ISKUSTVA SA TOPLOTNIM PUMPAMA I ČILERIMA U DALJINSKOM GREJANJU I DALJINSKOM HLAĐENJU U ŠVEDSKOJ

EXPERIENCES FROM HEAT PUMPS AND CHILLERS IN DITRICT HEATING AND DISTRICT COOLING IN SWEDEN

Hakan Landberg, dipl. inž.,
„Göteborg Energy International AB", Geteborg, Švedska

Toplotne pumpe imaju važnu ulogu kao osnovno opterećenje u proizvodnji toplotne energije u mnogim mrežama daljinskog grejanja od početka 1980-tih. Otprilike 10 godina kasnije, započeta je njihova primena i u hlađenju. Od tada postoji sve veće interesovanje za daljinsko hlađenje. Danas imamo višegodišnje iskustvo u korišćenju različitih kombinacija toplotnih pumpi i rashladnih uređaja, uključujući apsorpcione rashladne uređaje koje pokreće voda iz daljinskog grejanja. U ovom radu će biti opisan jedan broj alternativa, kao i neki primeri iz iskustva u radu u Švedskoj.

Heat pumps have had an important role as base load heat production in many district heating networks since early 1980s. Approximately 10 years later, the first steps were taken in using them also for cooling. Since then, there has been an increasing interest for district cooling. Today, we have several years of experience with using different combinations of heat pumps and chillers, including absorption chillers driven by district heating water. This paper will describe a number of alternatives, when they are suitable and some examples with operating experience from Sweden.

Ključne reči: daljinsko grejanje u Švedskoj; daljinsko hlađenje; toplotne pumpe.
Key words: Swedish district heating; district cooling; heat pumps

1. Uvođenje toplotnih pumpi u mreže daljinskog grejanja u Švedskoj

1.1. Istorijat

Cena električne energije u Švedskoj je tradicionalno niska. Danas oko 50% električne energije proizvode hidroelektrane, a 50% nuklearne elektrane. Donedavno nije bilo nestašica električne energije.

Mreže daljinskog grejanja su počele da se pojavljuju krajem 1940-tih. Tokom 1950-tih i 1960-tih izgrađivane su u velikom broju, a kasnije su kontinualno osavre-

menjivane i proširivane. Tokom 1970-tih nuklearna energija je u velikim kapacitetima uvedena u proizvodnju električne energije.

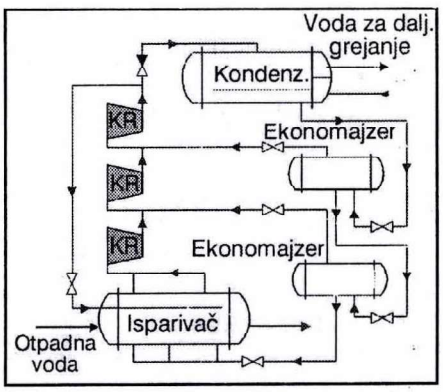
Mreže daljinskog grejanja u Švedskoj rade 24 časa dnevno tokom cele godine. Period od sredine septembra do sredine maja može se uporediti sa grejnom sezonom u Jugoslaviji. Leti se glavno snabdevanje toplotnom energijom koristi za toplu vodu u domaćinstvima, ali je svim potrošačima grejanja omogućeno da koriste daljinsko grejanje kad god im je to potrebno.

Naftna kriza, koja se tokom 1970-tih javljala više puta uz visoke cene i povremenu nestašicu goriva, pobudila je interesovanje za smanjenje zavisnosti grejanja od fosilnog goriva. Jedno rešenje predstavljalo je korišćenje toplotnih pumpi koje pokreću električni motori. U Švedskoj je ukupno ugrađeno nešto više od stotinu velikih toplotnih pumpi (sa snagom od preko 1 MW i turbo-kompresorima). Većina tih pumpi je ugrađena u mreže daljinskog grejanja u periodu od 1980. do 1986. godine. Standardni kapacitet iznosi 10–15 MW toplote.

1.2. Proces toplotne pumpe

U toplotnoj pumpi se koristi niskotemperaturska energija. Dodavanjem mehaničkog rada (kompresori) ili toplote (proces apsorpcije), energija niske temperature se prenosi na višu temperaturu. Toplotne pumpe sa kompresorima koje pokreću električni motori predstavljaju najčešći tip toplotnih pumpi koji se koristi u Švedskoj. Pri primeni toplotne snage od nekoliko MW, koriste se klipni i vijčani kompresori. Rashladno sredstvo se koristi kao radni medijum u toplotnim pumpama. Za neke starije toplotne pumpe i dalje se koristi freon R22, dok nove toplotne pumpe i one za koje se prvobitno koristio hlorofluorougljenik (kao što je R12), rade sa rashladnim sredstvom R13a.

