

Alfred Heller

Højtemperatursolfanger til solvarmecentraler

Introduktion til kaskadefelter

Rapport
BYG•DTU R-014
2001

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-079-3

Højtemperatursolfanger til solvarmecentraler

Introduktion til kaskadefelter

Alfred Heller

Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2001

1 Forord

Nærværende rapport danner afslutningen for aktiviteterne vedr. højtemperatursolfangere som er finansieret gennem basisbevilling til Solenergicentret. Rapporten viderefører det arbejde der er nedfældet i Rapport R-013 fra samme Institut og hovedforfatter. Hvor den foregående rapport fokuserer på sammenligning af fem valgte solfangere, går den foreliggende rapport videre med at se hvordan sådanne højtemperatursolfangere kan integreres i en solvarmecentral med det formål at mindske energiprisen for hele anlægget.

Tak til Frank Pedersen, ph.d.-studerende på BYG*DTU, for de værktøjer til optimering som han har opbygget i værktøjet MATLAB og som de foreliggende resultater delvis bygger på. Tak også til Frank for gennemlæsning af rapporten.

Ikke mindst tak til Energistyrelsen for deres fremsynede økonomiske støtte til projekter som det foreliggende. En fremsynethed som kommende generationer vil være taknemlig for.

2 Indholdsfortegnelse

1	FORORD	1
2	INDHOLDSFORTEGNELSE	2
3	KASKADEOPBYGNING AF SOLFANGERFELTER	3
4	STYRING AF SOLFANGERFELTER.....	FEJL! BOGMÆRKE ER IKKE DEFINERET.
5	ØKONOMISKE OVERVEJELSER	FEJL! BOGMÆRKE ER IKKE DEFINERET.

3 Indledning

Solvarmecentraler er meget store solvarmeanlæg der enten leverer deres varme til et fjernvarmesystem eller til en bebyggelse (nærvarmesystem). Solfangerne er stillet op i rækker med serielt forbundne solfangermoduler. Rækkerne er koblet parallelt til solfangerfelter. Hele feltet leverer varmen gennem en varmeveksler til fjernvarmen direkte eller til en tank først.

I 80'erne blev solvarmecentraler koblet til returledningen på fjernvarmen og var beregnet til foropvarmning af returvandet fra forbrugerne. Med Marstal-anlægget er solvarmen koblet til både fremløb og returledning. Man forsøger nu at opnå temperaturer fra solvarmen der gør det mulig at levere varmen direkte til forbrugere. Dette medfører, at der anvendes en styring som kan regulere massestrømmen gennem solfangerfeltet for at opnå konstant høje temperaturer fra feltet i lange perioder. Dette kaldes variabel flowstyring i modsætning til konstant flowstyring eller on-off-styring. Styringerne er bl.a. diskuteret i (Heller, A., 1998).

Ønskes høje temperaturer opnået fra solfangerfeltet, vil det medføre dårligere effektivitet og nedsat totalt ydelse for anlægget. Jeg har i rapport R-013 postuleret at anvendelse af højtemperatursolfangere kan reducere dette effektivitetstab. Simplificeret sagt er højtemperatursolfanger et begreb der benyttes til at klassificere de solfangertyper der er i stand til at producere varme ved høje temperaturer uden at tabe for meget i effektivitet. I foregående arbejde af undertegnede, rapport R-013, 2001 fra BYG*DTU, er der vist at højtemperatursolfangere kan konkurrere økonomisk med plane solfanger. Dette gælder dog først fra en gennemsnitlig solfangertemperatur på over f.eks. 60 grader. Analysen er forenklet ved at opbygge et solfangerfelt udelukkende med en enkelt type solfanger. Postulatet, som den nærværende rapport skal dokumentere er, at en kombination af forskellig solfangertyper medfører højere varmeproduktion og dermed en reduktion af energiprisen i forhold til et anlæg med udelukkende plane solfanger. Da en sådanne kombination bygger på at indsætte forskellige typer solfanger i serie, kaldes dette for kaskade-opbygning. Meningen er at udnytte hver type solfanger i det temperaturområde hvor den medfører lavest pris-/ydelsesforhold og dermed energipris.

