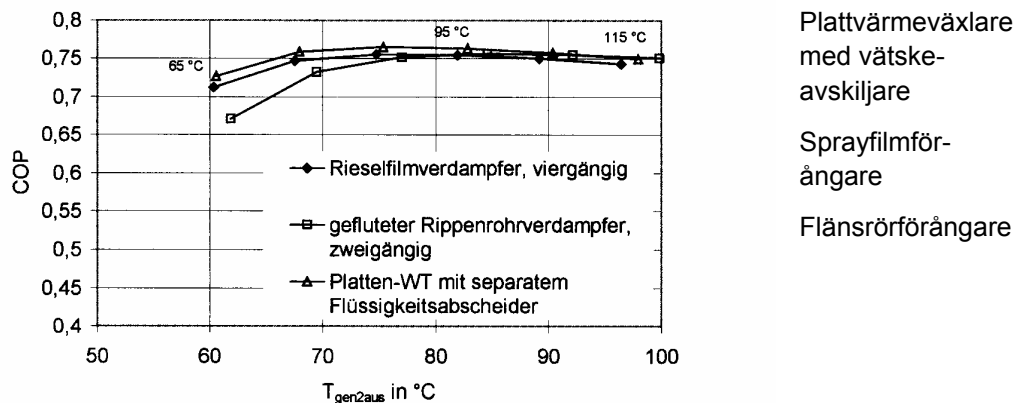


Figur 2-17: Kyleffekt vid olika temperaturer T_{gen-in} och T_{gen-ut} för AKM i tre olika generatorutföranden enligt [20].

Cooling capacity for temperatures T_{gen-in} and $T_{gen-out}$ for AKM with three different generator designs according to Table 2-2 and Ref. [20]. The three designs are from top to bottom: Spray film evaporator, flat plate HEX with liquid separator, fin-tube evaporator.

värmeväxlaryta avkylas till 67°C istället för 75°C, vilket är fallet i en standardflänsrörförångare. (Kyltornskrets 27/35°C, köldbärarkrets 6/12°C).

I **Figur 2-17** visas köldeffekt som funktion av generatorns returtemperatur för olika fjärrvärme-framledningstemperaturer. Som framgår av figuren, så tillåter sprayfilmvärmeväxlare (och plattvärmeväxlare) att en högre kyleffekt kan uppnås vid samma returtemperatur, alternativt erbjuder möjlighet till bättre avkylning av fjärrvärmemediet vid samma effektuttag.



Figur 2-18: COP vid olika temperaturer T_{gen-in} och T_{gen-ut} för AKM i tre olika generatorutföranden enligt [20].

COP for different temperatures T_{gen-in} and T_{gen-ut} for AKM with three different generator designs [20]. The three designs are from top to bottom: Flat plate HEX with liquid separator, spray film evaporator, fin-tube evaporator.

COPn skiljer sig dock å andra sidan inte så mycket från dessa tre varianter, när returtemperaturen är över 70°C. För lägre temperaturer ner till 60°C, är dock de två effektivare värmeväxlartyperna att föredra. Som framgår av Figur 2-18 kan så låga returtemperaturer som 68°C uppnås vid framledningstemperaturer av 75°C. Man måste dock komma ihåg (se Ekv 8, kap 2.5.2.1) att kyleffekten hos AKM är proportionell mot framledningstemperaturen och att det således endast går att uppnå ca halva effekten jämfört med en drivtemperatur på 95°C. COPn är dock i båda fallen densamma, i vårt fall 0,75.

Förbättringen av AKM bör alltså alltid ses i relation till en standarddesign. För att tillhandahålla AKM till rimliga kostnader har man tidigare oftast använt 95°C som standarddrivtemperatur med en avkylning på 10°C. Som det framgår av beskrivningen i avsnitt 2.5, så finns det goda förutsättningar att uppnå andra lösningar – lågtemperaturdesign, om värmeväxlarna modifieras eller förstoras. Detta är således mera en ekonomisk än teknisk fråga. Illustrationerna i detta avsnitt visar att det **principiellt** är möjligt att uppnå bra avkylning med avancerade värmeväxlare. Därtill kommer också att de låga värmeövergångstalen i nya VVX-typer möjliggör en mera effektiv köldproduktion, där COP i sistone lyckats pressas upp mot och över 0,8 (se avsnitt 5.3.3).

Simuleringarna visade också att det i första hand är generatorns utförande som påverkar möjligheten att åstadkomma låga returtemperaturer. Variationerna vid absorbatoren, kondensorn och förångaren gav däremot inga större skillnader vad gäller

COP och fjärrvärmemetemperaturen (men däremot vad gäller kostnader för värmeväxlaren och hela AKM).

3. AKM Användning

Här ges en kort översikt över de olika användningssätten av AKM som förekommer i praktiken. Den klassiska formen av AKM var absorptionskylskåpet, utvecklat på tjugotalet av Munter/von Platen. Idag är trigeneration, dvs kombinerad produktion av elkraft, värme och kyla av stort intresse för AKM-tillämpningar. Fjärrvärme och solenergi är några nyare tillämpningar som dock har framtiden för sig.

3.1. AKM drivna med fossilt bränsle

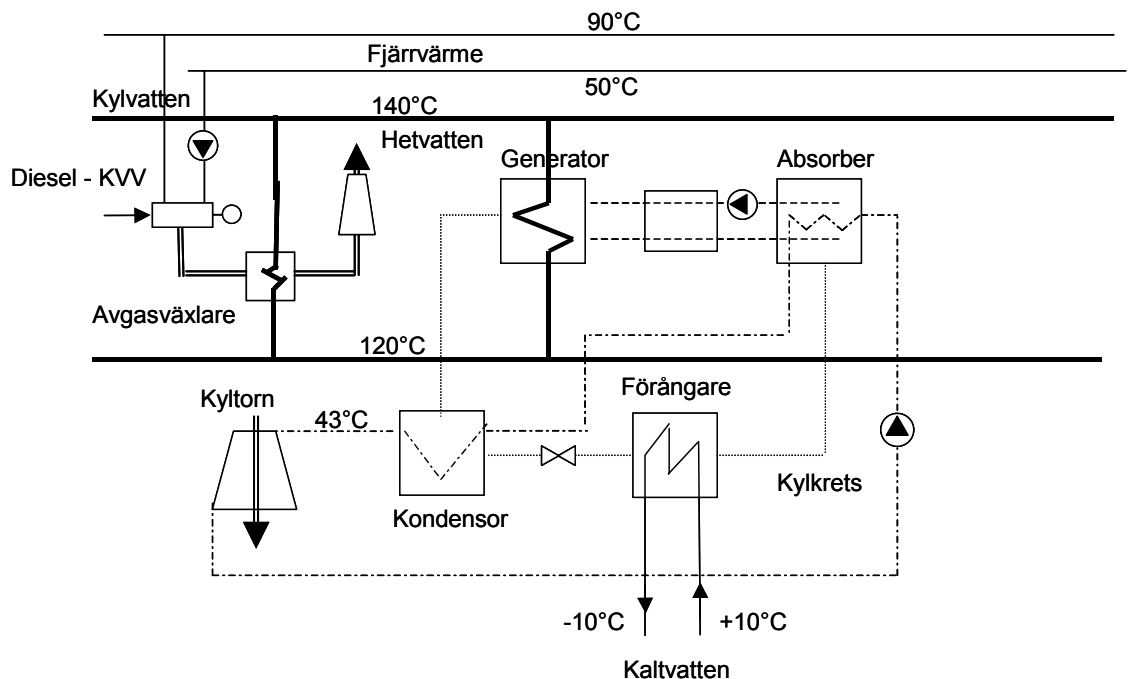
Den ursprungliga användningen av den över 100 år gamla AKM tekniken är det klassiska kylskåpet som utvecklades av von Platen [15] på 1930-talet. Dessa kylskåp fungerade såväl med fotogen som med stadsgas och el som drivmedel, men byttes successivt ut under efterkrigsåren mot kompressorkylskåpet. Med billig tillgång till naturgas blev så småningom AKM åter intressant, främst för industriella tillämpningar. Med vatten/ammoniak processen kan kyla produceras ner till -60°C , vilket är av stort intresse för industrin. I gengäld är man tvungen att arbeta med höga tryck, i kondensorn t ex upp till 1,5 MPa vid 40°C , för att uppnå kondensation av ammoniakångan. Det höga trycket kräver också högre generatortemperaturer, och 140°C är vanligt för ammoniakdrivna AKM. Naturgas (och naturligtvis olja) utgör således en vanlig energikälla för $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ AKM. Särskilt gaseldade AKM används i stor omfattning inom industrin i Tyskland och utgör idag ca 10 % av kylmarknaden [16].

3.2. Trigeneration

Ett ökande intresse inom EU gäller kombinerade kraft-, värme- & kylmaskiner, sk trigeneration. Dessa system bygger oftast på ett kraftvärmeverk baserat på en ångturbin eller en dieselmotor. Ångan på 140°C kan tappas av vid köldböbehov, i system med dieselmotorer kompletteras värme från kylvattnet med en avgasvärmeväxlare som ökar kylvattnets temperatur till 140°C , så att tillräckligt hög generatortemperatur uppnås i AKM. Värmen kan sedan användas för t ex två-stegs LiBr/vatten-cykeln eller $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ -cykeln. Beroende på kyllost, kan kyla produceras på bekostnad av el, och vice versa. Nedan ges ett exempel för en naturgasdriven trigeneration-anläggning.

En viktig tillämpning är leverans av kyla till t ex ishallar där krav på lågtemperaturkyla ställs. I den tyska orten Weißwasser användes en sådan anläggning kopplad till fjärrvärme [7]. Eftersom kylbehovet för istillverkning är mellan -6 och -16°C , så kom endast en $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ -AKM i fråga. Dessa kräver dock i sin tur fjärrvärmemetemperaturer på ca 140°C , vilket även i Tyskland ligger över den maximala drifttemperaturen.

Lösningen är en kombinerad kraftvärme/kyla-anläggning (trigeneration) baserad på en dieselmotor. Kraftverket har 1,5 MW termisk effekt och 380 kW kyleffekt (samt 1,3 MW elektrisk effekt). Generatorns ingångstemperatur till AKM ligger på 140°C . Värmeöverskottet kopplas via värmeväxlare till fjärrvärmeframledning. Anläggningen är inget bra exempel på låga returtemperaturer, men utgör en utmärkt tillämpning för system med kyllost som kräver låga temperaturer, vilket bl a är fallet i livsmedelsbranschen och livsmedelsbutiker.



Figur 3-1: Kraftvärmekoppling i kombination med absorptionskylmasin ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) i för kylning av en Ishall i Weißwasser, Tyskland.

Trigeneration (cogeneration with absorption chiller for cooling of a skating hall in Weißwasser, Germany.

3.3. AKM för luftkonditionering

Till skillnad från den, i denna rapport i första hand, beskrivna AKM med stora effekter kring 1 MW och uppåt, behövs det för luftkonditioneringstillämpningar oftast mindre effekter. AKM i den mindre klassen har utvecklats bl a med tanke på en annan drivkälla, solvärme. Solvärme är mycket väl lämpad för drift av LiBr –AKM. Soltillgången är oftast i fas med kylbehovet, och kyleffekterna är oftast i området 10 – 100 kW, vilket innebär att solfångare kan appliceras på den takytan vars tillhörande byggnad ska kylas. Problemet var till en början att små AKM visade låga COP pga hög intern elförbrukning. Nu finns dock ett antal tillverkare med lämpliga aggregat på marknaden, se t ex vidare avsnitt 5.2.8. Fördelen med denna utveckling är att även solenergitillämpningen arbetar med låga temperaturer. Solvärme och fjärrvärme har således samma krav på AKM och detta gynnar den fortsatta utvecklingen av LiBr-AKM.²⁾

²⁾ Det bör nämnas att man inom solvärmetekniken även utvecklar andra typer av kylmaskiner med låga drivtemperaturer, bl a *adsorptionsmaskiner* baserade på t ex fasta adsorbanter LiCl eller kiselgel.

I **Tabell 3-1** ges en sammanställning av de viktigaste soldrivna tillämpningar, dessa är även intressanta med fjärrvärme som drivenergi.

Tabell 3-1: Olika sätt att tillämpa absorptions- och adsorptionstekniken för luftkonditionering (enligt referens [28].

Different ways of using absorption chillers for air conditioning according [28].

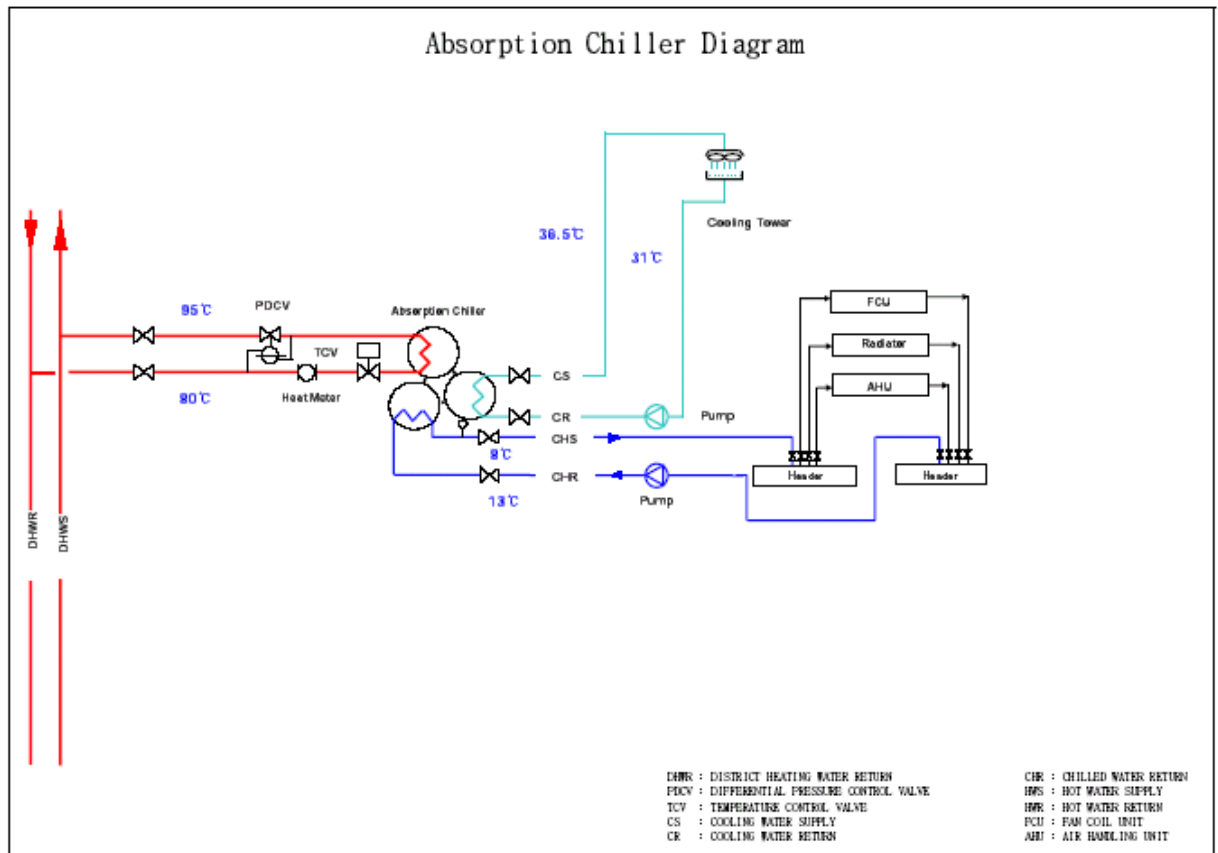
Teknik	Absorptions-kyla Vatten/LiBr Ensteg	Absorptions-kyla Vatten/LiBr Dubbeleffekt	Absorptionskyla Ammoniak/vatten	Sluten Adsorption H ₂ O- Silikagel ¹⁾
Köldmedel	H ₂ O	H ₂ O	NH ₃	H ₂ O
Sorptionsmedel	LiBr	LiBr	H ₂ O	Silikagel
Köldbärare	Vatten	Vatten	Vatten-Glykol	Vatten
Köld-temp °C	6 - 20	6 - 20	-60 - +20	5 - 20
Generator-temp °C	90 - 120	140 - 160	100 - 140	55 - 100
Kylvattentemp °C	30 - 50	30 - 50	30 - 50	25 - 35
Kyleffekt kW	40 - 5000	100 - 1000	10 - 1000	70 - 350
COP	0,6 - 0,7	0,9 - 1,2	0,4 - 0,7	0,6 - 0,7

3.4. AKM i fjärrkylesystem

Den i samband med denna studie mest intressanta användningen är drift av AKM med värme ur fjärrvärmenät. Detta är en form av fjärrkyla som skapar ett extra värmeunderlag på sommaren, då det normala värmeuttaget är som lägst. Istället för att bygga ett centralt fjärrkylennät parallellt med fjärrvärmenätet kan man alltså ansluta absorptionskylmaskiner där de behövs och fördela kylan i lokala nät.

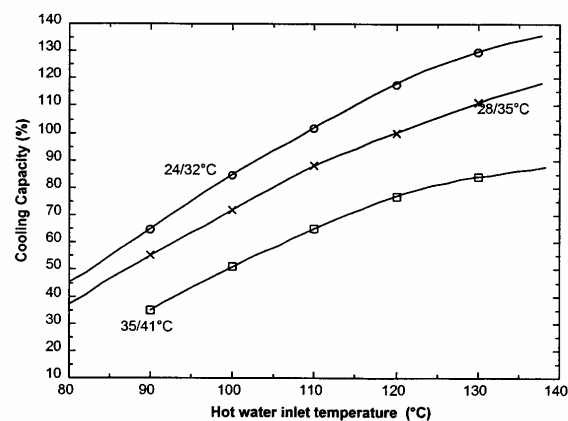
Det är således av stort intresse att undersöka på vilket sätt AKM kan utnyttjas i svenska fjärrvärmenät. Exempel på detta redovisas i avsnitten 5.3.1 och 5.3.2. I Asien är AKM-baserade fjärrkylesystem mycket utbredda eftersom elkraft där vanligen är dyr och ofta genereras i kraftvärmeverk. Som exempel kan nämnas att det i Korea finns ca 200 AKM anslutna till fjärrvärmesystem. De normala drifttemperaturerna är här 95/80°C. **Figur 3-2** visar ett enkelt schema över en AKM-inkoppling i ett koreanskt fjärrvärmesystem.

Som visas i figuren så kopplas i detta fall AKM mellan fram- och returledning som vilken fjärrvärmelast som helst. Detta leder i många fall, då kyllasterna är stora, till problem med höga returtemperaturer. Och som det framgår av **Figur 3-3** bör även framledningstemperaturen vara hög.



Figur 3-2: Systemschema över en typisk inkoppling av AKM till fjärrvärmenät i Korea [31].

Schematic drawing of a typical AKM connection in a Korean district heating net [31].

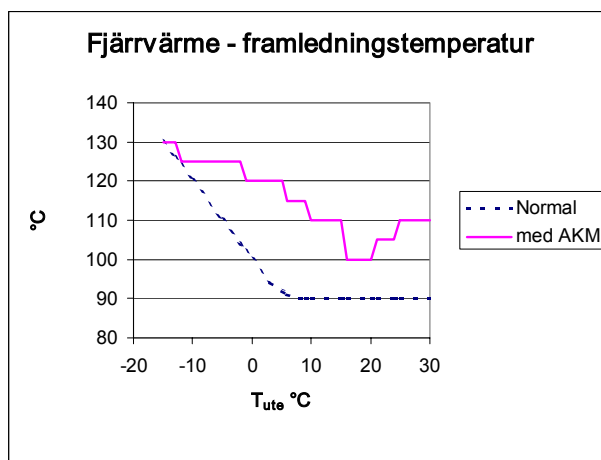


Figur 3-3: Relativ kyleffekt av en AKM som funktion av generators in-temperatur för olika kyltornstemperaturer [18].

Cooling-capacity as a function of generator inlet-temperature for different temperatures of the cooling tower [18].