Princip najveće ugrađene toplotne pumpe prikazan je na slici 1. Glavni princip u mehaničkoj toplotnoj pumpi je korišćenje toplote isparavanja i kondenzacije kao i činjenica da se fazni transfer odvija na različitim stepenima temperature u zavisnosti od pritiska: viši pritisak – viša temperatura. Isparivač radi pod niskim pritiskom i tu, zbog toplote u otpadnoj vodi, isparava rashladno sredstvo. Kompresijom se pritisak podiže na stepen na kojem se rashladno sredstvo kondenzuje na cevima koje rashlađuje voda iz daljinskog grejanja.



Slika 1. Princip velike toplotne pumpe sa trostepenim turbo-kompresorom

Maksimalna temperatura iz toplotnih pumpi iznosi samo 80–85°C. Zbog toga mreža daljinskog grejanja često zahteva dodatno grejanje vode. To se obično postiže postavljanjem toplotnih pumpi u niz sa ostalim toplotnim izvorima.

Stepen korisnog dejstva proizvodnje toplote u toplotnim pumpama izražava se kao COP (koeficijent grejanja). Teoretski i stvarno:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_c}{T_C - T_E}$$

$$COP = \frac{P_{heat}}{P_{el}}$$

gde su:

T_C – temperatura kondenzacije (na strani rashladnog sredstva), u kelvinima (obično 1,5–3°C iznad vode koja odlazi iz daljinskog grejanja),

T_E – temperatura isparavanja (na strani rashladnog sredstva), u kelvinima (obično 2–4°C ispod vode koja odlazi iz daljinskog grejanja),

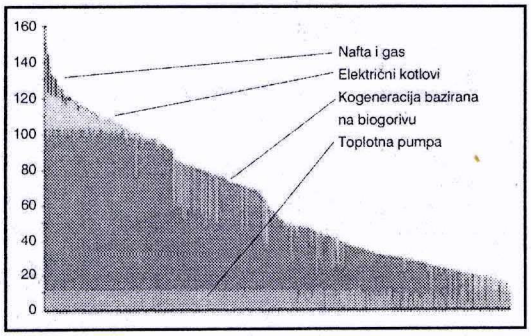
P_{heat} – proizvedena toplota vode iz daljinskog grejanja, u MW,

P_{el} – potrošena električna energija u električnom motoru, u MW.

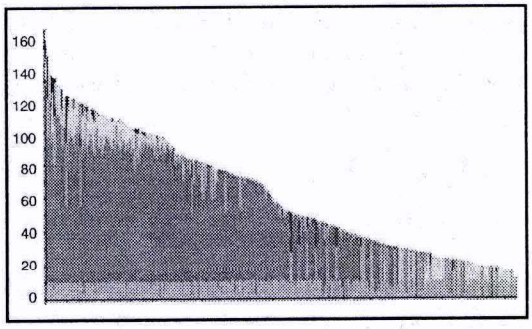
Stepen korisnog dejstva se zatim može izračunati kao odnos između teoretskog i stvarnog koeficijenta grejanja. Uobičajene vrednosti za toplotne pumpe sa turbo-kompresorima iznose otprilike 65% za dvostepene i otprilike 70% za trostepene kompresore.

1.3. Toplotne pumpe u sistemu proizvodnje toplote

U mnogim gradovima toplotne pumpe se koriste kao „osnovno opterećenje", jer je grejanje pomoću njih najjeftinije. Tipičan primer jednog sistema daljinskog grejanja srednje veličine prikazan je na slikama 2 i 3. Povezano opterećenje iznosi otprilike 200 MW i maksimalna dnevna prosečna proizvodnja toplote tokom godine iznosi 160 MW.