Man kan forstille sig mange forskellige konfigurationer:

- a) Solfangerne kombineres i samme række.
- b) Solfangerfelter bestående af samme type solfanger kombineret i serie.

Konfiguration b) kan udføres på mange måder. Her nogle eksempler:

- c) Der anvendes forskellige plane solfanger: 1) solfanger med mindre isolering og ingen teflon.
- d) En billig solfanger med lav effektivitet der foropvarmer, forbundet til en normal plan solfanger og videre til en relativ dyr plan højtemperatursolfanger.
- e) Forskellige solfangertyper kombineres, f.eks. MaReCo, HT-NA, vakuumrørsolfanger.

I dette afsnit gøres et første forsøg på at vise at en kombination, her kaldet kaskadesolfangerfelt, kan medføre et bedre pris-/ydelsesforhold end udelukkende at anvende enten den ene eller den anden solfangertype. De foreliggende resultater er kun gyldig for den aktuelle udvidelse i Marstal og skal korrigeres efter gennemførelse for at finde "virkelige" værdier for såvel produktion og priser hvor de fleste usikkerheder er fjernet. Fremgangsmåden kan så herefter anvendes ved konkrete projekter og konkrete priser.

4 Metoden

4.1 Simuleringsmodel

Modellen der anvendes i foreliggende arbejde er udviklet og valideret som del af et Ph.d.-studiet og dokumenteret i (Heller, A., 2001a) og (Heller, A., 2001b). Rapporterne kan finde på Instituttets internetsider. Modellen er opbygget i simuleringsprogrammet TRNSYS, (Klein, S. A. and many others, 1996), Version 14.2.

Modellen består af tre overordnede dele:

- 1) Forbrugsmodellen (bygningers opvarmningsbehov, varmt vand, tab i ledninger m.m.)
- 2) Sekundær side (tank, ledninger, styring), dvs. fjernvarmeside af solvarmecentralen
- 3) Primær side, dvs. solfangerfeltet

Modellen gengiver et anlæg der ligner Marstal-anlægget, dog med en lidt større tankkapacitet på 300 i stedet for 260 liter pr. m² solfangerareal. Denne størrelse medfører mindst behov for ”udblæsning”, dvs. afkøling af overskudsvarme om sommeren for at undgå overophedning af solfangerne, uden at øge totaludgiften til lageret betragteligt. I modellen indgår en selv-udviklet komponent til styring af anlægget. Styringen kan simulere flere forskellige strategier, herunder konstant og variabel flowkontrol.

4.2 Optimering

Formålet med optimeringen er at finde løsninger der minimerer en bestemt størrelse, her pris-/ydelsesforholdet for kombinationer af solfangertyper. Fremgangsmåden er følgende:

- 1) Optimeringsværktøjet forsynes med brugerens estimat af de optimale parameter (et ”startgæt”).
- 2) Optimeringsværktøjet overfører de optimerbare parametre (i dette tilfælde er det en faktor, der fastlægger antal solfangere af den ene og den anden type) til simuleringsværktøjet (TRNSYS).
- 3) Optimeringsværktøjet starter simuleringen og modtager resultaterne efter endt simulering.
- 4) Resultatet af simuleringen benyttes til at foretage et nyt estimat af de optimale parametre.
- 5) Når et stopkriterium er opfyldt stoppes optimeringen og resultatet præsenteres. For det nærværende optimeringsproblem er stopkriteriet, at ændringen af den estimerede løsning ændres mindre end 1% mellem to på hinanden følgende simuleringer.

Den anvendte optimeringsmetode er en relativt simpel, men stabil metode der dog lider under store krav til beregningstid, Nelder-Mead simplex metoden. Denne metode og en mindre tidskrævende metode bliver præsenteret og diskuteret i en følgende rapport, R-015 af Frank Pedersen og undertegnede fra samme Institut.

5 Solfangerne

I den aktuelle analyse tages udgangspunkt i den for tiden mest anvendte solfangermodul fra Arcon Solvarme A/S, Scan-Con HT-NA og en velvalgt vakuumrørsolfanger. Vakuumrørsolfangeren er valgt blandt over 10 mulige typer (ikke kun vakuumrørsolfangere, men også CPC og trug) ud fra kriterierne: 1) at pris-/ydelsesforholdet skal være fornuftig. 2) At usikkerheder på pris og installation er minimale. 3) At solfangerne kan modelleres i samme model som den plane solfanger. Den resulterende solfanger er fra firmaet Thermo-Sol med betegnelse Thermomax AST-20 MD.