Av figuren framgår tydligt att kyleffekten och därmed investeringskostnaderna är en funktion av framledningstemperaturen. Om värmen produceras i kraftvärmesystem så innebär ökande framledningstemperatur minskad elproduktion och ökade

värmeförluster. Det är alltså frågan om en systemoptimering mellan de tre energivektorena elkraft, värme och kyla och deras inbördes prisrelation. Detta problem samt ett optimeringsexempel är beskrivna i [18]. Ett principiellt sätt att lösa problemet är att köra fjärrvärmenätet med variabla framledningstemperaturer, där framledningstemperaturen är hög när kylbehovet är stort, vilket inte förekommer alltför många timmer i Skandinavien. Problemet hänger dock intimt ihop med systemutförandet, om en AKM endast ska kunna täcka baslast eller även topplast. Det är därför svårt att ange en generell lösning, utan varje AKM-tillämpning bör projekteras efter de lokala förhållandena. T ex har man i Dresden valt att variera framledningstemperaturen med kylbehovet vilket leder till en fjärrvärmetemperaturkurva som avviker starkt från vad som anses vara "normalt" för fjärrvärmenät, se **Figur 3-4**.



Figur 3-4: Fjärrvärmestyrkurvor i Dresden jämfört med en för Tyskland normal styrkurva.

District heating control function for the Dresden net compared to a normal control function in German nets.

I denna studie för svenska fjärrvärmenät är det dock i första hand tänkt att undersöka möjligheten att uppnå låga returtemperaturer, utgående från relativt låga framledningstemperaturer. Vi följer alltså medvetet den svenska praxisen att använda "låga" framledningstemperaturer runt 90°C för absorptionskylmaskiner, vilket å andra sidan är en högre framledningstemperatur än vad som är normalt för ett fjärrvärmenät under sommaren. Detta innebär att man i Sverige än så länge har accepterat att AKM får kosta mera till förmån för lägre framledningstemperaturer som gynnar fjärrvärmedriften. Detta kan dock ändra sig när priset för elkraft i förhållande till fjärrvärmepriset ökar framgent.

I nästa avsnitt 4 ges en översiktlig beskrivning av AKM-drift i fjärrvärmenät.

4. Fjärrvärmens speciella krav

I detta avsnitt diskuteras de villkor som fjärrvärme som drivenergi ställer på AKM. Låga framledningstemperaturer och god avkylning är de karakteristiska kraven på AKM i det här sammanhanget.

4.1. Absorptionskyla och värmelast - två extrema dimensioneringsfall

Generellt är svenska FV-näten dimensionerade efter värmelasten. Fjärrkylesystemet har ju i Sverige endast ca 15 år på nacken och AKM kopplade till fjärrvärmesystem ca 10 år. I den mån ett fjärrkylennät byggs, så utgår det ifrån en befintlig eller för en överskådlig tid planerad marknad. Eftersom fjärrkyla arbetar med små temperaturdifferenser, så blir rören i ett fjärrkylennät relativt grova, och av kostnadsskäl försöker man undvika överdimensionering. På sikt är det säkert tänkbart att fjärrkylebehovet kan täckas med såväl fjärrkylennät som med distribuerade AKM-system, beroende på situationen i en ort.

Hur än fjärrkyla produceras, så drabbas den av en svår nackdel jämför med fjärrvärme: Medan fjärrvärmeeffekten vintertid använder sig av temperaturdifferenser på ca 70°C, så har nätdistribuerad fjärrkyla sommartid (högladd) en temperaturdifferens på 6°C att utgå ifrån. **Tabell 4-1** visar sambandet mellan temperaturdifferens och effekt för fjärrvärme, kyllast och rördimension för såväl fjärrkylennät som AKM.

Tabell 4-1: Samband mellan värme-/kyllast och rördimension (dimensionerande flödes hastighet: 1,5 m/sek; $COP_{kyla} = 0,7$; dimensionerande FV-temperatur: 120°C).

*Examples of design values for district heating temperatures, power and pipe dimensions
design flow velocity 1,5 m/sec; $COP_{chill} = 0,7$; design supply temperature: 120°C.*

Last/period		T_{fram} °C	T_{ret} °C	Effekt [MW]	Dimension DN mm
Värme - vinter		120	50	12,2	350
Värme - sommar		80	50	5,2	350
Kyla – sommar (FK-nät)		6	12	1,1	350
Kyla – sommar (all värme till AKM i FV-nät)	värme	90	80	0	350
	kyla	6	12	1,2	
Kyla – sommar (AKM i FV-nät vid 20% sommarvärmelast)	värme	90	80	2,4	350
	kyla	6	12	0,7	

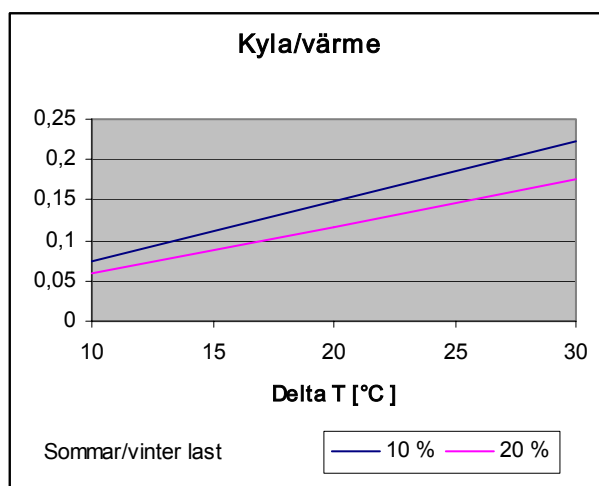
Som framgår av exemplet i **Tabell 4-1** så kan kyllasten vara endast en bråkdel av värmelasten, vid samma rördimension. Närmare bestämt är kyllasten ca 9 % av sommarlasten när den produceras i ett fjärrkylennät av samma dimension och ca 10 % om den produceras med en standard-AKM i ett fjärrvärmenät. Här ser man direkt fördelen i de fall då man kan producera fjärrkyla med en högre temperaturdifferens, t ex med 90/60°C, såsom är fallet med en SE/DL-AKM. I detta fall är den möjliga kyllasten 3,6 MW. Det finns alltså stora vinster att uppnå vid produktion av kyla, om returtemperaturen kan sänkas i en AKM. Dessutom kvarstår även de övriga fördelarna med värmeproduktion som är förknippade med låga returtemperaturer.

I realiteten måste man dock ta hänsyn till att fjärrvärmenätet samtidigt ska leverera både värme till värmelasten och värme till AKM. Om vi utgår ifrån en sommarvärmelast på 20 % av vinterlasten, vilket är vanligt i mindre nät, och vidare antas att en AKM matas med en framledningstemperatur på 90°C, så återstår maximalt 57 % av den hydrauliska kapaciteten för att transportera värme till AKM generatoren. Med en COP på 0,7 blir den maximala kyleffekten då ca 0,7 MW eller ca 6 % av

vinterns maximala värmelast. I praktiken reduceras dessa värden med ytterligare ca 10 %, om man tar hänsyn till att fjärrkylesystem och värmesystem har olika sammanlagingskoefficienter [18].

Man ser alltså att en AKMs möjligheter att producera kyla i ett befintligt fjärrvärmesystem är förhållandevis begränsade.

Utgående från ett 90/50 FV-system kan man t ex räkna ut den maximala transportkapaciteten för fjärrkyla i ett fjärrvärmenät. Härvid antar vi att en AKM är inkopplad mellan framledning och returledning och att varmvattensystemet returnerar en returtemperatur på 50°C. Den maximala flödeshastigheten är 1,5 m/sek. Som framgår av diagrammet i **Figur 4-1** kan kyla produceras upp till ca 22 % av vintervärmelasten, om en AKM används som kan kyla ner fjärrvärmevattnet med 30°C. Å andra sidan, i normalfall med en 10 %-ig avkylning och en sommarvärmelast motsvarande 20 % av vinterlasten, är AKM-effekten endast 6 % av den maximal värmelasten.



Figur 4-1: Förhållandet mellan design-kylast och design-värmelast för två olika nivåer av förhållandet sommarlast/vinterlast för fjärrvärme.

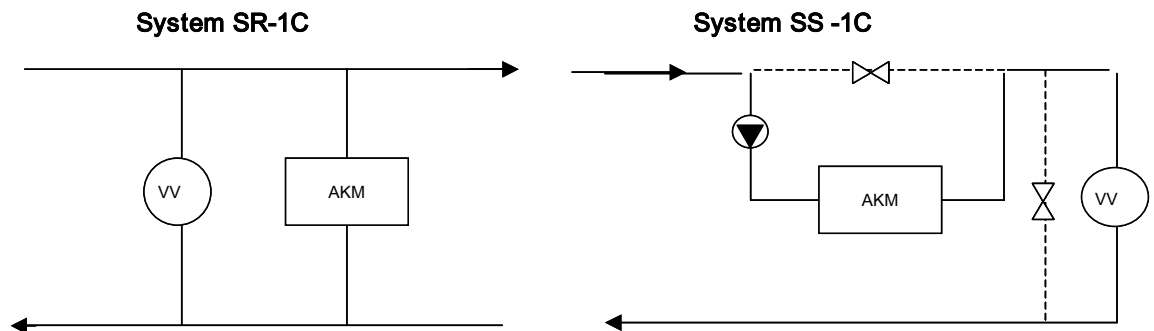
Relation between design cooling load and design heat load for two different relations of summer load/winter load in district heating systems.

Här blir det tydligt med vikten av regleringsprinciperna för AKM. Det finns nämligen möjligheter till större avkylning av fjärrvärmevatten, dels i SE/DL-AKM och dels i AKM som går i dellast, dvs med överdimensionerade värmeväxlare eller värmeväxlare som på annat sett är designade för låga drifttemperaturer.

Därför följer att det är svårt att optimera AKM utan att ta hänsyn till hela driftsituationen inklusive elkraftproduktion, fjärrvärmeproduktion, värmeväxlarkonstruktion och dellastegenskaper hos AKM. I avsnitt 6 och 7 återkommer vi till denna frågeställning.

4.2. Olika inkopplingssätt av AKM

Som framgår av **Figur 4-2** finns det två grundmöjligheter för att koppla in AKM i fjärrvärmesystem: Framledningskoppling (SS - supply/supply) eller fram-/returkoppling (SR - supply/return).



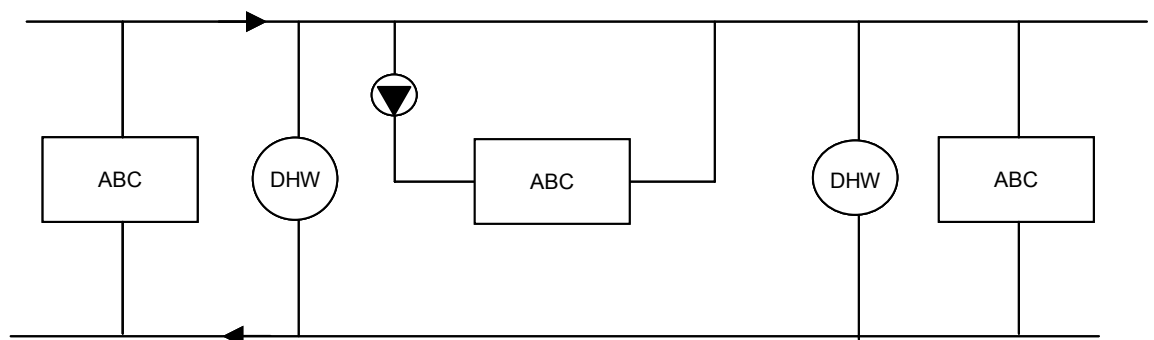
Figur 4-2: Principiella inkopplingssätt av AKM i fjärrvärmenät. Parallell: Fram/retur (Supply – return SR). Serie: Fram – fram (supply – supply SS).

Connection principles for AKM in district heating systems: Parallel: Supply – return (SR). Series: Supply – supply (SS).

Båda inkopplingssätten har för- och nackdelar. Parallellkopplingen SR-1C (där 1C står för att det finns ett kundkomplex för värmelasten, i detta fall att hela värmelasten ligger före absorptionskylmaskinen), gör att fjärrvärmelasten är mindre beroende av värmelasten. Varmvattenlasten förutsätts kyla fjärrvärmemediet till 50°C, och AKM har sin egen avkylning, t ex från 90°C till 80°C vid fullast, eller från 85°C till 70°C vid massflödesreglering och dellast. Returtemperaturen blir en blandtemperatur bestämd av AKM-returen och varmvattenvärmeväxlarens retur.

Seriekopplingen SS-1C har en stor driftfördel: Den avkyler framledningen från den förhöjda sommarnivån (90°C) till den vanliga nivån på ca 80°C och kan därefter fortsätta som vanligt med 80°C framledningstemperatur i systemet som ligger efter AKM. Problemet är att AKM-lasten då blir beroende av värmelasten. I normalfall är denna varmvattenlasten (plus värmeförlusten från ledningen), dvs en last som varierar starkt under dagen och dessutom dalar mitt på dagen när kylbehovet är som störst. Om kyllasten är förhållandevis stor är det således nödvändigt att införa en by-pass förbi såväl AKM som värmelasten för att säkerställa att få maximal effekt ur AKM. Detta upphäver dock fördelen med låga returtemperaturer.

System SR/SS/SR -2C



Figur 4-3: Kombination av tre AKM i FV-nät, två i parallell och en i serie.

Combination of three AKM in district heating nets, two in parallel and one in series.

Det finns en rad andra möjliga kombinationer att koppla AKM till fjärrvärmenät. Framför allt kan flera AKM kombineras genom att t ex koppla dessa enligt **Figur 4-3**. I

avsnitt 7 återkommer vi till denna fråga genom att beräkna den genomsnittliga returtemperaturen för olika kopplingssätt. Om man vill dra generella slutsatser för anslutning av AKM till fjärrvärmenät, så är det att fjärrvärmeunderlaget måste vara relativt stort för att det ska vara lönsamt att installera AKM. Om vi antar att en ekonomiskt intressant storlek på AKM är ca 1 MW, så behövs det minst ett värmeunderlag på 15 MW för att kunna ansluta en AKM. Å andra sidan finns det ju ett stort antal fjärrvärmenät som är väsentligt större än så, och än så länge är fjärrkylelasten bara en bråkdel av värmelasten, så returtemperaturproblemet uppstår sällan eller aldrig. Men förväntningen är också att fjärrkylelasten kommer att öka väsentligt mycket mer än fjärrvärmelasten i framtiden, och då kommer problemet att uppstå.

5. Marknaden

I marknadsavsnittet ges en presentation av några intressanta AKM-tillämpningar, utan anspråk på fullständighet. Urvalet är snarare baserat på projektinformation Tyskland och Korea samt från viktiga AKM tillämpningar i Sverige. Viss information härrör även direkt från de viktigaste leverantörerna av AKM, bl a York, Carrier och Entropie.

5.1. Världsmarknaden

Världsmarknaden för absorptionskyla är framförallt koncentrerad till Japan, Kina och Korea. Detta beror till stor del på att efterfrågan på elektricitet är högre än produktionen, vilket medför väldigt höga elpriser. I Asien är efterfrågan på AKM större än 350 kW på ca 8600 enheter/år fördelad på Japan 30 %, Kina 35 % och Korea 20 %. USA och Europa ses som stora potentiella marknader. På den europeiska AKM-marknaden är efterfrågan ca 500 enheter per år, men användningen ökar successivt. Intresset för fjärrkyleändamål ökar också, bl a i Sverige och Finland, men är än så länge starkast utvecklat i Tyskland.

5.2. Vanliga AKM-system

Då det främst är SE/DL som rekommenderas för användning i fjärrvärmenätet, kommer respektive tillverkares utbud i denna presentation att innefatta enbart SE- och SE/DL-AKM. Som det ser ut i dagsläget är det endast Entropie som kan erbjuda maskiner med kombinationen SE/DL. Generellt sett kan sägas att SE-maskinerna går att köra på låga temperaturer men att de då ger en lägre kyleffekt än märkeffekten. T.ex. kan nämnas att man på York räknat fram att en maskin på 4840 kW (vikt 29 ton), vilken är dimensionerad för drifttemperaturer mellan 109-115°C, går att köras på 88°C in och 76°C i retur med en COP på 0,74. Detta kräver att man installerar ett kyltorn på 7,3 MW (vikt 24 ton) för att kunna hålla 25°C på kylvattnet. Givna max-effekter måste i de flesta fall därför räknas om, då maskinerna oftast är dimensionerade för högre drifttemperaturer (se avsnitt 0).

5.2.1. Carrier

De maskiner Carrier har att erbjuda med hetvatten eller ångdrift är av SE-typ och har beteckningen 16JB. Då det gäller enbart hetvattendrift erbjuder man maskiner med en kyleffekt mellan 158-1270 kW, det går att få större maskiner men dessa licenstillverkas för EBARA i Japan och måste då importeras därifrån. 16JB-maskinerna går att köras med drifttemperaturer mellan 78-95°C. Maskinerna levererar köldbärarvatten med en temperatur på 7°C och returtemperaturen ligger på 12°C. COP ligger på 0,75. Carrier är det mest representerade märket på den svenska marknaden, se referenslista Bilaga A.

5.2.2. York

York erbjuder maskiner i två olika storleksklasser, 20-60 kW och 200-4850 kW. De större maskinerna är designade för att fjärrvärmemediet till generatorm ska hålla en temperatur mellan 80-128°C, medan de mindre maskinerna har en drifttemperatur mellan 75-95°C. Temperaturerna på det kylda vattnet ligger mellan 7 - 11°C för de små maskinerna och 4,5-18°C för de stora, returvattnet håller en temperatur på 11-18°C respektive 8-24°C. Kyleffektkoefficienten (COP) ligger på 0,7 för samtliga maskiner.

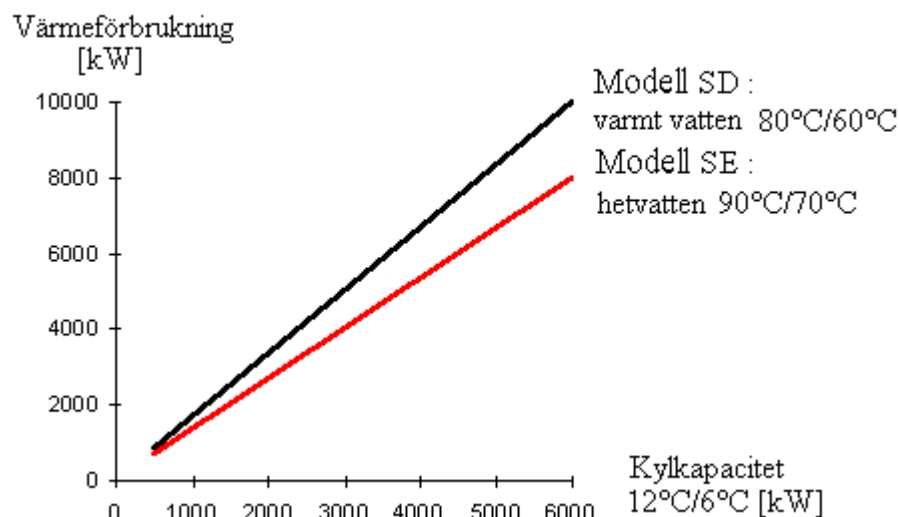
5.2.3. Trane

Den modell som rekommenderas från Trane har beteckningen ABSC/ABSD, även denna är av ren SE-typ. Dessa går att få med kyleffekter mellan 350-6000 kW. Drifttemperaturen bör ligga mellan 80-132°C. Maskinen kan leverera kyllt vatten med temperaturer mellan 4,5-15°C vid returtemperaturer på 8-30°C. COP ligger mellan 0,6-0,7 beroende på körsätt. Temperaturkravet på kylarvattnet ligger mellan 15-40°C.

5.2.4. Entropie

Som det ser ut i dagsläget är det endast Entropie som utöver ensteg-maskiner (modell SE) har den önskade kombinationen SE/DL (modell SD) i sitt produktprogram. Dessa kan köras på hetvatten med temperaturer mellan 90-130°C och lämnar ca 60°C i returvattnet. COP blir 0,65 vid 90°C och 0,75 vid 130°C. Modell SE har ett COP på 0,75 i standardutförand och på över 0,8 med avancerad generatordesign. SE-maskinen går att få med en kyleffekt mellan 120-7000kW och SE/DL-maskinerna mellan 600-6000 kW. Temperaturen på det kylda vattnet ligger på 6°C ut och 12°C i retur för båda maskintyperna. År 2001 har Entropie levererat en ensteg AKM till Mälardalen Energi i Västerås, se vidare avsnitt 5.3.3.

I diagrammet **Figur 5-1** presenteras kylkapaciteten i förhållande till tillförd värme för de olika modellerna.



Figur 5-1: Kyleffekt som funktion tillförd av värmeeffekt för Entropies SE och SE-DL AKM (standard design).

Cooling-capacity as a function of supplied heating power for Entropies Single Effect and Single-Effect Double-lift AKM (standard design).