Slika 2. Dijagram trajanja za jednu godinu (365 dana); optimalna kombinacija proizvodnje. Proizvodnja toplote u MW



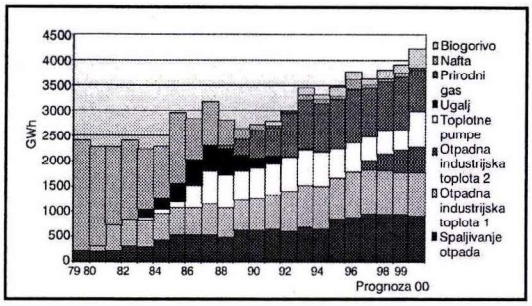
Slika 3. Dijagram trajanja (365 dana); stvarni istorijski podaci. Proizvodnja toplote u MW

Slike 2 i 3 takođe ilustruju razliku između planiranog i stvarnog korišćenja različitih toplotnih izvora. Kod toplotne pumpe su zabeleženi proizvodnja toplote koja je manja od očekivane tokom hladnih dana i nekoliko neplaniranih prekida. To je prilično uobičajeno za toplotne pumpe, a deo objašnjenja leži u tome da će toplotna pumpa smanjiti opterećenje i ponekad prestati da radi zbog nedovoljnog dovoda otpadne vode (u ovom slučaju gradske kanalizacione vode).

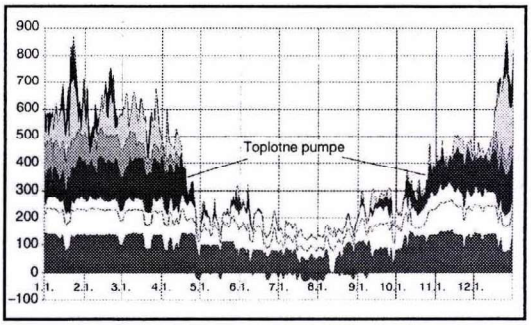
2. Toplotne pumpe u Geteborgu

2.1. Uvođenje toplotnih pumpi u Geteborgu

Prva toplotna pumpa stigla je u sistem daljinskog grejanja u Geteborgu u jesen 1982. godine, a puštena je u komercijalni pogon 1983. godine. Ta pumpa je imala toplotni kapacitet od 27 WM. Sledeće godine postav-



Slika 4. Sistem daljinskog grejanja u Geteborgu. Razvoj proizvodnje toplote po gorivu/izvorima toplote u poslednjih 20 godina. Godišnja proizvodnja toplote u GWh



Slika 5. Sistem daljinskog grejanja u Geteborgu. Prosečne vrednosti po času tokom 2000. godine ilustruju sadašnju ulogu toplotnih pumpi u kombinaciji proizvodnje toplote. Proizvodnja toplote u MW

ljena je još jedna mašina kapaciteta 29 MW. Godine 1985. postavljene su dve veće toplotne pumpe koje su obezbeđivale ukupan toplotni kapacitet oko 165 MW.

Za rad toplotnih pumpi kao radni medijum je korišćeno rashladno sredstvo R12.

To sredstvo je zamenjeno drugim, R134a, u periodu 1994–1997, u skladu sa međunarodnim protokolima za postepenu zamenu supstanci koje oštećuju ozon.

Toplotne pumpe su zamenjene i neki od kompresora su rekonstruisani, kako bi se prilagodili novim radnim medijumima.

2.2. Sadašnja primena toplotnih pumpi u Geteborgu

Toplotne pumpe u Geteborgu se ne koriste za osnovno opterećenje, kao što je naznačeno na slici 4 i prikazano na slici 5. Prevashodno se koristi toplota od spaljivanja otpada i iz rafinerija, jer oni predstavljaju najjeftiniji izvor toplote. Zbog toga se toplotne pumpe ne koriste tokom leta, kao ni tokom toplih prolećnih i jesenjih dana, i obično ne rade duže od 6.000 sati godišnje.

Korišćenje (prosečna proizvodnja toplote po instalisanom kapacitetu) u periodu rada iznosi otprilike 60%. Jedna polovina smanjenja može se pripisati smanjenju u potražnji toplote, a druga polovina smanjenja nedovoljnom dovodu otpadne toplote iz kanalizacione vode.

3. Daljinsko hlađenje

3.1. Istorijat

U Švedskoj je uobičajeno hlađenje pomoću lokalnih čilera. U vezi sa zamenom rashladnih sredstava koja oštećuju ozon, poput hlorofluorougljenika, mnogi vlasnici su morali da zamene ove čilere. U takvoj situaciji, operateri daljinskog grejanja ponudili su alternativu daljinskog hlađenja. Ona je sprovedena u skladu sa četiri različita principa koji su objašnjeni u tekstu koji sledi.