Parametrene der indgår i simuleringsmodellen er for solfangerne fundet ud fra prøvningsrapporter fra Teknologisk Institut.

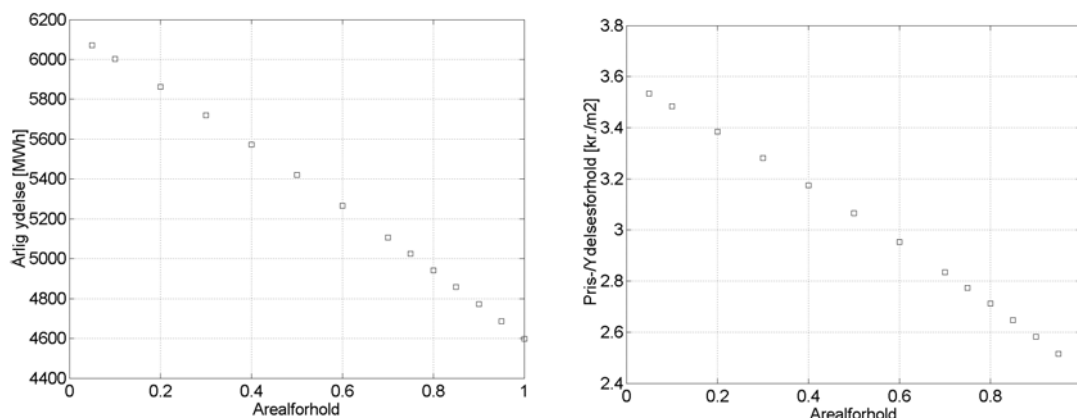
Prisen er indhentet fra producenterne, angivet for et solfangerfelt med solfangermoduler installeret i rækker og koblet sammen i serier til et punkt hvor væskestrømmen samles til et fjernvarmeknudepunkt. Dermed er feltet veldefineret og prisen er uafhængig af varmevekslere, distance til denne m.m. Priserne indeholder ikke solfangervæsken og tømmetanke hertil.

Priserne er som følge:

ARCON HT-NA	Termosol Thermomax AST
1250 kr/m ²	2440 kr/m ²

6 Resultater

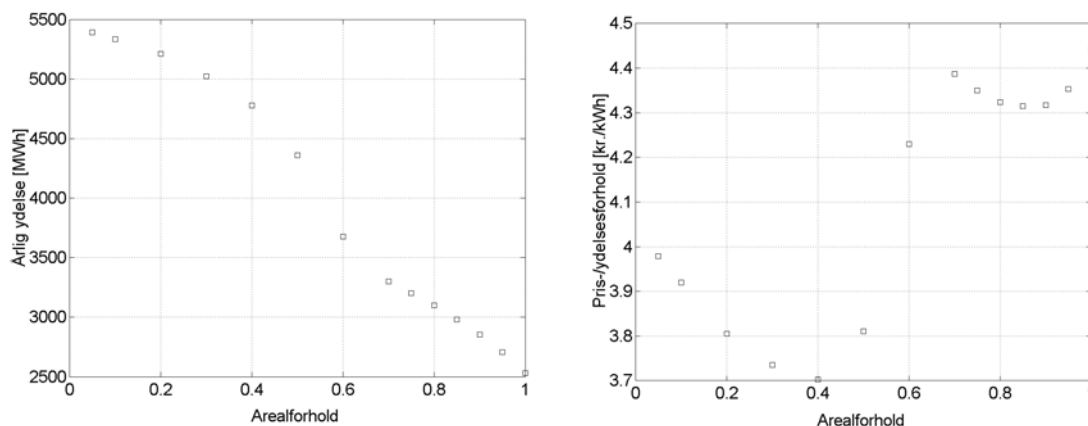
Ydelsen for et solfangerfelt med 9000 m^2 transparent areal og en kontrol strategi der medfører konstant væskestrøm gennem solfangerfeltet er vist i Figur 1.