5.2.5. McQuay/Sanyo

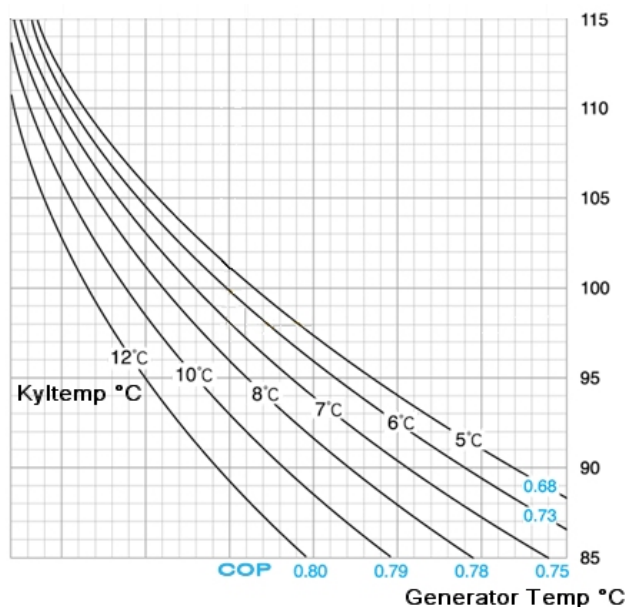
De SE-maskiner Sanyo-McQuay erbjuder ligger på kyleffekter mellan 105-1800 kW. Vattentemperaturen till generatoren rekommenderas ligga mellan 80-95°C. COP ligger på 0,71 och leverans av kylvatten kan ske med en temperatur på ca 8°C.

5.2.6. Thermax

Thermax är ett ”lågprismärke” som tillverkas i Indien. Man marknadsför två hetvattendrivna SE-maskiner, ProChill och Cogenie. ProChill går att få med kyleffekter mellan 350-2300 kW och Cogenie mellan 35-280 kW. Drivvattentemperaturerna 90,6°C in och 85°C i returvattnet för båda modellerna. Kylvattentemperaturen ligger på 29,4°C och i retur går vattnet med ca 36,5°C.

5.2.7. Broad

Broad Air Conditioning Co är en av de största tillverkarna i världen av absorptionskylmaskiner. Man har dock inte så stora marknadsandelar utanför Asien. Broad tillverkar ensteg maskiner med kyleffekter mellan 150-20.000 kW. Vid 93°C till generatoren levererar den returvattnet med en temperatur på 83°C. COP ligger då på 0,67. Köldbäraren håller temperaturer på 6,7°C ut och 12,2°C in. **Figur 5-2** nedan beskriver förhållandet mellan drifttemperatur, temperaturen på köldbäraren och kyleffektfaktorn (COP).



Figur 5-2: COP som funktion av hetvattentemperatur vid olika kyltemperaturer för Broads AKM.

COP as a function of hot water supply temperature for different cooling temperatures for Broad's machines.

Broad Air Conditioning Europé finns för närvarande representerade i Frankrike. Deras produkter finns dock installerade på ett flertal ställen runt om i Europa.

5.2.8. Övrigt

Yazaki Energy Systems Inc är tillverkare av små absorptionskylmaskiner. I deras program finns tre olika storlekar, 35 kW, 70 kW och 105 kW. Drivtemperaturerna för

dessa ligger mellan 70-95°C, med standardvärde på 88°C (COP = 0,72).

Returtemperaturen ligger på 55°C och temperaturen på det kylda vattnet på 7°C in och 12,5°C i retur. I Europa finns Yazaki representerade i Italien, Tyskland, England och Grekland. Dessa AKM är mycket intressanta för kylning av enstaka byggnader.

I Österrike finns det företag - Solarfrost – som utvecklar effektiva små AKM lämpliga t ex för enfamiljshus eller små flerbostadshus, i effektklass < 10 kW. Dessa maskiner använder den gamla Munters/von Platen ammoniak/vatten principen, dock med en ny typ av diffusionsteknik som tillåter drivtemperaturer omkring 80°C [27].

I Sverige har Fredrik Setterwall Konsult AB i samarbete med bl a AB Berglunds Rostfria utvecklat små AKM som prototyper för en större. Dessa AKM var på 1 resp 30 kW. En efterföljare till dessa maskiner är en större AKM på 1,15 MW designad för fjärrvärmedrift vid 90°C, men den går att köra med så låga temperaturer som 70°C med 55 % kapacitet. Denna maskin har köpts av Göteborg Energi och installerats på Chalmers. Maskinen hade ursprungligen en COP på 0,6 men lär nu ha kommit upp till en COP av ca 0,7, vid låga drivtemperaturer.

5.3. Användningsexempel

Detta avsnitt är tänkt att illustrera användning av absorptionskylmaskiner kopplade till fjärrvärmesystem. Det handlar på inget sätt om en systematisk beskrivning utan är tänkt att vara representativt för hur AKM används i praktiken och vilken roll de spelar inom begreppet fjärrkyla. Ett påverkande faktum till urvalet av exemplen var också tillgänglighet till information som underlättades genom kontakter med svenska och tyska kollegor. I Tyskland pågår en initierad utveckling av SE/DL-tekniken, som har resulterat i en gedigen publikation kring LiBr-AKM. I Sverige är det främst i Göteborg och Linköping, två orter med tillgång till billig spillvärme och avvärme från avfallsförbränningen, som AKM-teknologin använts. Nyligen har dock AKM även installerats i Västerås, Umeå, och Halmstad.

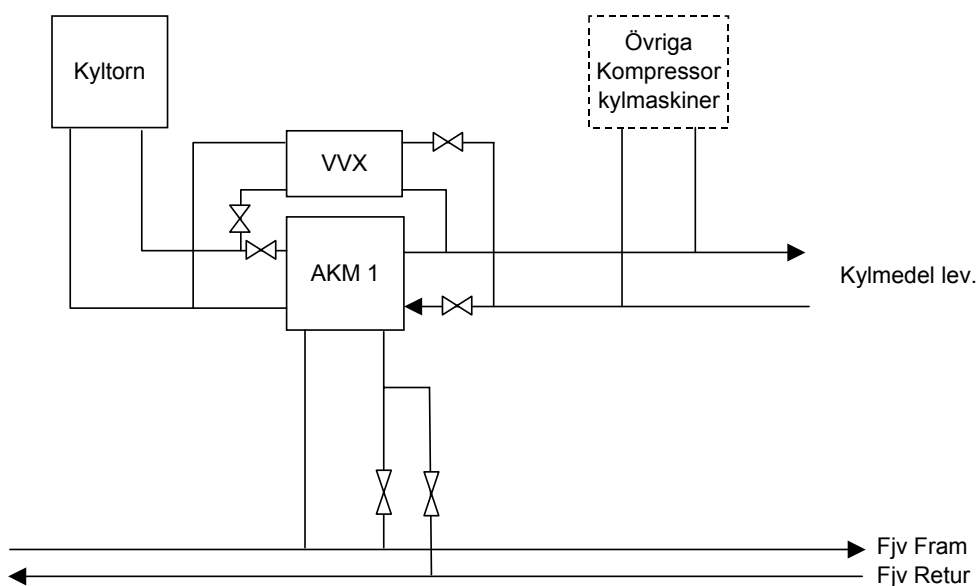
5.3.1. Linköping

5.3.1.1. Tekniska Verken/Universitetssjukhuset

Kylcentral 54 (KC54) innefattar en ensteg AKM Carrier 16JH 118 (max 3,6 MW), vilken i denna konfiguration klarar en kyleffekt på ca 2 MW, samt ett antal kompressorkylmaskiner. AKM körs i regel mellan maj och oktober. Under vinterhalvåret används kyltornet som frikyla för hela systemet, detta ger då max 1 MW kyleffekt. AKM är ansluten enligt **Figur 5-3** och går att köras enligt följande principer :

- Fram/fram
- Fram/retur
- Fram/retur begränsad.

Tidigare har maskinen körts enligt fram/retur principen, men då automatisk styrutrustning saknas har man valt att gå över till att köra enligt fram/fram principen, då detta medger snabbare reglermöjligheter .

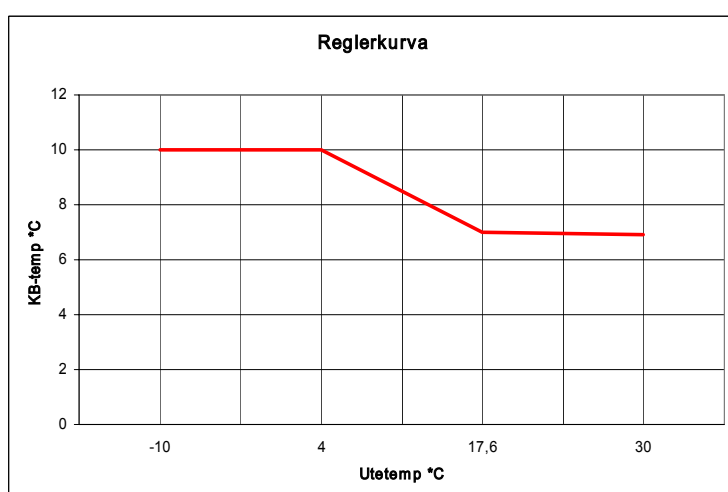


Figur 5-3: Principskiss för anläggningen vid sjukhuset i Linköping.

AKM-scheme at Linköping hospital.

Värden vid besök (2004-07-08 kl 10:15):

	Temp (f/r)	Flöde	Effekt
Fjv:	87/63,2 °C	60,2 m ³	1629 kW, maxeffekt ca 2 MW vid flöde 225m ³
KB:	6,7/9,9 °C	322,9 m ³	1162 kW, KB-flödet varierar mellan ca 250-500 m ³ under dygnet
KV:	27,2/22,3 °C		COP: 0,713.

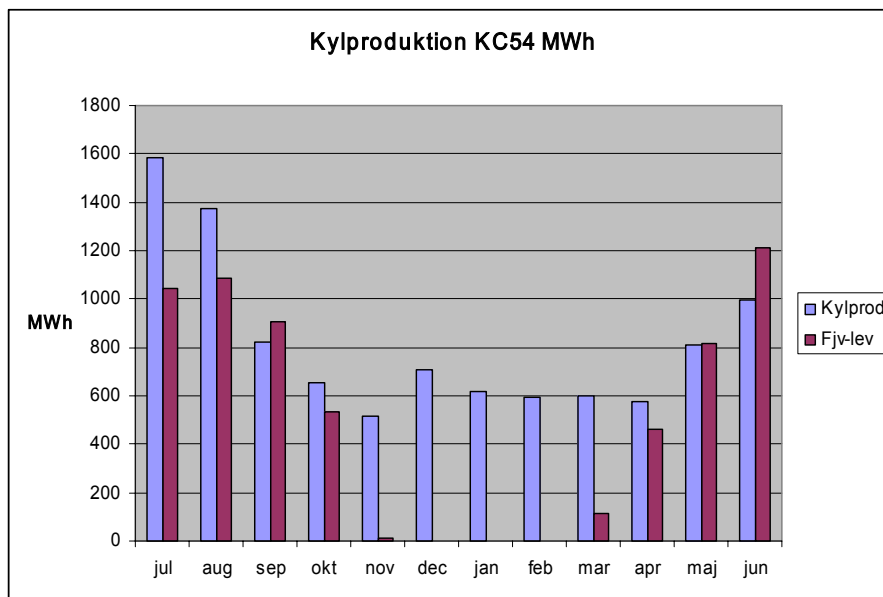


Figur 5-4: Reglerkurva för KC54.

Control curve for KC54.

Effekten på AKM styrs genom att flödet till generatoren ändras. Detta flöde regleras efter önskad framledningstemperatur på kylmediet vilket i sin tur bestäms av utetemperaturen enligt kurvan i **Figur 5-4**.

Vid utetemperatur runt 15 - 17°C startas kompressorkylmaskinen manuellt. Detta sker vid ungefär halv effekt på AKM. Anledningen till att man inte kör AKM på mer än halv effekt innan kompressormaskinerna kopplas in beror på att man vill gardera sig mot stora temperaturstegringar vilket AKM pga sin tröghet, inte klarar av. **Figur 5-5** visar fjärrvärmeanvändningen och kylproduktionen för KC54 vid Universitetsjukhuset. Då COP ligger omkring 0,7 för AKM kan man utifrån diagrammet dra slutsatsen att den ej står för hela kylproduktionen ensam, utom möjligtvis i juni.

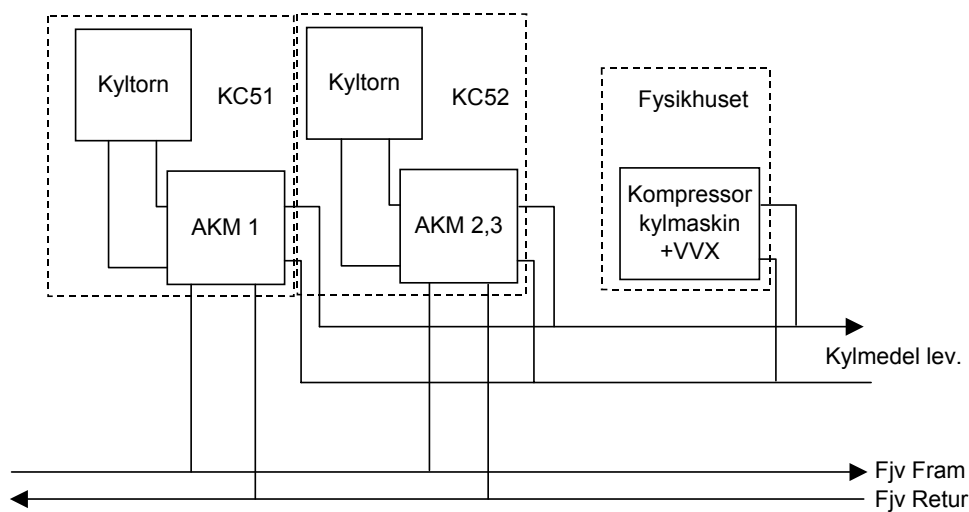


Figur 5-5: Kylproduktion och fjärrvärmeanvändning för kyla i KC54 under perioden 2003-06-25 - 2004-06-25.

Cooling production and district heating supply to the generator of KC54 for the period 25th June 2003 - 25th June 2004.

5.3.1.2. Tekniska Verken/Universitetsområdet

På universitetsområdet finns tre Ensteg AKM installerade. I KC51 finns en Carrier 16JB 047 (max 1,5 MW) vilken i detta utförande ger ca 1 MW. I KC52 finns 2 stycken Carrier 16JH 118 som vardera ger ca 2 MW. I Fysikhuset finns två ammoniakmaskiner på 750 kW/st. AKM är fram/retur kopplade och körs enligt samma princip som den på Universitets sjukhuset, d v s maj till oktober och enligt ovan angiven reglerkurva. Däremot finns inte möjligheten att producera kyla enbart med kyltornen i dessa anläggningar, vilket medför att den huvudsakliga produktionen under vintermånaderna sker i kompressormaskinen i Fysikhuset (se **Figur 5-6**).



Figur 5-6: Principskiss KC51, KC52 och Fysikhuset vid Universitet Linköping.

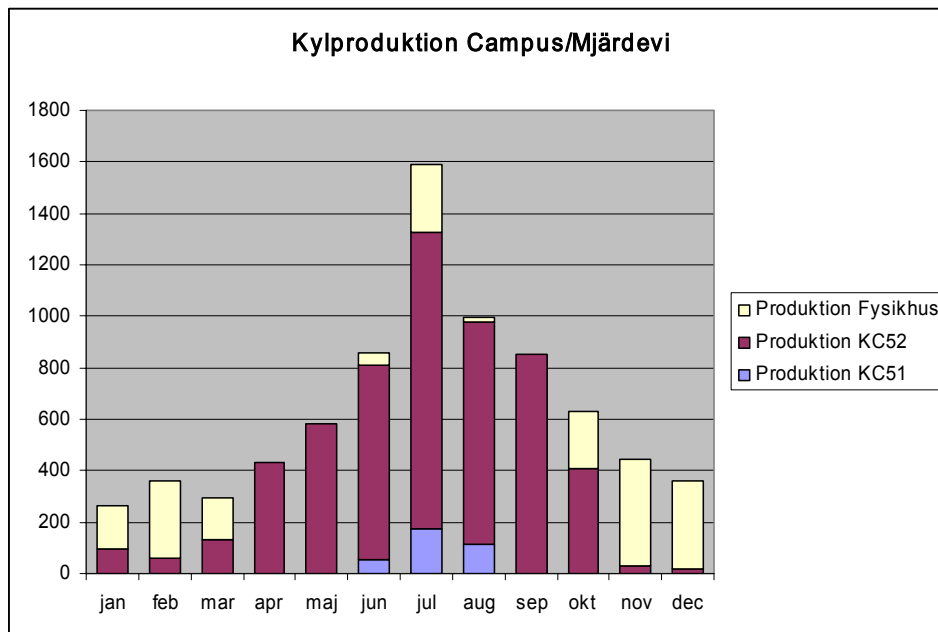
Principle of AKM-system at the University of Linköping (KC51, KC52 and physics house).

Värden vid besök:

KC51	Temp (f/r)	Flöde m ³ /s	Effekt kW
Fjv	87,9/63,7	18,6	524
KB	7,1/11,1	43,0	200
KV	27,9/22,4		
COP	0,38		

KC52	Temp (f/r)	Flöde m ³ /h	Effekt kW
AKM 1			
Fjv	89/57	16	595,9
KB	8/10	194	451,6
KV	27/21		
COP	0,76		
AKM 2			
Fjv	89/57	16	595,9
KB	8/10	187	435,3
KV	27/22		
COP	0,73		

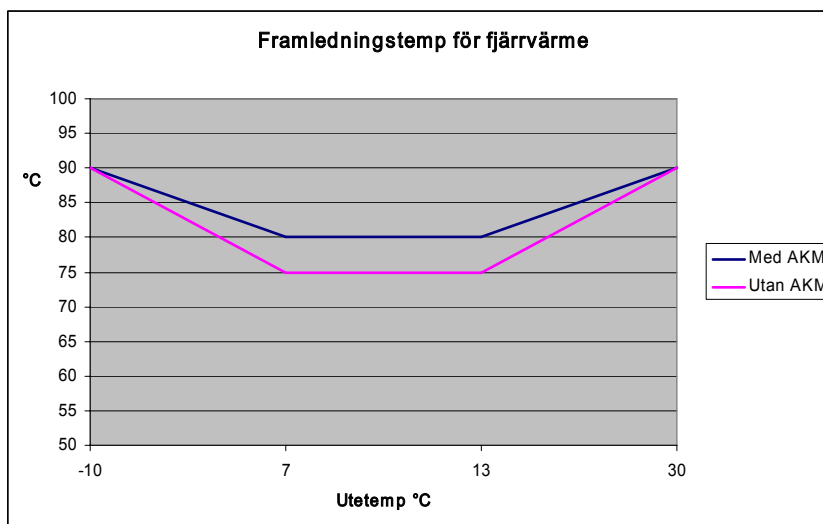
Den totala kylproduktionen år 2003 presenteras månadsvis i diagrammet nedan, **Figur 5-7**.



Figur 5-7: Kylproduktion (MWh) vid Universitetsområdet i Linköping.
Cooling production [MWh] of the system at the University Linköping.

5.3.2. Göteborg

I Göteborg finns i dag ett flertal AKM. Man har totalt 4 fjärrkyleområden med en total effektkapacitet på 35 MW. Av detta är 26 MW AKM fördelat på 7 maskiner. Framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet är ca 90°C, denna är dock glidande under hela året. Vid -10°C ligger den på 90°C, mellan +7°C och +13°C är den 80°C för att sedan öka mot 90°C igen. I diagrammet visas hur temperaturen i framledningen ser ut med kylproduktion och hur den skulle se ut utan AKM (**Figur 5-8**).