3.2. Hlađenje pomoću toplotnih pumpi

Toplotne pumpe snižavaju temperaturu vode u isparivaču. Smanjenjem i regulisanjem protoka vode, može se dobiti dovoljno niska temperatura za hlađenje. Voda često takođe delimično cirkuliše. Hladna voda iz toplotne pumpe se zatim koristi za hlađenje vode daljinskog hlađenja u razmenjivaču toplote. Ovaj princip se često koristi kada istovremeno postoji potreba i za grejanjem i za hlađenjem. To je priličan porast visoke temperature za toplotnu pumpu te stoga nije osobito efikasan. Koeficijent grejanja je relativno nizak, kako za grejanje, tako i za hlađenje, ali s obzirom da su istovremeno postignuta oba cilja (kogeneracija, tj. istovremena proizvodnja toplotne i rashladne energije), ukupna ekonomičnost je prilično zadovoljavajuća. Takođe su i dodatni troškovi za postavljanje hlađenja u postojećim toplotnim pumpama vrlo niski.

Akumulator hlađenja se često koristi u vezi sa ovom vrstom proizvodnje. Kako je potreba za hlađenjem tokom dana velika, a potreba za grejanjem velika tokom noći i rano ujutro, kogeneracija (istovremena proizvodnja) nije vremenski regulisana. Akumuliranjem hladne vode, a ponekad i toplote, može se postići izjednačenje.

Međutim, potreba za toplotom je isuviše mala tokom produženih i zaista toplih perioda. Takođe, postoji potreba za rezervnom proizvodnjom hlađenja. U ovu svrhu se često postavljaju manji rashladni uređaji, i kada se hlade otpadnom vodom mogu da rade sa vrlo visokim koeficijentom grejanja.

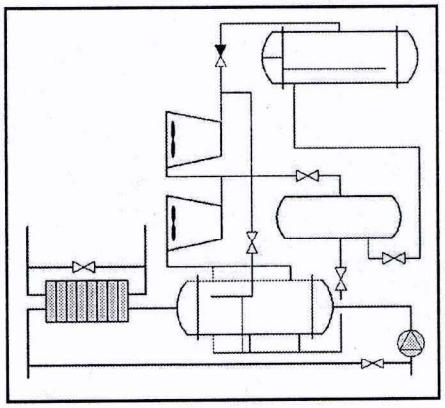
3.3. Hlađenje rashladnim uređajima koji se hlade vodom iz daljinskog grejanja

Centralizovana proizvodnja hlađenja zahteva velike cevi za distribuciju. Često je ekonomičnije postaviti lokalne rashladne uređaje koji snabdevaju npr. tržni centar ili bolnicu. Ti potrošači takođe često imaju daljinsko grejanje koje se može koristiti i za hlađenje kondenzatora rashladnog uređaja.

Koriste se konvencionalni uređaji koji su ponekad prilagođeni relativno visokoj temperaturi kondenzacije. Kao radni medijumi koriste se R134a i amonijak (NH_3).

Hlađenje se vrši povratnom vodom iz cevi daljinskog grejanja, koja se provodi kroz kondenzator. Na taj način toplota se koristi ponovo u ciklusu do sistema daljinskog grejanja, ali ne na stepenu temperature koji se može koristiti na prednoj liniji. Voda mora biti zagrejana do prave temperature u konvencionalnom kotlu.

Ova vrsta instalacije je dobro funkcionisala u nekoliko uređaja. Međutim, potrebna je pažnja kako bi se obezbedio dovoljan protok vode za potrebe grejanja. To nije podesno u kombinaciji sa kogeneracijom, jer smanjuje efikasnost proizvodnje električne energije i ograničava postojeću potrebu za toplotom te tako ograničava ukupne mogućnosti za proizvodnju.



Slika 6. Princip hlađenja toplotnom pumpom

3.4. Hlađenje apsorpcionim rashladnim uređajima koje pokreće voda iz daljinskog grejanja

Ova vrsta rashladnih uređaja koristi se skoro isto kao i one vrste koje su opisane u tački 3.3. Međutim, one se različito koriste u različitim uslovima. Podesne su kada su na raspolaganju otpadna toplota ili višak toplote. Iako koeficijent grejanja obično iznosi samo oko 0,7 (0,7 kW hlađenja po 1 kW toplote), one su i dalje profitabilne u poređenju sa uređajima koji rade na električnu energiju zbog vrlo jeftinog „goriva".

Apsorpcioni rashladni uređaji se koriste u sistemu u Geteborgu od početka 1990-tih. Danas se na taj način obezbeđuje 15 MW hlađenja i naša iskustva u radu su zadovoljavajuća.

3.5. Hlađenje konvencionalnim čilerima

Naravno, preduzeća za daljinsko grejanje takođe koriste konvencionalno centralizovano hlađenje. To može biti deo „ugovora o potpunoj usluzi", ili prvi korak prema opisanim ekonomičnijim načinima hlađenja.