Figur 1. Ydelse (venstre) og pris-/ydelsesforhold (højre) for kaskadesolfangerfelt med areal 9000 m^2 , med konstant strømningskontrol (On-Off) og en flowrate på 20 kg/h per m^2 solfanger. For en værdi på 0 er alle solfangere vakuumrørssolfanger og for en værdi på 1 er alle solfangere plane. Indløbstemperatur er hele året på 30°C .

Ydelsen for solfangerfeltet er højst for anvendelsen af vakuumrørssolfangeren, hvilket ikke overrasker. Den laveste værdi findes for et felt der udelukkende består af plane solfangere. Da prisen for vakuumrørssolfangere er højere end for plane solfangere og ydelsesforskellen ikke kan afveje denne forskel, er pris-ydelsesforholdet mindst for et solfangerfelt med plane solfangere.

Da pris-ydelsesforholdet afhænger næsten lineært af arealforholdet, findes der intet optimum mellem de to yderpunkter, hvor der anvendes udelukkende den ene eller den anden solfanger. Anvendes derimod variabelt flow, opstår der mulighed for at sænke massestrømmen gennem solfangerfeltet, og tilstræber styringen en høj temperatur gennem hele året, f.eks. 80°C grader om sommeren og 50°C grader om vinteren, da fås resultaterne vist i Figur 2.



Figur 2. Ydelse (venstre) og pris-/ydelsesforhold (højre) for kaskadesolfangerfelt med areal 9000 m², med variabelt strømningskontrol og en maksimalt flowrate på 20 kg/h per m² solfanger der kan drosles ned til 20% heraf. For en værdi på 0 er alle solfangerne vakuumrørssolfanger. Ved x-værdien = 1 udgør plane solfanger hele feltets areal. Indløbstemperatur er hele året på 30 °C.

Som ved konstant flowstyring, er ydelsen for solfangerfeltet højest for anvendelsen af vakuumrørssolfangeren. Ved at sammenligne resultaterne fra konstant og variabelt flowkontrol, finder vi følgende sammenhænge: Vi ser at den årlige ydelse for et felt med udelukkende vakuumrørssolfangeren falder med ca. 700 MWh, og for et felt med udelukkende plane solfanger med 2100 MWh. Det viser helt tydeligt at de plane solfanger har vanskeligere ved at producere ved høje temperaturområder, da dette medfører lav effektivitet. Dette forhold diskuteres i det følgende. Konsekvensen af denne observation er, at pris-/ydelsesforholdet for et kaskadefelt ikke mere er lineært. Vi finder et minimum omkring værdien 0.4, hvilket betyder at solfangerfeltet består af 60% vakuumrør og 40% plane solfanger, hvilket medfører det laveste pris-/ydelsesforhold. Det er vigtigt at fremhæve at værdien på 3,7 kr./kWh ligger under de ca. 4.45 kr./kWh for et felt med udelukkende plane solfanger. Dette er en reduktion på 17% i forhold til nuværende solfangerfelter. Da solfangerne udgør mellem 40% og 60% af udgifterne til solvarmecentraler slår denne reduktion tilsvarende igennem på energiprisen.

Der er en række forhold som skal diskuteres før der gives en egentlig konklusion på resultaterne:

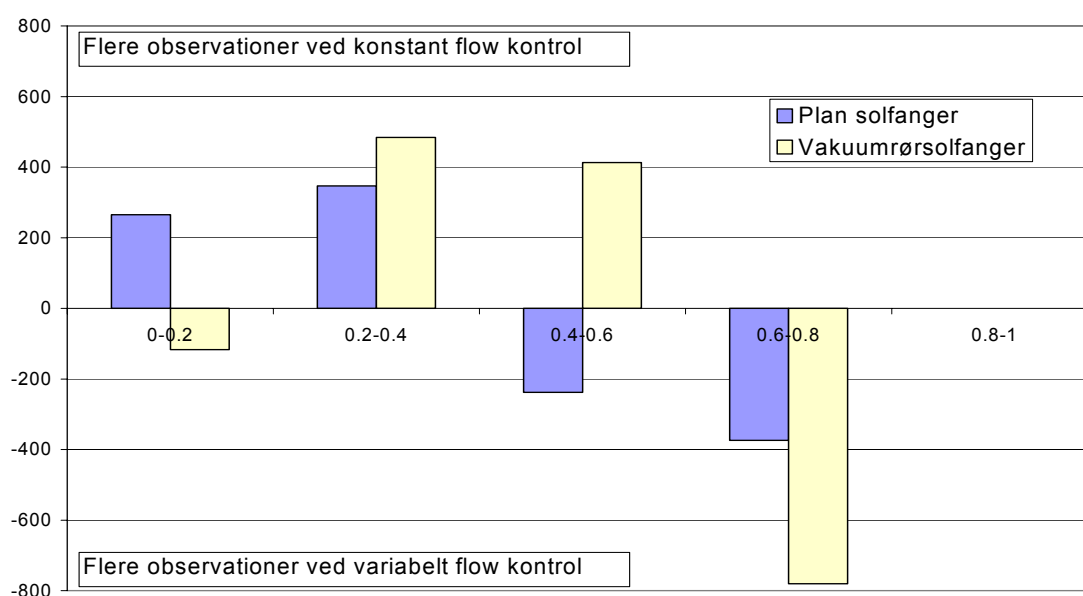
Modellen anvender en styring som ligner den der anvendes på solvarmecentralen i Marstal. Her indgår en effektivitet for solfangerfeltet. I den nærværende modeller indgår to forskellige solfanger, hvilket skulle afspejles i modellen og styringen. Da flere spørgsmål i forhold til styringen på nuværende tidspunkt ikke er besvaret er der antaget at styringen skal styre efter den solfanger der yder den sidste temperaturforøgelse, dvs. vakuumrørssolfangeren. Dermed introduceres en unøjagtighed i styringen hvilket igen slår igennem i resultaterne der ikke skal tages absolut. Bl.a. kan nævnes at den ene solfanger teoretisk kan producere mens den anden ikke kan det. Dermed vil en alt for simpel styring ikke kunne tage stilling til en sådanne situation. På trods af denne usikkerhed postuleres her at resultaternes tendenser er sande og brugbare nok.

Ovenfor er forklaret at de plane solfanger taber i produktionen pga. deres lave effektivitet, når de skal levere høje udgangstemperaturer, hvilket højeffektive solfanger ikke lider helt så meget under. Ved simpel analyse af effektiviteterne for de forskellige kontrolstrategier og solfanger kan der vises følgende størrelser:

	ARCON HT-NA	Thermomax AST
Årlig gennemsnitseffektivitet ¹ (on-off)	48%	65%
Årlig gennemsnitseffektivitet (variabel)	38%	57%
Difference	-10 %	-8%
Dividere (variable) /(on-off)	80 %	88%

Af tabellen fremgår det at den årlige effektivitet for vakuumrørsolfangeren påvirkes mindre såvel i procent og som opgjort procentuel, i sammenligning med den plane solfanger. Man kan altså konkludere at variabelt flow påvirker vakuumrørsolfangeren mindre end den plane.

Ser man på resultatet ved at optælle hvor mange gange solfangeren producerer inden for et vist effektivitetsinterval findes resultatet som vist i Figur 3.



Figur 3. Forskel i antal observationer i givne effektivitetsintervaller når man skifter mellem konstant og variabel flowstyring. Positive værdier betyder øget observation i intervallet for konstant flow.

Vi ser af Figur 3 at observationerne for den plane solfanger tiltager (pos.) for lave effektiviteter ved at anvende variabelt flow, mens antal observationer aftager for høje effektiviteter. Tendensen er helt klar. Den høje udløbstemperatur resulterer i lave effektiviteter.

For vakuumrørsolfangeren er forholdet lidt mere indviklet da observationerne for såvel meget lave som for meget høje effektiviteter aftager, mens antal observationer øges i de mellemliggende intervaller. Vi kan heraf se at produktionen ved høje temperaturer også medfører lavere effektiviteter i den høje ende, men medfører dog rimelige effektiviteter i store tidsrum.

Sammenholdes resultaterne, ses at vakuumrørsolfangeren får en yderligere fordel ved anvendelse i anlæg med variabelt flowstyring, da effektiviteten for solfangerne ikke lider så meget under produktionskravene.