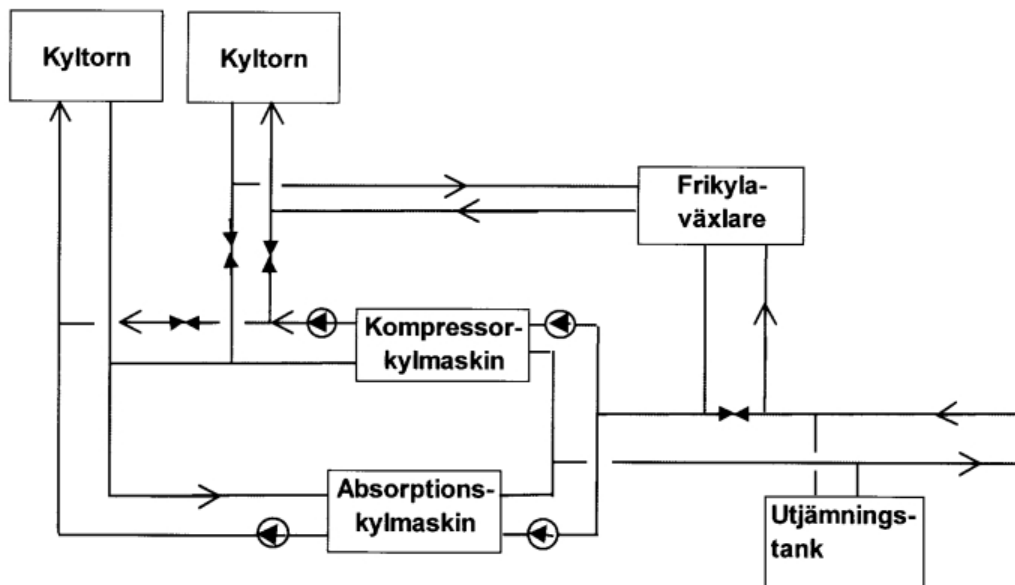
Figur 5-8: Framledningstemperatur som funktion av utetemperatur med och utan AKM inkopplad.
Supply temperature as function of outdoor temperature in Göteborg when operating without and with AKMs, respectively, (higher operation temperatures with AKM).

Kompressormaskiner står för en baslast på ca 15 % under hela året. Av den producerade värmen kommer 20 % från avfallseldad kraftvärme och 32 % från industriell spillvärme och resterande från övrig värmeproduktion.

5.3.2.1. Göteborg Energi/Östra sjukhuset

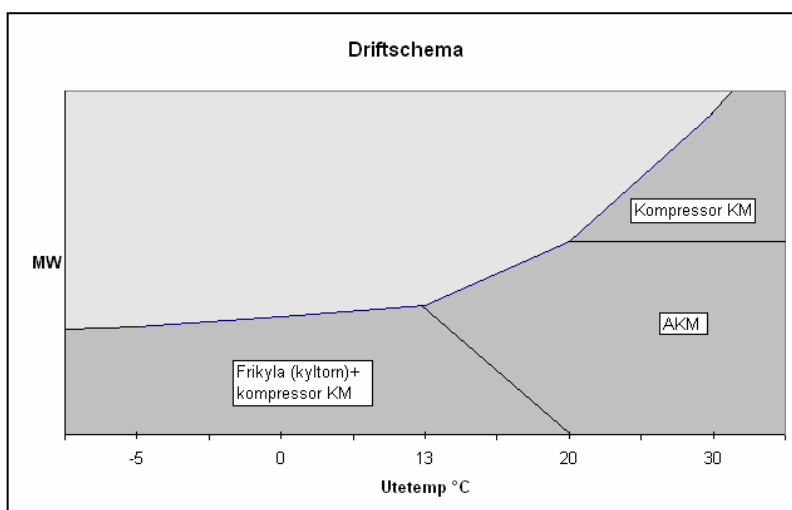
Här finns en av de största AKM i Göteborg, 6 MW. Men det finns också kompressorkyla som används för spetslas samt kyltorn som även används för produktion av frikyla (Figur 5-9).

AKM körs i fram/fram koppling. Det tillämpas glidande framledningstemperatur, 90°C vid maxeffekt och ner mot ca 80°C. Vid utetemperatur på +13°C startas AKM och denna utnyttjas till ca 60 % av fullast varefter ytterligare kompressorkyla körs igång (Figur 5-9).



Figur 5-9: Principskiss för AKM vid Östersjukhuset.

Principle for AKM operation at Göteborg Öster-Hospital.



Figur 5-10: Driftschema Östersjukhuset, princip.

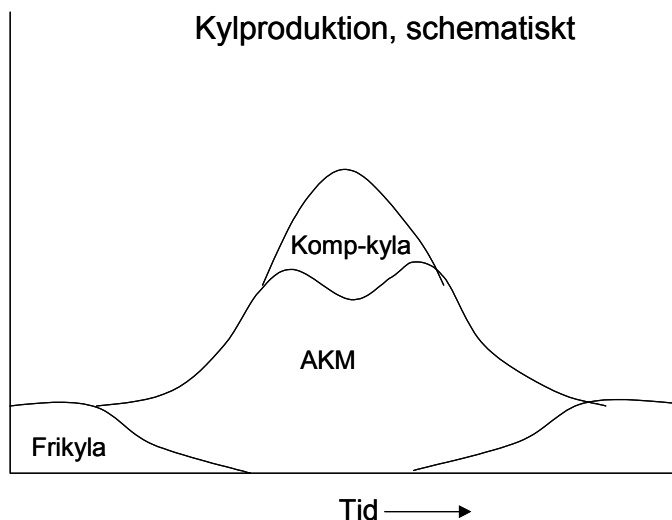
Operating scheme for Göteborg Öster-Hospital.

5.3.3. Andra FV-an slutna AKM i Sverige (Västerås, Umeå)

Mälardalen Energi i Västerås har år 2001 kompletterat sitt fjärrkylesystem med en AKM från Entropie på 7 MW. Denna AKM är utrustad med en avancerad generatorvärmeväxlare, en tubväxlare med sprayfilmvärmeväxling. Värmewäxlarkonstruktionen tillåter låga ΔT vilket innebär att den kan köras med såväl låga generatortemperaturer som med låga returtemperaturer, beroende på belastningen. Maskinen har således goda delastegenskaper. Designtemperaturen är 91°C, och topptemperatur till generatören är 105°C. AKM har följande (ungefärliga) driftvärden:

$T_{\text{gen}} \text{ } ^\circ\text{C}$	ΔT	COP	Kapacitet %
91	10	0,78	100
80	20	0,83	70
75	25	0,90	50
60	15	0,30	30

Maskinen används på ett sådant sätt att den ska ge den effekt som nätet erbjuder. Det viktigaste är att få så lång drifttid som möjligt. AKM är i drift från mitten av mars till slutet av oktober. Under vintertiden går det bra att tillgodose kylbehovet med frikyla (se Figur 1). I början på juni har effekten sitt maximum då FV-nätets framtemperatur ligger på ca 90°C. Under sommaren går effekten ner pga lägre FV-temperaturer och kompressorvärmepumpar (som levererar både värme och kyla från avloppsreningsverk) toppar. Anledning är att man inte vill höja nättemperaturen för AKM skull, utan man reglerar framledningstemperaturen efter fjärrvärmebehovet. Man nöjer sig således med mind kyleffekt mitt på sommaren.



Figur 5-11: Schematiskt lastdiagram för kylproduktion i Västerås.

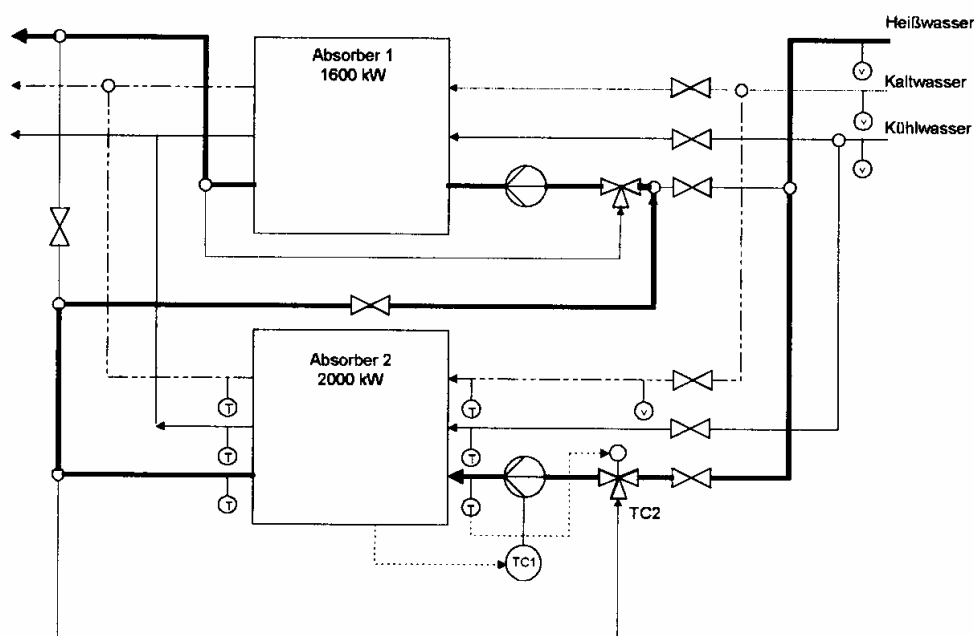
Schematic load diagram for production of cooling in Västerås.

I Umeå har Umeå Energi nu två AKM i drift, en på 4,7 MW (installerad 2000) och en på 2 MW, installerad 2004. Båda maskiner är levererade av York. Den större AKM är placerad vid produktionsanläggningen före shunten, och drivs med en temperatur 95°C direkt från pannan. Returen från AKM är då 85°C. Maskinen arbetar också mot ett kylager på 4000 m³. AKM går mesta dels på fullast. Eftersom den höga temperaturen finns tillgänglig vid produktionsanläggningen, så är kylmaskinens drift oberoende av den aktuella FV-framledningstemperaturen. Anläggningens är fram/fram

och returen med 85°C är lagom för FV-nätets sommar drift. Den andra AKM står längre ute i nätet och behöver också 95°C in i generatorn. Även här tillämpas för det mesta fram/fram kopplingen.

5.3.4. Universitet Dortmund

Vid universitet Dortmund finns det två ensteg-AKM, en från Carrier på 2000 kW (AKM2) och en från York (AKM1) på 1600 kW. Båda maskinerna kan köras parallellt eller i serie, se Figur 5-12. I normaldrift används AKM2 som grundlast och AKM1 som topplast-AKM.



Figur 5-12: Anläggningsschema för två serie/parallell kopplade AKM vid universitet Dortmund[20].

Scheme for two AKM connected in series/parallel at the university of Dortmund.

För absorptionskylmaskinerna gäller följande driftparametrar (Tabell 5.1):

Tabell 5-1: Driftparametrar för två AKM vid universitet Dortmund.

Operational parameters for the two AKM at University Dortmund.

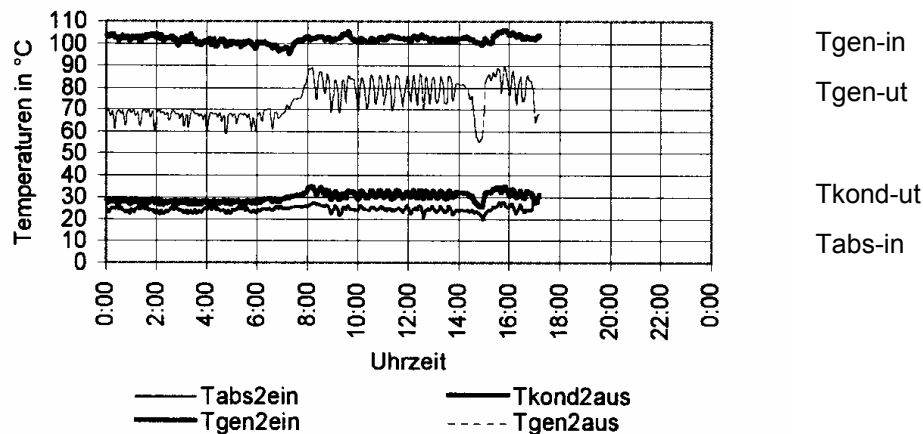
	AKM1	AKM2:
Kyleffekt:	2019 kW vid $T_{\text{gen,in}} 140^{\circ}\text{C}$ 1000 kW vid $T_{\text{gen,in}} 110^{\circ}\text{C}$	1600 kW vid $T_{\text{gen,in}} 120^{\circ}\text{C}$ 600 kW vid $T_{\text{gen,in}} 105^{\circ}\text{C}$.
Volymflöde	100 m ³ /h	100 m ³ /h
Kallvatten:	145-287 m ³ /h	92-229 m ³ /h
Kyltorn-temperatur:	25/37°C	25/39°C

Som erfarenhet från dessa AKM kan nämnas att den för båda AKM gemensamt uppmätta genomsnittliga COPn är med 0,56 väsentligt lägre än designvärdet 0,67. Anledning är de dellastegenskaper som vanligen förekommer under en driftdag. En bidragande orsak tror man sig också se i seriekopplingen av båda AKM, då ändringar av driftförutsättningarnas olika tröghetseffekter vid regleringsbehov i den ena AKM

påverkar driften i den andra. Detta försvårar uppnående av optimala driftbetingelser i båda maskinerna.

I Figur 5-13 visas att det dock finns en bra möjlighet att vid dellast uppnå låg fjärrvärmereturtemperatur (65-70°C), men att denna pendlar mellan 70 och 85°C då fjärrvärmeflödet ökas för att köra fullast.

Slutsatsen är att seriekoppling av två AKM väl kan minska returtemperaturen, som bäst till ca 65°C, men det är mycket viktigt att båda AKM är reglertekniskt oberoende av varandra.



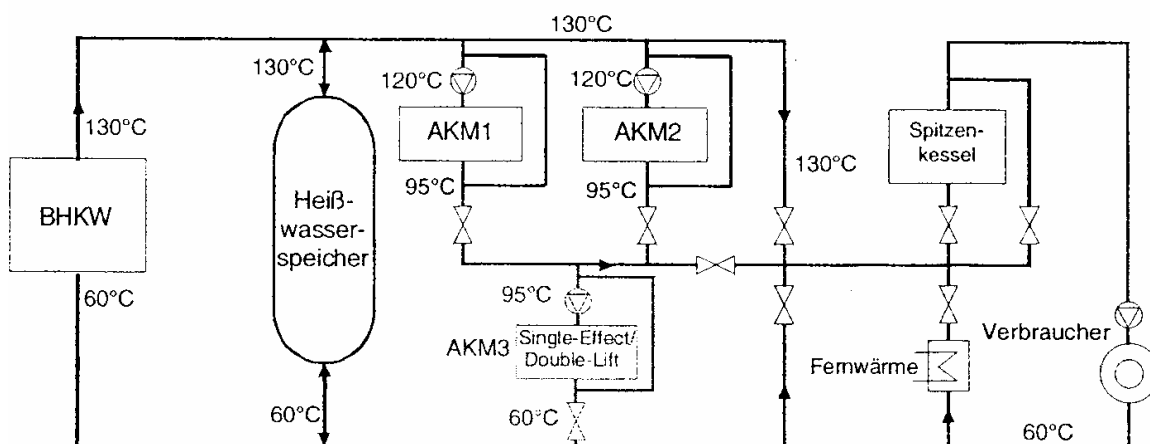
Figur 5-13: AKM-temperaturer vid fjärrvärmedrift under sommaren för AKM-anläggningen vid universitet Dortmund enligt [20].

Operational temperatures of the AKM at the University of Dortmund when connected to the district-heating net [20].

5.3.5. München

Vid den nya flygplatsen München-Erding finns en lokal kraftvärmeanläggning baserad på sju dieselmotorer, varje aggregat med 1,7 MW_{th} och 1,6 MW_{el} [12]. Dessa är designade för 130°C framledningstemperatur och 60°C returtemperatur. Som framgår av **Figur 5-14** är även två parallellkopplade LiBr-AKM anslutna till systemet, som levererar kyla till flygplatsen. Topplastkyla producerades med KKM. Problemet med systemet har varit att man under långa drifttider levererade höga returtemperaturer tillbaka till FV-nätet, eftersom de båda AKM var dimensionerade för de relativt höga systemtemperaturerna 120/95°C.

Av denna anledning beslöt man att komplettera kylsystemet med en seriekopplad SE/DL-AKM som skulle säkerställa att returen tillbaka till kraftvärmeverket alltid var 60°C. Detta lyckades även med så höga FV-framledningstemperaturer som 130°C. Den minsta returtemperaturen i dellast var 55°C [13].



Figur 5-14: Schema av FV-produktionen vid flygplats München [12].

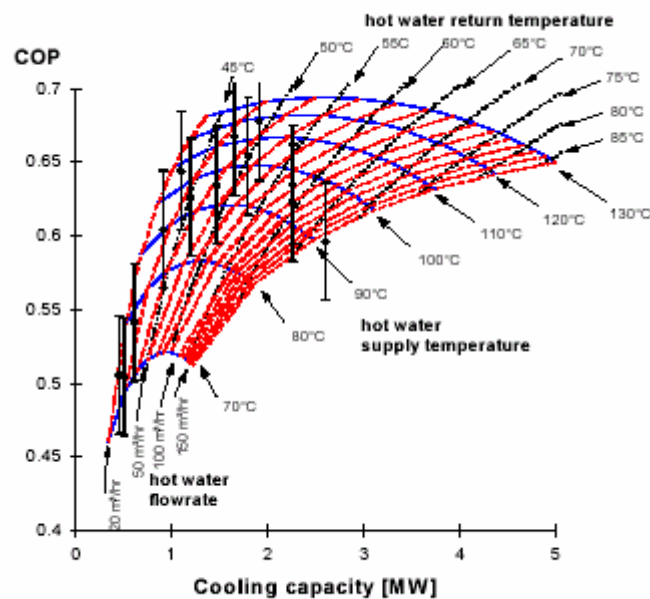
Scheme of the DH-production facilities at the Munich Airport.

Tabell 5-2: Driftparametrar för tre AKM installerade på flygplats München.

Operational parameters for the three AKM installed at Airport Munich.

	SE I och II	SE/DL
Tillverkare		Entropie GmbH, Erding
Generator design temp fram/retur [°C]	120/95	95/62
Kylvatten-temperatur [°C]	27/35	27/35
Kaltvatten-temperatur [°C]	12/6	12/6
Kyleffekt [MW]	1,5 + 1,5	3
Generatoreffekt [MW]	2,1 + 2,1	5
COP	0,7	0,6

Det visade sig dessutom, att denna nedkylning var av gagn såväl för kraftvärmeverket som för kylproduktionen från de båda andra AKM, eftersom de tidigare höga returtemperaturer som levererades från AKM I och II gjorde att man oftast inte kunde utnyttja hela systemet fullt ut. **Figur 5-15** visar ett driftdiagram för tre olika regleringsfall sambandet mellan kyleffekt, COP, framtemperatur och returtemperatur.



Figur 5-15: Driftkaraktistika för tre olika driftsätt av SE/DL AKM vid flygplats München enligt [12].

Characteristics for three different operation ways at Airport Munich.

Av driftdiagrammet kan tre olika regleringsfall för hetvatten-bypass kopplingen utläsas:

a) Konstant framledningstemperatur:

I detta fall sker regleringen med volymflödet. FV-vattnets returtemperatur ställer in sig enligt kurvorna för "hot water return temperature".

b) Konstant volymflöde:

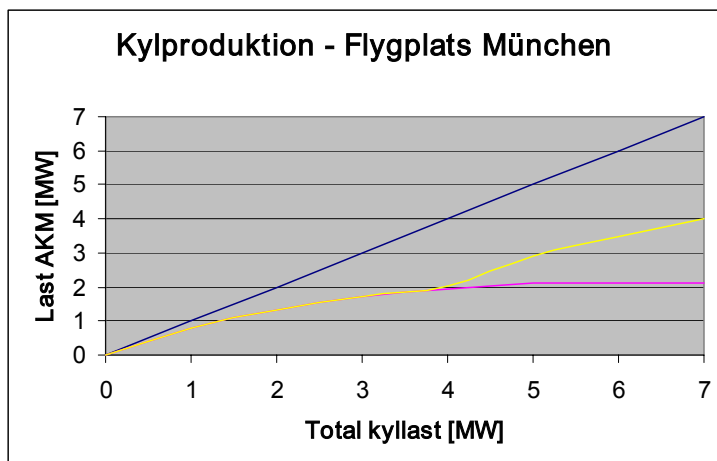
I detta fall sker regleringen med FV-framledningstemperaturen. FV-vattnets returtemperatur ställer in sig enligt kurvorna för "hot water return temperature".

c) Oreglerat:

För varje drifttillstånd finns en given returtemperatur.

Mätpunkter med bandbredden anger det uppmätta drifttillståndet vid $T_f = 95^\circ\text{C}$.

Den utförda kompletteringen av de befintliga AKM med en SE/DL-AKM gjorde det möjligt att producera hela kyllastbehovet med AKM-drift, varav en AKM körs i dellast i enlighet med Figur 5-16.



Figur 5-16: Kylproduktion med tre AKM vid flygplats München: I botten ligger SE-I. Redan vid 1 MW kyllost går SE-DL III in och producerar kyla i dellast. Fr o m 4 MW går SE-II in på dellast, SE I går på fullast. Total kyleffekt 7 MW.

Cooling production with three AKM at Munich Airport: SE-1 takes the base load. At a cooling load of 1 MW the SE-DL III adds cooling at partial load. At loads larger than 4 MW starts SE-II at partial load and SE 1 operates in full-load. Total cooling production: 7 MW.

5.3.6. SE-DL i Düsseldorf och Berlin

1996 installerades under ledning av Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE) i Garching, Tyskland, två prototyper för Ensteg - dubbellyft-AKM. En maskin installerades av BEWAG vid TU Berlin, den andra av Stadtwerke Düsseldorf vid Kraftwerk Lauswand. Dessa AKM var utvecklade speciellt för drift i fjärrvärmesystem i syfte att uppnå låga returtemperaturer [9]. Följande driftparameter gäller (**Tabell 5-3**):

Tabell 5-3: Driftparametrar för två Pilot-SE-DL AKM utvecklade av ZAE.

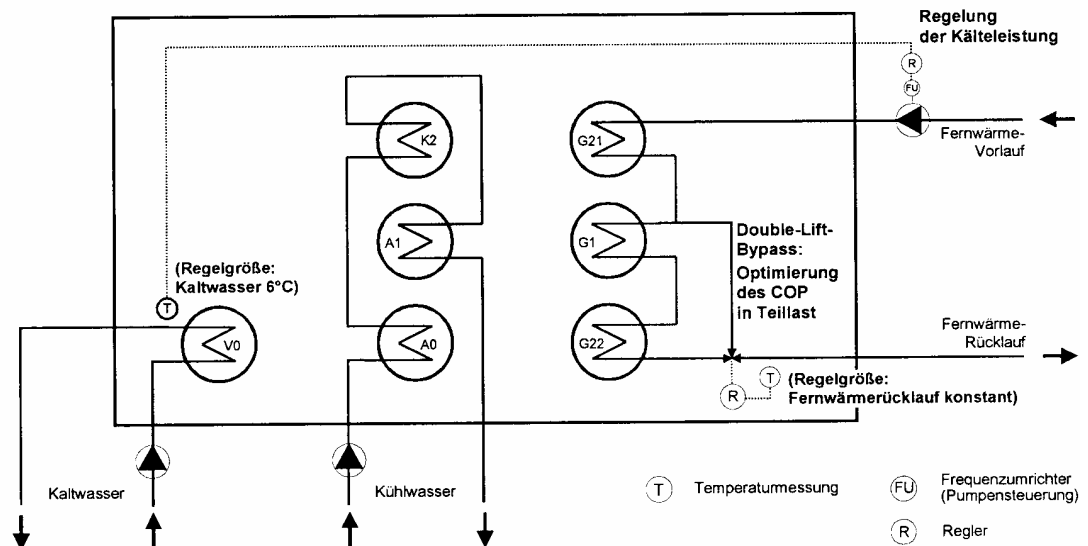
Operational parameters of two pilote-SE_DL AKM developed by ZAE, Germany.

	TU Berlin	Stadtwerke Düsseldorf
Tillverkare	Entropie GmbH, Erding	GEA Luftkühler GmbH, Heme
FV-design temperaturer fram/retur [°C]	95/65	95/65
Kyltorn temperatur [°C]	27/35	27/35
Kaltvatten temperatur [°C]	12/6	12/6
Kyleffekt [kW]	400	300
COP	0,62	0,58

Dessa två AKM har konstruerats med samma komponenter som används i konventionella enstegsmaskiner. Detta innebär att inga speciella reglermekanismer har tillämpats utan maskinerna kan regleras externt via volymflödes- eller temperaturreglering [9].

Volymflödesregleringen lämpar sig särskilt bra för att ge låga temperaturer med relativt höga COP-värden. Ensteg och dubbellyft kan köras parallellt via by-pass med volymflödesreglering av fjärrvärmeflödet (se **Figur 5-17**). På detta sätt kunde temperaturdifferenser upp på 30°C uppnås. I **Figur 5-15** visades sambandet mellan fram- och returtemperatur samt den specifika kyleffekten. Som framgår därav kan mycket låga returtemperaturer uppnås vid dellast. I figuren finns även jämförelseeffekten för SE – AKM inritad.

Eftersom resultaten visar uppmätta driftresultat, så kan man konstatera att SE-DL AKM i praktiken har möjlighet att åstadkomma låga returtemperaturer. Den stora temperaturdifferensen innebär – för samma effekt – att det primära massflödet kan vara mycket mindre, vilket också har stor betydelse för dimensionering av värmeväxlare och övriga hydroniska komponenter såsom pumpar, rör mm i AKM. Även om det finns flera komponenter i en SE-DL i förhållande till en SE maskin, så kan maskinen göras mera kompakt och således håller sig fördyringen inom vissa gränser.



Figur 5-17: Flödesschema för SE-DL AKM med by-pass reglering.

Scheme of SE-DL AKM with by-pass control.

5.3.7. AKM i Cheongju, Korea

Inom IEA DH&C Task VII [23] pågår ett projekt med målsättning att uppnå låga returtemperaturer i fjärrvärmenät. Inom projektet har bland annat ett nät i Cheongju, Korea studerats. Till nätet är ett hundratal fjärrvärmecentraler anslutna, tre av dessa i kombination med AKM (se **Figur 3-2**). Dessa AKM körs mest som baslast med temperaturer 95/80°C. Sommartid överstiger därför fjärrvärmecentralernas returtemperatur 70°C, under långa perioder. Däremot är nätet i övrigt så pass stort, att dessa höga returtemperaturer inte har någon märkbar inverkan på själva returtemperaturen intill produktionsanläggningen.

5.3.8. Tokyo Water Front projekt

En annan intressant tillämpning utgör ett demo-projekt för spillvärmeutnyttjande vid Tokyo Water Front District Heating & Cooling Corporation [19]. Där utvecklades en LiBr dubbellyft AKM med intern värmeväxlare som genererar kyla vid 7°C vid en generatortemperatur på 60°C (kylvattentemperatur 25°C). Under dessa förutsättningar blev COP 0,53. Redan vid en generator-temperatur av 70°C skulle en COP på 0,7 kunna uppnås enligt beräkningar. Dubbellyftmaskinen är under vidareutveckling, bl a vad gäller värmeväxlare, men anses vara ekonomiskt jämförbar med SE/DL AKM.

6. Generella systemaspekter

Här görs en kort sammanfattning av de viktigaste systemaspekter och reglerstrategier som är vanliga vid fjärrvärmedriften. Dessa ska tjäna som en bakgrundsbeskrivning för de systemberäkningar som genomförs i avsnitt 7.

6.1. Reglerstrategier

En SE-absorptionskylmaskin dimensioneras i regel till en maximieffekt. Oftast gäller då 95/80°C som designtemperaturer (fram/retur). Regleringen sker i normalfall genom att antingen styra volymflödet eller framledningstemperaturen till AKM. I detta fall tjänar kallvattentemperaturen (t ex 6°C) som reglerparameter. I princip kunde man också tänka sig en varierande kallvattentemperatur som reglermekanism. Med sjunkande effekt reduceras även returtemperaturerna över värmeväxlarna, vilket medför att fjärrvärmereturtemperaturen sjunker. Över större delen av dellastområdet är COP konstant, dvs 0,7 – 0,75. Först när dellasten sjunker under 20 % blir andra effekter för t ex pumpar och reduceringsventiler märkbara och COP reduceras.

En SE/DL AKM förhåller sig dock annorlunda. I dellastdrift med by-pass sker en uppdelning av flödet. En del går genom ensteg-generatorn G21 och till tillbaka till returen, en annan genom dubbellyft-generatorerna G1 och G21 (se **Figur 2-9**). Detta innebär att båda processerna kan köras oberoende från varandra och kombinationen av båda påverkar returtemperaturen såväl som COP. Beroende på om man nu tillämpar temperaturreglering eller volymflödesreglering finns det olika drifttegenskaper. Eftersom dubbellyft-processen har en lägre COP än ensteg-processen, så är den kombinerade COP vid fullast 0,62. Vid *volymflödesregleringen* med konstant framtemperatur ökar avkylningen i SE-generatorn med sjunkande kyllast, medan temperaturdifferensen i dubbellyft-delen är nästan oförändrad. Detta ökar den totala avkylningen och COP ökar mot värdet för SE-processen. Vid *temperaturstyrning* blir DL-effekten nästan oförändrad, medan SE-effekten minskar. Detta innebär att COP faller mot DL-värdet på ca 0,4. Från **Figur 6-1** framgår sambanden mellan fram- och returtemperaturerna samt tillhörande COP för olika driftfall och systemkopplingar (med och utan by-pass) [9]. Vid samtidigt volymflödes- och by-pass-reglering uppnås den maximala COPn redan vid dellastdrift under 50 % av max kapaciteten.

Resultaten från dessa simuleringar, vars resultat är verifierade genom mätningar enligt [9] har använts för de dynamiska beräkningar av returtemperaturen som redovisas i avsnitt 7.

6.2. Generella systemaspekter

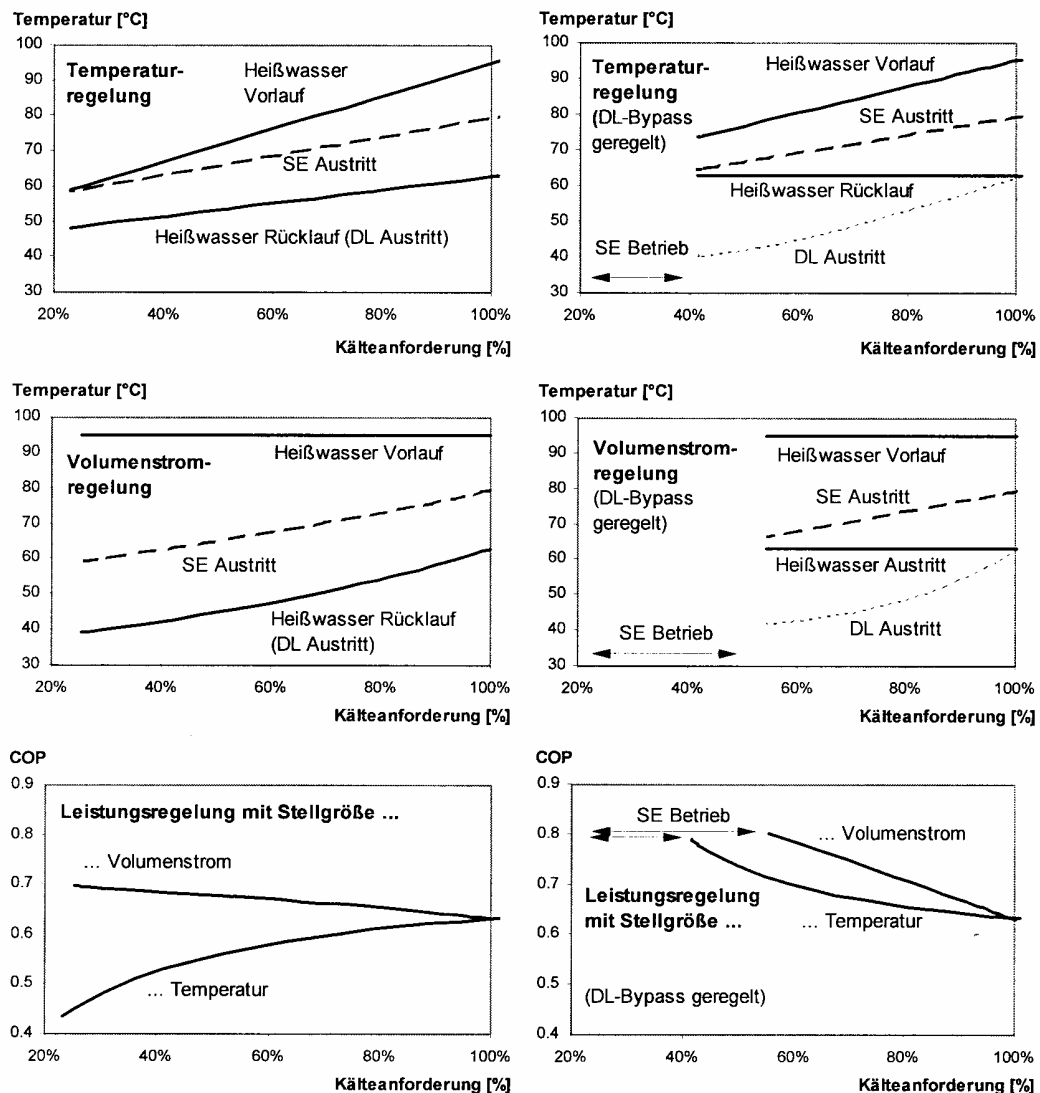
Vid anslutning av AKM till fjärrvärmenät bör följande generella aspekter beaktas:

Normalt är fjärrvärmenätet endast dimensionerat för värmebehovet. Anslutning av AKM begränsas alltså av de flöden som vinterns designbehov betingar. Med hänsyn till det svenska klimatet är detta ett mindre problem, men lokalt kan effektbrist för kyla uppstå.

Vid fullast är avkylningen av nätet mycket liten, ca 10°C. Detta medför att en AKM kan kopplas fram/fram och behöver på så sätt inte vara ett hinder för värmeleveransen, om framledningstemperaturen till AKM är 90°C eller som lägst 80°C (vid dellast).

Driften av AKM underlättas om kallvattensystemets framtemperatur ökar vid lägre effektbehov. Detta medför lägre FV-returtemperaturer.

FV-returtemperaturer minskar också om man använder lägre kyltornstemperaturer, vilket är möjligt under den kallare årstiden.



Figur 6-1: FV-temperatur samt COP av en SE-DL AKM i dellastdrift. Olika reglerfall för volymflödereglering resp temperaturreglering är redovisade för två systemutföranden: Med (till höger) och utan (till vänster) by-pass [9].

DH-temperatures and COP of a SE-DL AKM in partial load operation. The effect of different control strategies (mass flow and temperature control, respectively) is shown. Two system alternatives are shown: SE-DL with (right side) and without by-pass (left side).

- Om AKM används som topplastanläggning, så förekommer det maximala kylbehovet endast under få drifttimmar, vilket innebär att FV-temperaturer på 90°C under sommaren endast behövs under ett fåtal drifttimmar årligen. Å andra sidan innebär spetslastdrift ett oekonomiskt utnyttjande av investeringen.
- Om AKM drivs som baslastanläggning med kompressorkylmaskin för topplast, så behövs FV-temperaturer på 90°C under stor del av drifttiden.
- Det finns dock nu avancerade AKM på marknaden, bl a från Entropie som med ny värmväxlar-design erbjuder temperatur av 90°C med en

returtemperatur av 70°C och COP av 0,8. Dessa AKM kan vid delast ge returtemperaturer i närheten av 60°C. Dessa maskiner är alltså väsentligt bättre än vad som framgår från vår studie, där vi antog en framledningstemperatur som 90°C, returtemperatur av 80°C och COP av 0,7 som basdesignvärden. Men det ändrar ingenting på själva grundproblemet, nämligen att AKM i regel levererar höga returtemperaturer till fjärrvärmereturen.

7. Jämförelse av olika inkopplingssätt av AKM i fjärrvärmenät

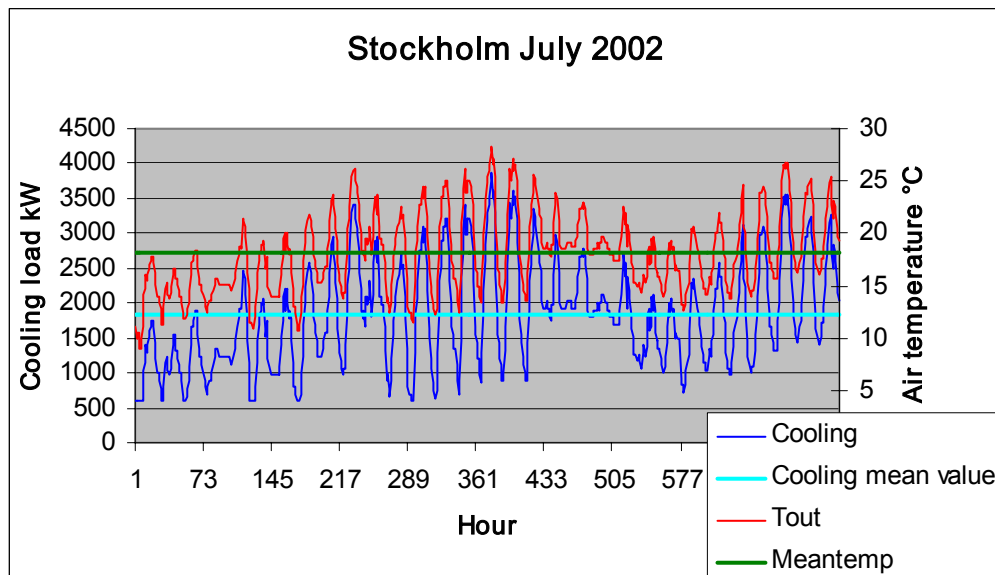
I det här avsnittet görs en jämförande beräkningsanalys av olika sätt att koppla in AKM i fjärrvärmesystem. Utgående från en grundläggande AKM-konstruktion som den som levererats till Linköping av Carrier beräknas kylproduktionen och returtemperaturen för olika kopplingssätt (fram/retur och/eller fram/fram) med upp till tre förekommande AKM i fjärrvärmesystem, för såväl SE som SE-DL utföranden. Beräkningarna görs på timbasis för juli i Stockholmsklimat. Målsättningen för beräkningen är att visa vilka returtemperaturer som kan uppnås med olika systemlösningar.

7.1. Bakgrund

I avsnitt 4 har vi diskuterat de principiella kopplingssätten för absorptionskylmaskiner i fjärrvärmenät: Fram/fram eller fram/retur är huvudmöjligheterna att ansluta AKM, men mycket tyder på att kombinationer av dessa inkopplingssätt kan bidra till att reducera returtemperaturen. Vi har också sett att kyldesignlasten endast kan vara en bråkdel av värmedesignlasten, men att en större avkylning av fjärrvärmevattnet skulle kunna bidra till att kyleffekten kan öka. I detta avsnitt vill vi nu beräkna och jämföra olika driftfall för att undersöka, under vilka förutsättningar låga returtemperaturer kan uppnås.

7.2. Problemställning

Den vanligaste absorptionskylmaskin som används i fjärrvärmesystem är av typen *1-stegs ensteg (SE)* AKM baserad på LiBr/vatten-cykeln som den beskrivs i avsnitt 2.4. Dessa maskiner är oftast designade för normaltemperaturer kring 95°C. Det är dock möjligt att köra dem på lägre temperaturer runt 90°C och med ett minimum på ca 80°C, då med överdimensionerade värmeväxlare jämfört med normalfallet. I Nord- och Mellaneuropa inträffar det ju sällan att den maximala kyleffekten verkligen behövs, se **Figur 7-1**.



Figur 7-1: Timvärden för lufttemperatur och kylast i Stockholm klimat, juli 2002. Se också avsnitt 7.3 för kylastmodellen.

Hourly values of air temperatures and cooling-load for Stockholm, climate for July 2002. (See chpt. 7.3 for the cooling load model).

Det är också möjligt att köra AKM på dellast genom att reglera massflöde eller temperatur. Temperaturregleringen innebär att man sänker generatortemperaturen tills man uppnår den önskade effekten. Vid låga effekter kan det vara frågan om temperaturer omkring 80°C. Om returtemperaturen under normala förhållanden ligger på ca 80°C kan man under dellastdrift få ner returtemperaturen till ca 60°C, då kanske endast med ca 30 – 40 % av kyleffekten [9], [20]. Det borde därmed vara möjligt att under en normal svensk sommardag kunna sänka medeltemperaturen på returen till närmare 60°C än 80°C. Vi förutsätter vidare att en AKM ursprungligen är dimensionerad för fjärrvärme med en drivtemperatur på 90°C, dvs lägre än vad som normalt är fallet (95°C) . Den slutliga returtemperaturen i fjärrvärmenätet kommer dock fortfarande att vara högre än om belastningen vore en vanlig värmelast.

En annan typ av absorptionskylmaskin är *ensteg - dubbellyft (SE-DL) AKM*, som kan köras i 2-steps eller 1-steps läge. I 2-steps-läget arbetar maskinen på ytterligare en trycknivå vilket medför att AKM kan kyla värmemediet ner till 60°C vid fullast och 50°C vid dellast. Nackdelen med detta är att COPn då endast kommer att bli omkring 0,4 (se avsnitt 2.4). De flesta belastningssituationerna tillåter dock en kombination av ensteg och dubbellyft, vilket gör att COP kommer att hamna på mellan 0,4 och 0,7 [9],[22]. Det bör noteras att SE-DL innehåller totalt sett fler komponenter än en SE-AKM och blir därför betydligt dyrare.

Enligt **Figur 7-1** är medelkylasten i Sverige i praktiken betydligt lägre än den maximala kylasten. Detta leder till följande systemmöjligheter:

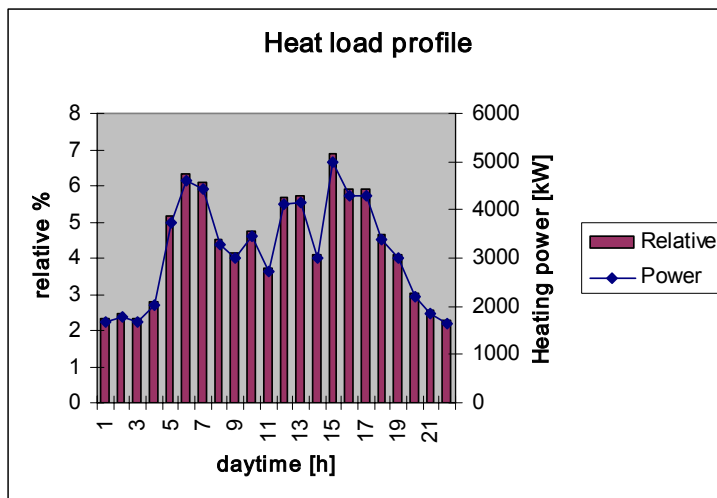
- I stället för att låta AKM arbeta under baslast borde det vara intressant att undersöka, vilken *medelreturtemperatur* som kan erhållas om en AKM körs under behovslast, dvs med varierande dellast.
- Användningen av kylager skulle kunna förbättra driftsegenskaperna så att lägre returtemperaturer kan erhållas.

I de följande avsnitten undersöks dessa systemlösningar genom en driftsimulering för att se vilka returtemperaturer som kan uppnås under olika systemförutsättningar.

7.3. Modellen för fjärrvärme- och fjärrkyla

Modellen för det undersökta fjärrvärme- och kylsystemet är relativt enkel. Vi antar ett fjärrvärmesystem där temperaturen i juli är i normalfall 80°C (fram) och 50°C (retur). Vidare antas att lasten är ett hetvattensystem och att systemet försörjer 10 000 lägenheter med värme, vilka behöver värme motsvarande 125 l vatten per dag med en temperatur på 60°C.

Den kommunala kallvattenförsörjningen håller en temperatur på 10°C. Medeleffekten blir då drygt 3000 kW. Vi antar vidare att energikonsumtionen ser ut enligt Figur 7-2, där toppbelastningen på timbasis är 3,5 ggr större än basbelastningen. Konsumtionen ser likadan ut under samtliga dagar i juli.



Figur 7-2: Värmelasten inklusive ledningarnas värmeförluster för juli.

Heat load including pipe losses for the investigated system in Stockholm climate.

För att förenkla modellen har systemets värmeförluster inkluderats i denna profil. I vår simulering har maximiflödet satts till 574 m³/h och skillnaden mellan detta och designflödet (dvs vintervärmelasten) kan användas för AKM-driften, om den är parallellkopplad med den övriga belastningen. Om kylmaskinen är seriekopplad med belastningen kommer maximiflödet för vår modell av fjärrvärmesystemet att medföra en relativt låg maximal AKM effekt, däremot kan en ideal returtemperatur på 50°C levereras (Figur 7-4c). Vi har dock förutsatt att detta inte är någon tillfredsställande systemlösning och att i de flesta undersökta fallen måste inkopplingen förses med en by-pass, vilket skiljer hetvattenbehovet och kylbehovet åt på bekostnad av eventuellt högre returtemperaturer (Figur 7-4d). Ett exempel på kylbehovet under juli visas i **Figur 7-1**.

Kylbehovet beräknas enligt följande ekvation:

$$P_{\text{kyla}} = 0,6 + \max(0; (0,2 \cdot (T_{\text{luft}} - 12))) \text{ MW} \quad (9)$$

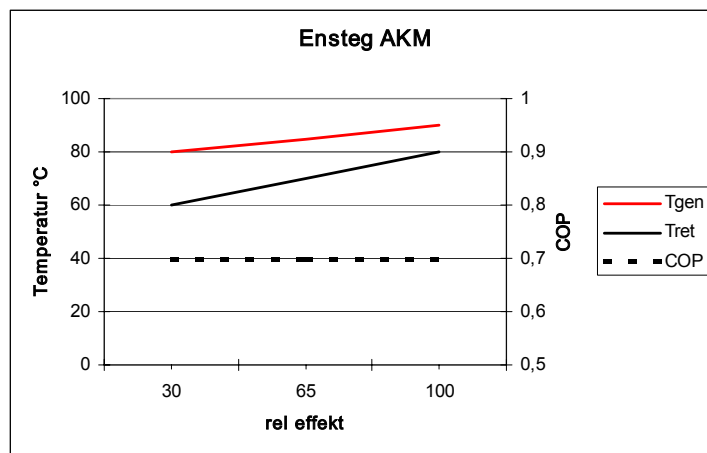
Där baslasten är 0,6 MW och större kylbehov finns vid lufttemperaturer högre än 12°C. Det maximala kylbehovet blir då 3,8 MW för klimatexemplet Stockholm 2002 (se även **Figur 7-5**).

7.4. Absorptionskylmaskiner anslutna till fjärrvärme

I vår modell är kylastbehovet för en SE-AKM dimensionerat för en nominell effekt på 3,8 MW vid 90°C ingångstemperatur till generatorn. Under dellast antas driften vara temperaturreglerad och drifttemperaturen kan sänkas ner mot 80°C.

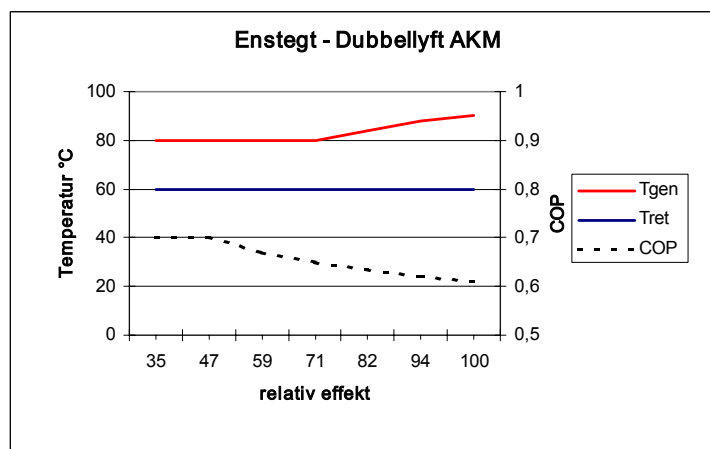
Returtemperaturen varierar då gradvis mellan 80 och 60°C. SE-DL maskinen är också dimensionerad för 90°C men med en snabbare sjunkande tillförseltemperatur och en konstant returtemperatur ner mot 60°C, oberoende av uteffekten. Detta förutsätts här att uppnås genom drift i kombinerad ensteg – dubbellyft-teknik med intern by-pass enligt [9] och Figur 2.9. **Figur 7-3a,b** visar generatorns in- och uttemperaturer på fjärrvärmesidan samt COPn som funktion av levererad kylkapacitet för de två undersökta huvudtyperna: SE respektive SE-DL AKM. Dessa värden används i modelleringen. Absorptionskylmaskinerna är tänkta att kunna leverera kyla i de olika undersökta systemkonfigurationerna. Temperaturerna i köldproduktionssystemet är 6/12°C och temperaturerna i kyltornkretsen är 27/32°C. I den här undersökningen kan AKM antingen kopplas i serie eller parallellt med värmelasten. Upp till tre olika AKM kommer att vara inblandade i köldproduktionen.

Sambanden mellan kyleffekt, COP, in-temperatur och ut-temperatur i generator används sedan i systemberäkningen för att beräkna hela fjärrvärmelastens temperatur.



Figur 7-3a: Drifttemperaturer och COP av en ensteg AKM som funktion av effektkapaciteten (i procent av max-effekten vid 90°C) enligt [20].

Operational temperatures and COP of a Single-Effect AKM as a function of relative power capacity (in percent of maximum power at 90°C generator temperature) according to [20].



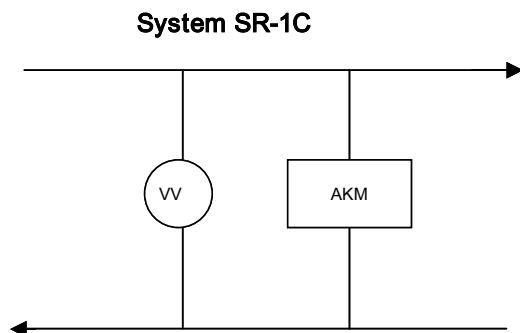
Figur 7-3b: Drifttemperaturer och COP för en ensteg - dubbellyft-AKM som funktion av effektkapaciteten (i procent av maximi-effekten vid 90°C) enligt [9].

Operational temperatures and COP of a Single-Effect – Double-Lift AKM as a function of relative power capacity (in percent of maximum power at 90°C generator temperature) according to [9].

7.4.1. Alternativa kopplingsscheman för AKM i fjärrvärmesystem

Ett delmål med denna studie är att undersöka, i vilken konfiguration AKM kan leverera den lägsta returtemperaturen till kraftverket. Det är även av intresse att titta på i vilken konfiguration det går att leverera den högsta sammanlagda kyleffekten. För att uppfylla detta syfte har systemkonfigurationerna enligt Figur 7-4a - 7-4f undersökts. Några av dessa system har även undersökts i [18], men då endast med utgångspunkt från designeffekten, vilket resulterar i högre returtemperaturer.

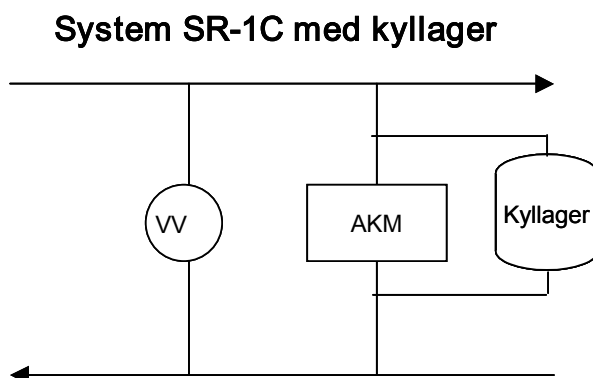
Nedan presenteras de olika modellerade systemkonfigurationerna.



Figur 7-4a: System SR-1C – ensteg fram/retur koppling med en parallellkopplad kundnod.

System SR-1C – Single-Effect supply-return connection with one customer node in parallel.

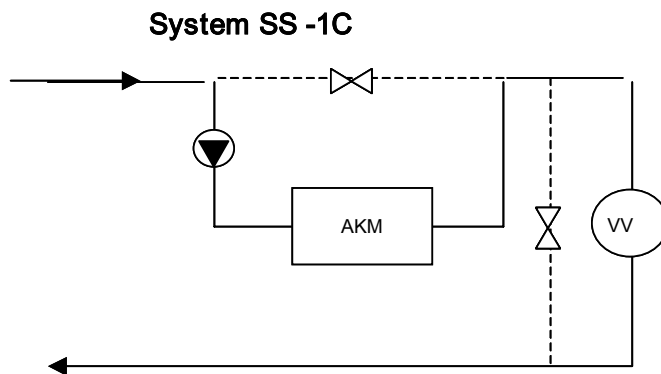
Detta är den enklaste kopplingen som används väldigt ofta idag. Kyleffekten är oberoende av värmelasten så länge den inte överskrider max flödeskapacitet. Returtemperaturen kommer däremot att bli hög vid större effektbehov. Den här kopplingen undersöks för både SE- och SE-DL-AKM.



Figur 7-4b: SR-1C ensteg-AKM med endagars kyllager.

SR-1C Single-Effect-AKM with one-day cooling storage.

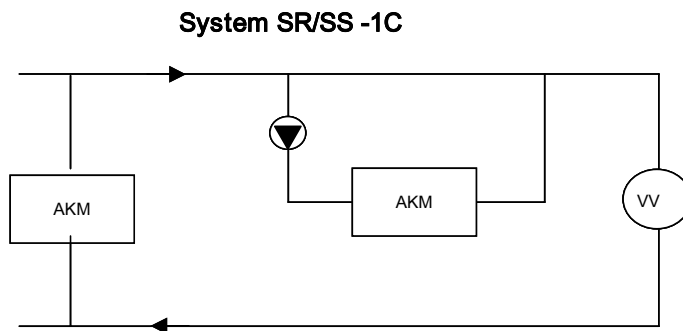
Den här kopplingen är lika med systemet i Fig 7-4a, med tillägg av ett kyllager för att därmed kunna minska AKM-effekten vid samma typ av kunder och kylbehov.



Figur 7-4c: SS-1C ensteg AKM seriekopplad med värmelasten (fram/fram koppling).

SS-1C Single-Effect AKM connected in series with the heat load (supply-supply connection).

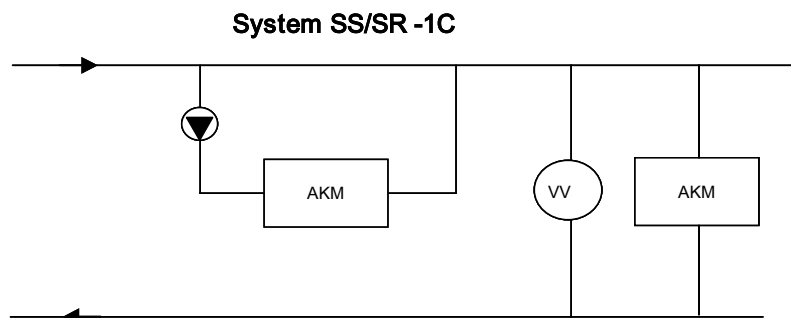
AKM återkopplas till framledningen och sänker därmed fjärrvärmenätets framtemperatur efter AKM från 90 till 80°C. Det maximala kölduttaget begränsas dock här av den efterföljande värmelasten.



Figur 7-4d: SR/SS-1C parallell/serie kombination av två ensteg-AKM.

SR/SS-1C combination of two Single Effect AKM, one in parallel and one in series.

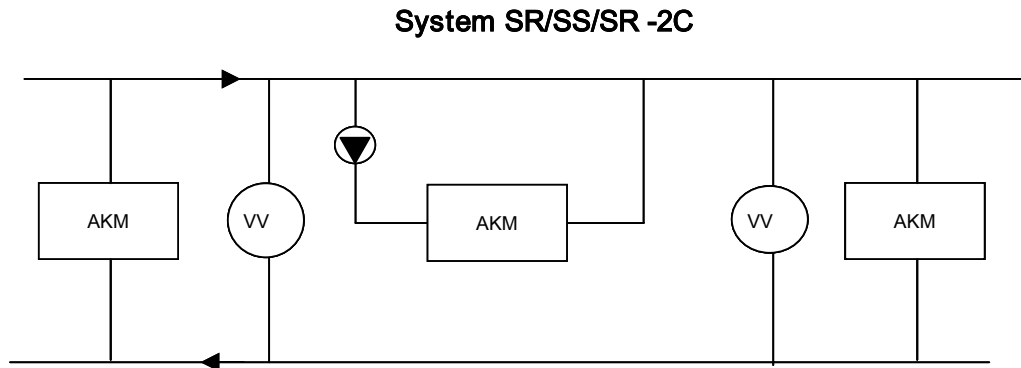
En AKM är SR-kopplad närmast kraftverket och den andra är SS-kopplad med värmelasten nedströms. Både SE och SE-DL har studerats.



Figur 7-4e: SS/SR-1C kombination av två AKM, en seriekopplad och en parallellkopplad.

SS/SR-1C combination of two Single-Effect AKM, one in series and one in parallel.

Den första AKM, närmast värmeverket, är seriekopplad. Den andra arbetar med en temperatur på 80°C och har därmed begränsad kylkapacitet. Både SE och SE-DL har studerats.



Figur 7-4f: SR/SS/SR – kombination av tre AKM, två parallella och en i serie.

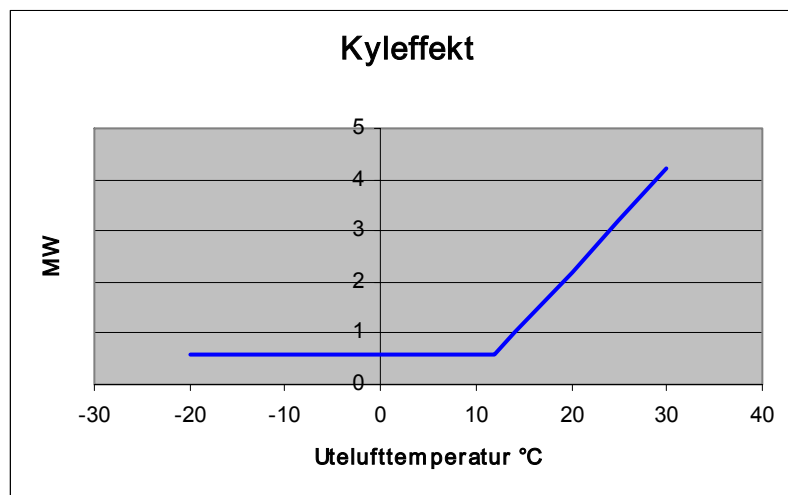
SR/SS/SR – combination of three AKM, two in parallel and one in series.

Meningen är att värmelaster är kopplade i anslutning till de båda parallellkopplade AKM.

7.5. Systemmodelleringar

7.5.1. Modellen

De olika konfigurationer som visats ovan har modulerats med en last- och flödesmodell baserad på timvärden med uppmätta klimatdata under juli månad i Stockholm. Profiken på värmelasten under ett dygn visas i **Figur 7-2** och ett exempel på kylbehovet timme för timme för månaden juli i **Figur 7-1**. Den maximala värmelasten sommartid är 5000 kW (den maximala vinterlasten är beräknad till 39 000 kW). Kylbehovet är antaget att vara proportionellt mot utomhustemperaturen, lastkurvan visas i **Figur 7-5**. Den maximala utomhustemperaturen var under den givna perioden 28,3°C, vilket ger ett maximalt kylbehov på 3856 kW. Baslastbehovet av kyla antogs vara 600 kW. Det här förhållandet mellan max- och min-behov av kyla gäller t.ex. för den AKM som finns installerad vid Linköpings universitet.



Figur 7-5: Kylbehovetsomfunktion av utelufttemperaturen enligt ekvation 9.
Cooling load as function of outdoor air temperature according to equ. 9.

Alla beräkningar är gjorda i Excel och är baserade på generatorns fram- och returtemperatur som funktion av produktionskapaciteten så som det visas i Figur 7-3 a,b. AKM-generatorns värmebehov styrs då av kyllasten och är en funktion av den för driftfallet rådande COPn.

En begränsande faktor för den maximala värmeleveransen till generatoren är det maximala flödet, dimensionerat efter fjärrvärmenätets designeffekt under vinterhalvåret. Det maximala massflöde som under sommaren är tillgängligt för värmetransport till generatoren är nämligen det som återstår efter att värmelastens behov tillgodosetts. Detta behov valdes så att det dimensionerande flödet nåddes vid maximal totallast (värmelast och generatorvärme).

Vid parallellkoppling blandas returtemperaturerna från värmelasten och generatoren. Vid fram/fram koppling (SS) begränsas massflödet av värmelasten och därmed också produktionen i AKM. Då en SR-kopplad AKM ligger nedströms en SS-kopplad, är temperaturen till generatoren en funktion av massflöde och värmelast. I dessa fall balanseras massflödet via en by-pass koppling. För att ta fram temperaturen till generatoren på den andra AKM utfördes iterationsberäkningar. I detta fall sattes den maximala kylkapaciteten på SS AKM till 25 % av den maximala kyllasten, d.v.s. 964 kW. I exemplet med tre AKM sattes kapaciteten till 33,3 % på AKM-SR1 och till 25 % på AKM-SS.

Det bör nämnas att huvudvikten i denna studie ligger på att undersöka vilka returtemperaturer som är möjliga att åstadkomma. Dessa AKM är dimensionerade så att nödvändig effekt ska kunna levereras, vilket betyder att en AKM som arbetar med lägre temperatur än designtemperatur producerar antingen mindre kyla eller behöver större värmeväxlayta för att producera önskad kyleffekt. Därför bör man vara försiktig med att dra ekonomiska slutsatser utifrån denna analys (detta kommer dock att behandlas i en senare uppföljningsstudie).

Totalt har nio fall undersökts. De viktiga resultaten från beräkningarna presenteras i Tabell 7-2. Tabellen visar 5 olika systemkopplingar, varav tre i kombination med SE-DL-AKM istället för SE-AKM. Dessutom visas även grundfallet med ett kylager. I översikten nedan presenteras en sammanställning av de olika systemmodelleringar som är genomförda.

Tabell 7-1: Tabell som visar de olika beräknade kylsystem-konfigurationerna.*Table over different investigated cooling system configurations.*

	SE	SE-DL	Med kyllager
SR-1C	x	x	x
SS-1C	x		
SR-SS	x	x	
SS-SR	x	x	
SR1-SS-SR2	x		

7.5.2. Beräkningsresultat

De resultat som redovisas är i första hand generatorns värmebehov samt kylbehovet, resulterande fram- och returtemperaturer (som en funktion av värmelasten) samt involverande flöden för juli-månaden. De presenterade värden är antingen maximi värden (effekt och flöde) eller månadsmedelvärden (temperaturer). Temperaturerna redovisas såväl för varje enskilda AKM, men även som resulterande returtemperatur i fjärrvärmeledningen. Vidare redovisas i Tabell 7-2 några nyckeltal för systemen:

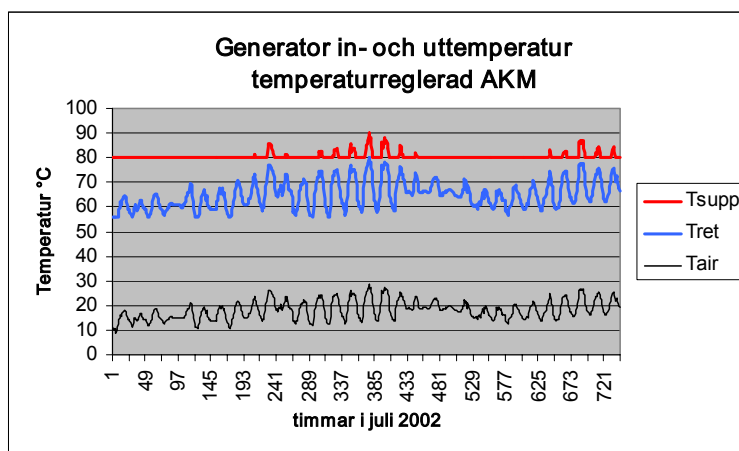
$P_{\text{gen värme}}/P_{\text{DH}}$ = förhållandet mellan tillförd generatoreffekt och nätets designeffekt

$P_{\text{kyl}}/P_{\text{DH}}$ = förhållandet mellan kyleffekt och nätets designeffekt

Kapacitesfaktor = anger vilken andel av kyllasten systemet kan (≤ 1) eller skulle kunna (>1) producera

FV-flödesfaktor = Max FV-flödet som uppnås i förhållandet till designflöde.

Från Tabell 7-2 framgår att AKM, dimensionerade för en viss maximieffekt, kan köras på deffekt och därmed leverera mycket lägre returtemperaturer (jmf med designvärden), förutsatt att flödet till generatoren är temperaturreglerat. Anledningen till detta är att värmeöverföringen, vid lägre specifik effekt, betingar även lägre temperaturdifferens för att driva värmen.

**Figur 7-6: Luft- och FV-temperaturer för fallet SR-1C, med temperaturreglerad lastkontroll för AKM i juli.**

Air and DH temperatures for the case SR-1C, with temperature controlled operating strategy.

Returtemperaturer

Figur 7-6 visar ett exempel på drift- och returtemperaturer för SR-1C. Drifttemperaturen överskrider 80°C endast vid höga lufttemperaturer. Drifttemperaturen har i detta fall ett medelvärde på 80,5°C och medelvärdet för AKM returtemperatur ligger på 65,1°C.

När AKM returen blandas med returen från fjärrvärmecentralerna kan relativt låga medeltemperaturer uppnås för det totala returflödet. I fallet SR-1C blir denna temperatur 60,2°C. Den lägsta returtemperaturen går att åstadkomma då två AKM kopplas samman enligt principerna SR-SS eller SS-SR. I dessa fall är det möjligt att åstadkomma returtemperaturer på 55,6°C med enbart SE-AKM och 53,3°C med SE-DL AKM i fjärrvärmenätet. I fallet med tre AKM, SR1-SS-SR 2C (med två lastnoder), fås ytterligare en sänkning av returtemperaturen till 54,9°C för SE-AKM-fallet. Även om diagrammet (Figur 7-6) visar på höga returtemperaturer (vissa dagar upp emot 76°C) gäller detta således endast under ett fåtal timmar.

Kyllagret

Att den resulterande nivån på returtemperaturen beror på sättet att utnyttja AKM går att visa genom att jämföra SR-1C-fallen med och utan kyllager. Anledningen till att eventuellt installera ett kyllager är att hålla nere den installerade effekten på AKM och därmed kunna köra den mot ett mer konstant dagligt lastbehov. I detta fall minskades behovet av installerad effekt med 32 %, ner till 2619 kW (den monetära besparingen kan användas för investering i kyllager). Emellertid arbetar AKM då i genomsnitt närmare dess maximieffekt och lämnar därmed högre temperaturer under längre tid i retur. I detta fall 71,6°C, vilket medför att medeltemperaturen i fjärrvärmenätets returflöde kommer att vara 66,0°C. Detta kräver dessutom att kyllagret har en kapacitet på 17500 kWh, motsvarande 2500 m³ kallt vatten med en temperatur på 6/12°C, vilket måste vara billigare än den extra kostnad som en ”full-last” AKM skulle medföra.

Tabell 7-2: Jämförelse mellan olika AKM-konfigurationer i fjärrvärmenätet.

Comparison of the different investigated operation cases for AKM in district heating systems.

		SR-1C	SR-1C- kylager	SR- SEDL 1C	SS 1-C	SR-SS - 1C	SRDL- SS -1C	SS-SR -1C	SS- SRDL - 1C	SR-SS- SR-2C
FV design flöde	kg/h	574	574	574	574	574	574	574	574	574
FV design effekt	MW	39026	39026	39026	39026	39026	39026	39026	39026	39026
Kyla design effekt	MW	3856	3856	3856	3856	3856	3856	3856	3856	3856
Maximum effekt - värme										
AKM1	MW	5509	3741	6329	1665,88	1666	1666	1377	1377	1836
AKM2	MW					3887	4535	4132	5208	1377
AKM3	MW									2295
Maximum effekt - kyla										
AKM1	MW	3856	2619	3856	1166	1166	1166	964	964	1285
AKM2	MW					3050	3050	2892	2892	964
AKM3	MW									1607
Max AKM flöde										
Max FV flöde AKM1	kg/h	476	323	182	143,35	143	143	119	119	161
Max FV flöde AKM2	kg/h					259	130	476	173	119
Max FV flöde AKM3	kg/h									268
AKM medel ret temperatur										
AKM1	°C	65,1	71,6	60,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	65,5
AKM2						55,8	60,0	63,1	60,0	80,0
AKM3										62,2
Max total FV värme	kW	10507	8321	11326	6664	10507	11126	12477	11580	12724
Max total FV flöde	kg/h	584	441	322	143	467	271	590	292	598
FV medel fram temperatur	°C	80,5	80,5	80,5	90	90	90	90	90	90,0
FV medel ret temperatur	°C	60,2	66,0	55,6	50	56	53	56	53	54,9
Pgen värme /PFV		0,14	0,10	0,16	0,04	0,14	0,16	0,14	0,17	0,14
Pkylal/PFV		0,10	0,07	0,10	0,03	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
Kapacitets-faktor		1	0,68	1	0,30	1,09	,09	1	1	1
FV flödes faktor ϕ		1,02	0,77	0,56	0,25	0,81	0,47	1,03	0,51	1,04
Kylager kapacitet	kWh		17500							
Medel COP		0,70	0,70	0,67	0,70	0,70	0,69	0,70	0,68	0,70

Framledningskoppling (SS)

Även fallet SS-1C bör nämnas. I detta fall antas att AKM är seriekopplad med värmelasten (by-pass-ventilen är stängd). Därför är det endast möjligt att utnyttja det varierande flödet som beror av värmelasten till kylproduktionen. Detta begränsar kylproduktionen till endast 30 % av behovet som definieras av "kapacitetsfaktor" i Tabell 7-. Denna produktion medför å andra sidan att en perfekt sänkning av drifttemperaturerna sker, från 90°C till 80°C och vidare i de efterföljande fjärrvärmecentralerna i nätet från 80°C till 50°C, dvs normal returtempertur.

Ytterligare en intressant fråga är om någon av de olika kopplingarna går att använda för att öka den totala användningen av absorptionskyla i ett givet fjärrvärmenät med givna drifttemperaturer. "Flödesfaktorn" ϕ i Tabell 7-2 ger en antydning om detta. Det är maximi-flödet som används i respektive driftfall. Som synes utnyttjar alla driftfall med SE-DL-AKM eller med kyllager, fjärrvärmesystemet effektivare så att flödesfaktorn är mindre än 1. (Undantaget är SS-1C-systemet, som endast kan leverera en begränsad mängd kyla). Den inversa flödesfaktorn (designflöde / maximi-flöde) indikerar således hur mycket mer effekt man med en viss systemlösning skulle kunna producera. Som framgår av Tabell 7-2 skulle man med en ensteg-dubbellyft –AKM i SR-koppling kunna producera $1/0,56 \approx 80\%$ mera effekt i samma fjärrvärme/-kylesystem. (Tekniskt sett kräver dock en SE-DL betydligt större generatoryta för värmeöverföring än SE-AKM, vilket naturligtvis har sitt pris).

7.5.3. Slutsatser från systemmodelleringarna

Beräkningarna av kombinerad fjärrvärme- och fjärrkylesystem visar att returtemperaturerna från absorptionskylmaskiner kan minskas i fjärrvärmesystemet. Detta då AKM med större värmeväxlarytor och/eller med avancerad värmeväxlardesign, (jmf med det som anses vara standarddesign), kan köras på dellast. Sambandet för relationen mellan kapacitet, drift- och returtemperaturer är i vårt fall taget från [9]. Både ensteg- och ensteg-dubbellyft AKM har undersökts.

De lägsta temperaturerna erhöles då fjärrvärmesystemet utgjorts av en kombination mellan fram/fram- (SS) och fram/retur- (SR) AKM i nätet. Kombinationen med två SE-AKM ger då ett månadsmedelvärde för returtemperaturen på 56°C. System med ensteg - dubbellyft AKM ger lägre returtemperaturer och den största möjliga kyleffekten för en given storlek på fjärrvärmenät. Den lägsta genomsnittliga medeltemperatur för fjärrvärmenäts returflöde som fåtts fram för juli månad, blir då 53°C. En kombination av SR-SS-SR AKM med distribuerade belastningar ger de lägsta returtemperaturerna bland SE-AKM (55°C). Användningen av kyllager medför att AKM med lägre effekt kan installeras, detta resulterar dock i högre returtemperaturer i fjärrvärmesystemet, som i vårt exempel blev 66°C.

Det bör anmärkas att samma effekt som för överdimensionerade värmeväxlare kan uppnås med AKM som är försedda med avancerade värmeväxlare för generatoren, t ex Entropies AKM som använder sig av värmeväxlare av sprayfilmtyp, vilka då arbetar vid ungefär samma temperaturnivåer som de som har använts i denna studie.

8. Sammanfattande slutsatser

Materialsammanställningen i denna studie behandlar aspekten kring absorptionskylmaskinernas (AKM) inkoppling i fjärrvärmesystem. Anledningen är att AKM utgör en värmelast som till skillnad från de konventionella värmelasterna kräver högre framledningstemperaturer och levererar högre returtemperaturer. Det är viktigt att problemet uppmärksammas eftersom det kan förväntas en ökad användning av AKM i fjärrvärmenät pga av det allmänna intresset att öka fjärrvärmesystemens sommarlast. Med stigande andel AKM-last i ett fjärrvärmesystem ökar också returtemperaturen vid produktionsanläggningen, vilket eventuellt minskar möjligheten till effektiv drift av vissa produktionsanläggningar. I denna studie undersöktes julidriften i nio olika driftfall med såväl SE som SE-DL maskiner. Dessa driftkonfigurationer är SR, SS, SR med kyllager, samt kombinationerna SS/SR, SR/SS och SR/SS/SR.

Således kan kunskapen sammanfattas och slutsatserna, gällande användning av AKM i fjärrvärmesystem, dras enligt följande:

- Rent principiellt kan man konstatera att frågan om AKM-returtemperatur är snarare ett ekonomiskt problem än ett tekniskt problem. Det finns tekniska lösningar i drift som visar att låga returtemperaturer kan uppnås.
- Användningen av AKM baserade på LiBr/H₂O är relativt utbredd i asiatiska länder såsom Kina, Japan och Korea. Dessa körs med en designtemperatur på ca 95°C in och ca 80-85°C ut. Uppskattningsvis är i dessa länder ca 1000 AKM av en total marknad på 10000 AKM kopplade till fjärrvärmesystem. Många fjärrvärmesystem körs i dessa länder på högre temperaturer sommartid (omkring 100°C T_{fram}) än vad som är bruklig i Europa. I ett nät i Korea, som vi studerat mera noggrant, är returtemperaturen ca 70°C, men överstiger fjärrvärmenätets retur vid produktionsanläggningen är aldrig större än 55°C.
- I Europa förekommer AKM främst i Tyskland, och i mindre utsträckning i några andra länder såsom Holland och Italien. Marknaden i Europa där är dock betydligt mycket mindre än i Asien, och vad gäller fjärrvärmekopplade system så kan dessa räknas till mindre än 100. Det stora intresse i Europa (såsom i Japan) gäller trigeneration, dvs fristående mindre produktionssystem oftast baserade på dieselmotorer som producerar el, värme och kyla i kombination. EU stöder utvecklingsprogram som avser användning av sådana system.
- I Tyskland har problemet med returtemperaturer från AKM uppmärksamats tidigt eftersom man inser att detta utgör en teknisk begränsning för den annars mycket attraktiva metoden för produktion av kyla. Förutom returtemperaturen ställer även kravet på en relativt hög framledningstemperatur till problem. Höga distributionstemperaturer sommartid anses precis som i Sverige som oeffektiva.
- Höga returtemperaturer förekommer när kyllasten utgör en väsentlig del av hela fjärrvärmelasten. Fjärrvärmesystemet är normalt dimensionerat för vinterns värmebehov med höga framledningstemperaturer och stor avkylning. Sommarens drifttemperatur och avkylning är väsentligt lägre. Dessutom måste sommarens värmebehov (varmvatten och värmeförluster) också kunna distribueras. Detta innebär att den maximala kyleffekten från en AKM i

fjärrvärmesystem är endast 6-7 % av den nominella designeffekten för värme i samma FV-system.

- Så länge kyleffekten endast utgör en bråkdel av ovannämnda gränslast, dvs 1-2 % av värmeeffekten, finns det inget större problem med returtemperaturen. Därmed inte sagt att problemet med returtemperaturen kan försummas.
- I Tyskland har man sedan 1990-talet arbetat målmedvetet med alternativa utvecklingslinjer för AKM. Det mest intressanta alternativet ensteg – dubbellyft AKM togs fram av ZAE Garching (Bayeriska Centrum för tillämpad Energiforskning) och är i testdrift sedan flera år. Det handlar om demonstrationsanläggningar som tillämpar AKM-alternativet ensteg – dubbellyft i kombination. Medan en SE-AKM i praktiken kan uppnå en kylfaktor (COP) på 0,7 – 0,8, så är COPn för den rena DL-AKM endast 0,4. En SE-DL-AKM kan dock köras enligt båda driftsätten parallellt, vilket innebär att deras COP i praktiken ligger mellan 0,6 och 0,7. Dubbellyftprincipen innebär att det finns ett generatorsteg till i AKM på mellantrycknivå mellan högtrycksgeneratoren och kondensorn, vilket medger att fjärrvärmevatten kan utnyttjas vid lägre temperatur och med bättre avkylning. Fjärrvärmens framtemperatur kan därför sänkas vid fullast till 90°C och vid dellast till 80°C. Returtemperaturen kan då bli så lågt som 60°C (fullast) resp 50°C (dellast).
- I Tyskland har man också uppmärksammat att värmeväxlarna utgör en flaskhals beträffande temperaturnivån, och då särskilt generatorns temperatur-differens mellan fjärrvärmemediet och absorbenten. Ny värmeväxlardesign med låga temperaturdifferenser på den kalla sidan tillåter lägre fjärrvärmetemperaturer. Nya regleringstekniker med massflödes- och/eller temperaturreglering möjliggör dessutom drift på lägre temperaturnivåer vid dellast. Vid dellast på 50 % kapacitet kan således temperaturer omkring 83°C (fram) respektive 65°C (retur) uppnås. En AKM med avancerad värmeväxlardesign med sprayed fallfilm används nu också i Västerås och kan då uppnå returtemperaturer så låga som 50°C i dellast.
- I vår studie genomfördes också en modelleringsanalys för att beräkna hur olika kopplingssätt av AKM kan påverka nivån på returtemperaturen. Studien baseras på avancerade designberäkningar som har genomförts i Tyskland [20]. I våra beräkningar har vi utgått ifrån att en normal AKM är dimensionerad för 90/80°C i fullast. Vidare har vi antagit att AKM-systemet kan leverera hela kyllastbehovet. Detta innebär att AKM körs största delen av sin drifttid i dellast. Vilket i sin tur innebär att såväl den genomsnittliga FV-framtemperaturen som den resulterande genomsnittliga FV-returtemperaturen är lägre än kylmaskinernas designtemperaturer.
- I studien undersöktes olika inkopplingssätt av AKM. Vanliga sätt att koppla AKM till fjärrvärme är mellan fram- och returledning (fram/retur = supply/return - SR). AKM-returtemperaturen blandas då med returtemperaturen från värmelasten. Ett annat sätt är seriekopplingen (fram/fram = supply/supply - SS). I detta fall kan AKM:ens höga returtemperatur utnyttjas för att leverera konventionell värme vid, för FV-nätet, normal sommartemperaturer. AKM effekten är dock beroende av värmesystemets effekt eftersom de använder samma flöde. En by-pass kan frikoppla de båda systemen, men då på bekostnad av igen höga returtemperaturer. Andra kopplingssätt är kombinationer av dessa båda typer.

- När AKM returen blandas med returen från fjärrvärmecentralerna kan relativt låga medeltemperaturer uppnås för det totala returflödet. I fallet SR-koppling blir denna temperatur i **juli** 60,2°C. Den lägsta returtemperaturen går att åstadkomma då två AKM kopplas samman enligt principerna SR-SS eller SS-SR. I dessa fall är det möjligt att åstadkomma returtemperaturer på 55,6°C med enbart SE-AKM och 53,3°C med SE-DL AKM i fjärrvärmenätet. I fallet med tre AKM, SR1-SS-SR (med två lastnoder), fås en sänkning av returtemperaturen till 54,9°C för SE-AKM.
- Huvudslutsatsen är att returtemperaturen är hög endast i designfallet. Om en AKM körs, som brukligt, i första hand som baslastmaskin, innebär detta att man måste räkna med höga returtemperaturer. Om AKM dimensioneras för att täcka hela kylbehovet blir den genomsnittliga returtemperaturen i juli väsentligt lägre, i grova drag 10 - 12 °C lägre än i baslastfallet.
- Returtemperaturen blir ännu lägre med SE-DL-AKM än med konventionella SE-AKM, och den skiljer sig inte nämnvärt från den normal fjärrvärmereturtemperaturen. En SE-DL-AKM innebär dessutom att man i samma fjärrvärmenät enligt vårt exempel kan alstra 80 % mer fjärrkyla än med en SE-AKM.
- För att kunna ge en mer fullständig bild av SE-DLs användning och av den optimala framledningstemperatur för såväl SE som SE-DL bör en systemoptimering genomföras. Där bör produktionen av värme, elkraft (vid kraftvärme) och kyla samoptimeras. Problemet med låga returtemperaturer är nämligen i första hand en fråga om en totaloptimering. AKM med avancerad värmeväxlardesign eller i SE-DL-utförande kostar mera. Dessutom är det troligt att baslastdriften för att AKM är ekonomiskt att föredra topplastdriften. Det behövs alltså en optimering avseende extra investeringskostnader för lägre temperaturnivå (pga värmeväxlare resp dubbellyft) kontra högre driftkostnader för den högre temperaturnivån (mindre produktion av värme och el, ökade värmeförluster). Svaret på detta kan dock inte ges i denna studie.

Driften av den anläggning som installerades i Västerås med låga framlednings- och returtemperaturer borde vara intressant att följas upp i ett utvärderingsprojekt.

9. Referenser

- [1] ASHRAE Refrigeration handbook. American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers. 2002.
- [2] Karlsson, B., G., Sjödin, J., and Carlson, A., LiU. System perspectives on bioenergy, external effects and power utilisation in Europe. Woody Biomass as an Energy Source - Challenges in Europe, European Forest Institute, Joensuu, Finland, 25-28 September, 2000.
- [3] Werner, S. 2001: Rewarding energy efficiency: The perspective of emissions trading, Euroheat&Power Congress Gdansk/Gdynia, 7-8 June 2001.
- [4] Marginal elproduktion och CO₂ – utsläpp i Sverige. Statens Energimyndighet. ER 14:2002.
- [5] Dahm, J., Eriksson, L. and Zinko, H., ZW Energitechnik AB. Användning av Lågtemperatur-Fjärrvärme. FVF-FoU 1999:39.
- [6] Framtemperatur vid värmegles fjärrvärme. Fjärrvärmeföreningen FoU 2002:65.
- [7] Grosa, N. Fernwärme-Kälte-kopplung pilotprojket: Eissportkomplex Weißwasser. In Referens [8].
- [8] Statusbericht 97. Rationelle Energieanwendung – Fernwärme. Forschungszentrum Jülich. BEO33, 1997.
- [9] Schweigler, C., Demmel, S., Hellman, H.-M., Ziegler, F. Kälte aus Fernwärme. Betriebsergebnisse mit dem SE/DL-Absorptionskaltwassersatz. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV). Kälte-Klimat-Tagung. Nov 1997. Hamburg.
- [10] Schweigler, C., Demmel, S. Entwicklung von Absorptionskältemaschinen für den Einsatz in Fernwärmenetzen. In referens [8].
- [11] Schönberg, I., Noeres, P., Althaus, W. Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärmekältekopplung. In referens [8].
- [12] Schweigler, C., Flamensbeck, M., Demmel, S. Optimierte Kraft-Wärme-Kälte Kopplung Flughafen München. KI Luft- und Kältetechnik 3/1999.
- [13] Demmel, D. Energieversorgung für den Flughafen München. Power management (1997) 3, s. 8-11.
- [14] Heizen, Kühlen Klimatisieren.. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch. Fachtagung Berlin, Juni 2003.
- [15] Von Platen, B. C., Munters, C. G Verfahren zu Kälteerzeugung nach dem Absorptions-Diffusions Prinzip. Tyskt Patent Nr. DE 410 715 (1925).
- [16] Eickert, U. Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlverfahren. Symposium -“Solares Kühlen in der Praxis“. Stuttgart 2002.

- [17] Ammoniak Absorptionskälteanlagen, Technical Brochure, Deutsche Babcock Borsig AG, 1996.
- [18] Kivistö, M., et al. District Cooling balancing, balancing the production and demand in CHP. IEA DH&C Task VI. NOVEM, 1999:T2. ISBN 90-5748-0009-3.
- [19] Development of Heating/ Cooling Technolgy for Load Leveling by Advanced Utilisation of Unused Energy. R&D results. Heat Pump technology Center of Japan, Nedo, 1966.
- [20] Noeres, P. Untersuchung einstufiger Wasser-LiBr Absorptionskältemaschinen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. UMSICHT-Schriftenreihe Band 46, Fraunhofer IRB Verlag. 2003. ISBN-3-8167-6400-2.
- [21] Keith E., Herold, Radermacher R., Sanford A. Klein. Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, USA, 1996.
- [22] Schweigler, Ch., et al., ZAE Bayern. Kälteerzeugung für Klimatisierung mittels Fernwärme. Machbarkeitsstudie im Auftrag der Energieversorgung Oberhausen. Garching 1994.
- [23] IEA DH&C Task VII: Improvement of operational temperature differences in district heating systems, Internal communication, 2004.
- [24] Mundlig uppgift av Erik Holmén, Mälardalen Energi (2004).
- [25] Schweigler, C., Riesch, P. Alefeld G. Using District Heating Networks for Air Conditioning. 19th Int. Congress of Refrigeration, Aug. 1995, The Hague.
- [26] York International: "Absorptionskühler Typ ES, Bauart M, Richtwerte für Auslegung". GLZ 6434 H222, 2/1992.
- [27] Solarfrost Product Development. www.solarfrost.com.
- [28] Eicker, U. Solares Kühlen. Einführung in die Technologie. HfT Stuttgart, Band 53 – Erstes Symposium „Solares Kühlen in der Praxis“. Stuttgart 2001.
- [29] WeirTechna (Weir Entropie). Absorption Chillers and Heat Pumps. WeirTechna informationsbrochure 01/2002.
- [30] Rydstrand, M. Martin V., Westermarck, M. Värmedriven kyla. Svensk översatt bilaga till Lic avhandling Energiprocesser, KTH. Rapport Svensk Fjärrvärme FoU 2004:112.
- [31] Korean District Heating Corporation. Internt meddelande. (2004).

Rapportförteckning

Samtliga rapporter kan beställas hos Svensk Fjärrvärmes Förlagsservice.

Telefon: 026 – 24 90 24, Telefax: 026 – 24 90 10, www.fjarrrvarme.org

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
FORSKNING OCH UTVECKLING – RAPPORTER			
1	Inventering av skador på befintliga skarvar med CFC-blåsta respektive CFC-fria fogskum	Hans Torstensson	maj-96
2	Tryckväxlare – Status hösten 1995	Bror-Arne Gustafson Lena Olsson	maj-96
3	Bevakning av internationell fjärrvärmeforskning	Sture Andersson Gunnar Nilsson	maj-96
4	Epoxirelining av fjärrvärmerör	Jarl Nilsson	sep-96
5	Effektivisering av konventionella fjärrvärmecentraler (abonnentcentraler)	Lena Råberger Håkan Walletun	okt-96
6	Auktorisation av montörer för montage av skarvhylsor och isolering Former och utvärdering	Lars-Åke Cronholm	okt-96
7	Direkt markförlagda böjar i fjärrvärmeledningar	Jan Molin Gunnar Bergström	dec-96
8	Medierör av plast i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun Heimo Zinko	dec-96
9	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisolering av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	dec-96
10	Dynamiska värmelaster från fiktiva värmebehov	Sven Werner	mars-97
11	Torkning av tvätt i fastighetstvättstugor med fjärrvärme	H. Andersson J. Ahlgren	maj-99
12	Omgivningsförhållandenas betydelse vid val av strategi för ombyggnad och underhåll av fjärrvärmenät. Insamlingsfasen	Sture Andersson Jan Molin Carmen Pletikos	dec-97
13	Svensk statlig fjärrvärmeforskning 1981-1996	Mikael Henriksson Sven Werner	dec-97
14	Korrosionsrisker vid användning av stål- och plaströr i fjärrvärmesystem – en litteraturstudie	Peeter Tarkpea	dec-97
15	Värme- och masstransport i mantelrör till ledningar för fjärrkyla och fjärrvärme	Daniel Eriksson Bengt Sundén	dec-97
16	Utvärdering av fuktinträngning och gasdiffusion hos gamla kulvertrör ”Hisings-Backa”	Ulf Jarfelt	dec-97
17	Kulvertförläggning med befintliga massor	Jan Molin Gunnar Bergström Stefan Nilsson	dec-97
18	Värmeåtervinning och produktion av frikyla – två sätt att öka marknaden för fjärrvärmedrivna absorptionskylmaskiner	Peter Margen	dec-97
19	Projekt och Resultat 1994-1997	Anders Tvärne	mars-98

Nr	Titel	Författare	Publicerad
20	Analys av befintliga fjärrkylakunders kylbehov	Stefan Aronsson Per-Erik Nilsson	mars-98
21	Statusrapport Trycklösa Hetvattenackumulatorer	Mats Lindberg Leif Breitholtz	maj-98
22	Round Robin test av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ulf Jarfelt	maj-98
23	Mätvärdesinsamling från inspektionsbrunnar i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun	juni-98
24	Fjärrvärmerörens isolertekniska långtidsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs	juni-98
25	Termisk undersökning av koppling av köldbärarkretsar till fjärrkylanät	Erik Jonson	juni-98
26	Reparation utan uppgrävning av skarvar på fjärrvärmerör	Jarl Nilsson Tommy Gudmundson	juni-98
27	Effektivisering av fjärrvärmecentraler – metodik, nyckeltal och användning av driftövervakningssystem	Håkan Walletun	apr-99
28	Fjärrkyla. Teknik och kunskapsläge 1998	Paul Westin	juli-98
29	Fjärrkyla – systemstudie	Martin Forsén Per-Åke Franck Mari Gustafsson Per-Erik Nilsson	juli-98
30	Nya material för fjärrvärmerör. Förstudie/litteraturstudie	Jan Ahlgren Linda Berlin Morgan Fröling Magdalena Svanström	dec-98
31	Optimalt val av värmemätarens flödesgivare	Janusz Wollerstrand	maj-99
32	Miljöanpassning/återanvändning av polyuretanisolerade fjärrvärmerör	Morgan Fröling	dec-98
33	Övervakning av fjärrvärmenät med fiberoptik	Marja Englund	maj-99
34	Undersökning av golvvärmesystem med PEX-rör	Lars Ehrlén	apr-99
35	Undersökning av funktionen hos tillsatser för fjärrvärmevatten	Tuija Kaunisto Leena Carpén	maj-99
36	Kartläggning av utvecklingsläget för ultraljudsflödesmätare	Jerker Delsing	nov-99
37	Förbättring av fjärrvärmecentraler med sekundärnät	Lennart Eriksson Håkan Walletun	maj-99
38	Ändgavlar på fjärrvärmerör	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	sept-99
39	Användning av lågtemperaturfjärrvärme	Lennart Eriksson Jochen Dahm Heimo Zinko	sept-99
40	Tätning av skarvar i fjärrvärmerör med hjälp av material som sväller i kontakt med vatten	Rolf Sjöblom Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm	nov-99
41	Underlag för riskbedömning och val av strategi för underhåll och förnyelse av fjärrvärmeledningar	Sture Andersson Jan Molin	dec-99

Nr	Titel	Författare	Publicerad
		Carmen Pletikos	
42	Metoder att nå lägre returtemperatur med värmeväxlardimensionering och injusteringsmetoder. Tillämpning på två fastigheter i Borås.	Stefan Petersson	mars-00
43	Vidhäftning mellan PUR-isolering och medierör. Har blåstring av medieröret någon effekt?	Ulf Jarfelt	juni-00
44	Mindre lokala produktionscentraler för kyla med optimal värmeåtervinningsgrad i fjärrvärmesystemen	Peter Margen	juni-00
45	Fullskaleförsök med friktionsminskande additiv i Herning, Danmark	Flemming Hammer Martin Hellsten	feb-01
46	Nedbrytningen av syrereducerande medel i fjärrvärmenät	Henrik Bjurström	okt-00
47	Energimarknad i förändring Utveckling, aktörer och strategier	Fredrik Lagergren	nov-00
48	Strömförsörjning till värmemätare	Henrik Bjurström	nov-00
49	Tensider i fjärrkylennät – Förstudie	Marcus Lager	nov-00
50	Svensk sammanfattning av AGFWs slutrapport ”Neuartige Wärmeverteilung”	Heimo Zinko	jan-01
51	Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	jan-01
52	Direktförlagda böjar i fjärrvärmeledningar Påkänningar och skadegränser	Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström Stefan Nilsson	jan-01
53	Korrosionsmätningar i PEX-system i Landskrona och Enköping	Anders Thorén	feb-01
54	Sammanlagring och värmeförluster i närvärmenät	Jochen Dahm Jan-Olof Dalenbäck	feb-01
55	Tryckväxlare för fjärrkyla	Lars Eliasson	mars-01
56	Beslutsunderlag i svenska energiföretag	Peter Svahn	sept-01
57	Skarvtätning baserad på svällande material	Henrik Bjurström Pal Kalbantner Lars-Åke Cronholm	okt-01
58	Täthet hos skarvar vid återfyllning med befintliga massor	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	okt-01
59	Analys av trerörssystem för kombinerad distribution av fjärrvärme och fjärrkyla	Guaxiao Yao	dec-01
60	Miljöbelastning från läggning av fjärrvärmerör	Morgan Fröling Magdalena Svanström	jan-02
61	Korrosionsskydd av en trycklös varmvattenackumulator med kvävgasteknik – fjärrvärmeverket i Falkenberg	Leif Nilsson	jan-02
62	Tappvarmvattenreglering i P-märkta fjärrvärmecentraler för villor – Utvärdering och förslag till förbättring	Tommy Persson	jan-02
63	Experimentell undersökning av böjar vid kallförläggning av fjärrvärmerör	Sture Andersson Nils Olsson	jan-02

Nr	Titel	Författare	Publicerad
64	Förändring av fjärrvärmenäts flödesbehov	Håkan Walletun Daniel Lundh	jan-02
65	Framtemperatur vid värmegles fjärrvärme	Tord Sivertsson Sven Werner	mars-02
66	Fjärravläsning med signaler genom rörnät – förstudie	Lars Ljung Rolf Sjöblom	mars-02
67	Fukttransport i skarvskum	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	april-02
68	Round Robin test II av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ture Nordenswan	april-02
69	EkoDim – beräkningsprogram	Ulf Jarfelt	juni-02
70	Felidentifiering i FC med ”flygfoton” – Förstudie	Patrik Selinder Håkan Walletun	juni-02
71	Digitala läckdetekteringssystem	Jan Andersson	aug-02
72	Utvändigt skydd hos fjärrvärmerörsskarvar	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	sept-02
73	Fuktdiffusion i plaströrsystem	Heimo Zinko Gunnar Bergström Stefan Nilsson Ulf Jarfelt	sept-02
74	Nuläge värmegles fjärrvärme	Lennart Larsson Sofie Andersson Sven Werner	sept-02
75	Tappvarmvattensystem – egenskaper, dimensionering och komfort	Janusz Wollerstrand	sept-02
76	Teknisk och ekonomisk jämförelse mellan 1- och 2-stegskopplade fjärrvärmecentraler	Håkan Walletun	okt-02
77	Isocyanatexponering vid svetsning av fjärrvärmerör	Gunnar Bergström Lisa Lindqvist Stefan Nilsson	okt-02
78	Förbättringspotential i sekundärnät	Lennart Eriksson Stefan Petersson Håkan Walletun	okt-02
79	Jämförelse mellan dubbel- och enkelrör	Ulf Jarfelt	dec-02
80	Utvändig korrosion på fjärrvärmerör	Göran Sund	dec-02
81	Varmvattenkomfort sommartid i småhus	Tommy Persson	dec-02
82	Miljöbelastning från produktion av fjärrvärmerör	Morgan Fröling Camilla Holmgren	dec-02
83	Samverkande produktions- och distributionsmodeller	John Johnsson Ola Rossing	feb-03
84	Användning av aska vid förläggning av fjärrvärmeledningar - förstudie	Rolf Sjöblom	feb-03
85	Marginaler i fjärrvärmesystem	Patrik Selinder Heimo Zinko	mars-03
86	Flödesutjämning körstrategi	Gunnar Larsson	april-03
87	”Black-Box”-undersökning av fjärrvärmecentraler	Håkan Walletun Bernt Svensson	juni-03
88	Långtidsegenskaper hos lågflödesinjusterade radiatorsystem	Stefan Petersson Sven Werner	aug-03

Nr	Titel	Författare	Publicerad
89	Rationellt byggande av fjärrvärmeledningar	Tommy Gudmundson	sep-03
90	Total – Kontra utförandeentreprenad	Tommy Gudmundson	sep-03
91	Tryckväxlare för fjärrkyla – Teknik och funktion	Bror-Arne Gustafson	sep-03
92	Kylning av kylmaskiners kondensorer med fjärrkyla i livsmedelsbutiker	Caroline Haglund Stignor	sep-03
93	Minskade distributionsförluster med diffusionstäta fjärrvärmerör	Maria Olsson	okt-03
94	Kopplingsprinciper för fjärrvärmecentral och frånluftsvärmepump	Patrik Selinder Håkan Walletun Heimo Zinko	okt-03
95	Funktion hos 1-rörs radiatorsystem – Avkylning, komfort och stabilitet	Stefan Petersson Bernt-Erik Nyberg	okt-03
96	EPSPEX-kulvert – Utveckling, utförande och uppföljning	Tommy Gudmundson	okt-03
97	EPSPEX-kulvert – Funktion under och efter vattendränkning	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	okt-03
98	Fukt i fjärrvärmerör, larmsystem och detektering Inventering av mätmetoder och gränsvärden	Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm Mats-Olov Edström	okt-03
99	Undersökning av skarvar med isolerhalvor efter nio år i drift	Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg Gunnar Bergström	nov-03
100	Strategier för framtidens fjärrvärme	Markus Felleesson	dec-03
101	Fjärrvärmevärmda torkrumsanläggningar	Peter Neikell Tobias Nilsson	nov-03
102	Kyllager i befintligt kylnät	Fredrik Setterwall Benny Andersen	nov-03
103	Reglerdynamik, tryckhållning och tryckslag i stora rörsystem	Gunnar Larsson	dec-03
104	Energimätning i småhus. Förstudie.	Jan Eliason Morgan Romvall Håkan Walletun	dec-03
105	Konsekvenser av mindre styrventiler i distributionsnät	Håkan Lindkvist Håkan Walletun	jan-04
106	Inventering av nya inspektionsinstrument för statuskontroll av fjärrvärmerör	Göran Sund	jan-04
107	Kopplingar i fjärrvärmesystem – inventering av alternativ och utvecklingspotential	Rolf Sjöblom Jöns Hilborn	feb-04
108	Gratid för kyla	Peter Lundell	april-04
109	Effektivare rundgångar	Håkan Walletun Karolina Näsholm	april-04
110	Mikrobiell aktivitet i fjärrkylennät	Magnus Nordling	april-04
111	Effektivare distribution av fjärrkyla	Olle Källman Per Hindersson Börje Nord	maj-04
112	Värmedriven kyla	Magnus Rydstrand Viktoria Martin Mats Westermark	maj-04

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
113	Markradar fältförsök	Emelie Vestin Peter Wilén	juni-04
114	EcoTrench läggning av fjärrvärmerör	Alf Lindmark	juni-04
115	Tappvarmvattenanvändning på hotell	Stefan Petersson Sven Werner Martin Sandberg Åsa Wahlström	juni-04
116	PET-skum som isoleringsmaterial i fjärrvärmerör	Sara Mangs Olle Ramnäs Ulf Jarfelt	sept-04
117	Flexibla fjärrvärmerörs isoleringsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs Camilla Persson Charlotte Claesson	okt-04
118	Injustering av vvc-kretsar	Janusz Wollerstrand Tommy Persson	okt-04
119	Integration av absorptionskylmaskiner i fjärrvärmesystem - Förstudie	Heimo Zinko Sven-Olof Söderberg Elsa Fahlén Alemayehu Gebremedhin	dec-04

FORSKNING OCH UTVECKLING – ORIENTERING

1	Fjärrkyla: Behov av forskning och utveckling	Sven Werner	jan-98
2	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för perioden 23/5 – 30/9 1996.	Lars Lindgren Conny Nikolaisen	jan-98
3	Symposium om Fjärrvärmeforskning på Ullinge Wårdshus i Eksjö kommun, 10-11 december 1996	Lennart Thörnqvist	jan-98
4	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för period 2. 1/1 – 31/12 1997.	Conny Nikolaisen	juli-98
5	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisolering av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	sept-99
6	Optimering av fjärrvärmevattens framledningstemperatur i mindre fjärrvärmesystem	Ilkka Keppo Pekka Ahtila	jan-03
7	Sammanställning över fjärrvärme- och kraftvärmeprojekt med eu-stöd	Sofie Andersson Sven Werner	feb-04
8	Utvärdering av FOU-programmet Hetvattenteknik 2001-2003	John Johnsson Håkan Sköldberg	feb-04
9	Nytta med svensk fjärrvärmeforskning	Sven Werner	feb-04

*Svensk Fjärrvärme AB och Statens energimyndighet bedriver
forskningsprogram inom området fjärrvärme, hetvattenteknik och fjärrkyla.*



Svensk Fjärrvärme • 101 53 Stockholm • Telefon 08-677 25 50 • Fax 08-677 25 55
Besöksadress: Olof Palmes gata 31, 6 tr. • E-post kontakt@fjarrvarme.org • www.fjarrvarme.org