¹ Beregnet som den årlige produktion divideret med den årlige solbestrålingsstyrke der rammer solfangeren (efter skyggen er fratrukket).

7 Konklusion og diskussion

I foregående rapport, R-013 af samme Institut, er der vist at man kan anvende højtemperatursolfangere til at forbedre pris-ydelsesforholdet og dermed reducere energiprisen ved anvendelse af højtemperatursolfangere.

Det er postuleret i indledningen af foreliggende rapport, at man ved kombination af forskellige solfangertyper kan opnå endnu bedre resultater. Til undersøgelsen er der valgt to solfangere, den mest anvendte, plane HT-NA solfanger fra ARCON Solvarme A/S og den solfanger som har vist bedste pris-ydelsesforhold ved sammenligninger, der er gennemført i forhold til udvidelsen af solvarmecentralen i Marstal, i fælles arbejde mellem Planenergi Nordjylland og DTU. Ved at benytte et optimeringsværktøj til at finde den optimale kombination af de to typer solfangere i et enkelt solfangerfelt er det resulterende, optimale pris-ydelsesforhold fundet for kombinationen. Herved vises at pris-ydelsesforholdet kan reduceres med ca. 17% i forhold til de nuværende anlægstyper. Hvis dette forhold viser sig at holde stik i et demonstrationsanlæg, så kan solvarme i store anlæg være konkurrencedygtig i forhold til fjernvarme. Samtidig er vist at en kombination er mere optimal end anvendelse af enten den ene eller den anden type solfanger i et solfangerfelt.

Opgagelsen fører frem til behov for yderligere undersøgelser, herunder kan der nævnes:

- Kaskadeopbyggede solfangerfelter kræver nye design- og optimeringsmetoder.
- Speciel styringen for kombinerede solfangerfelter er meget relevant at bliver undersøgt og optimeret, da man ikke umiddelbar kan anvende effektivitetsudtrykkende fra den ene eller den anden indgående solfanger.
- Der er store usikkerheder forbundet med anvendelse af højtemperatursolfangere, da man ikke har erfaringer med dem. Opgaven bliver taget op i et EU-projekt, støttet gennem UVE-programmet af Energistyrelsen, hvor solvarmecentralen i Marstal vil blive udvidet med 10.000 m² solfangere og 10.000 m³ sæsonvarmelager. Her bliver mindst to nyudviklede plane solfanger demonstreret, samt en udvalgt af højeffektive solfangere. Det er ikke på nuværende tidspunkt bestemt helt præcist hvordan feltet kommer til at se ud. Interesserede læsere kan finde relevant information på bl.a. www.solarmarstal.dk.
- Det ser ikke umiddelbar ud til at de plane solfangere kan forbedres afgørende.
- Der er meget store udviklingspotentialer specielt i vakuumrørsolfangere der på nuværende tidspunkt produceres i små moduler. Produktion af store moduler forventes at kunne medføre en reduktion af solfangerprisen med mindst 30% (som var tilfældet for de plane solfangere) samt en afgørende reduktion af installationsprisen. Trugsolfangere forventes at kunne forbedres i forhold til spejleffektiviteten og ikke mindst i produktionsprocessen.

8 Referencer

- Heller A. (1998) *Optimering af styringsstrategien for solvarmecentralen i Marstal*. Sagsrapport, SR 9910, Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet.
- Heller A. (2001a) *Large Scale Solar District Heating - Evaluation, Modelling and Designing*. R-046. Ph.D.-Thesis, Dept. of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, ISSN 1396-4011, ISBN 87-7877-050-5, Building 119, DTU, DK-2800 Lyngby.
- Heller A. (2001b) *Large Scale Solar District Heating - Evaluation, Modelling and Designing - Appendices*. R-047. Ph.D.-Thesis, Dept. of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, ISSN 1396-4011, ISBN 87-7877-051-3, Building 119, DTU, DK-2800 Lyngby.
- Heller A. og Vejen N.K.(2001a) *Højtemperatursolfanger til solvarmecentraler – Indledende sammenligninger*. Rapport, R-013, BYG*DTU, Danmarks Tekniske Universitet, ISSN 1601-2917, ISBN: 87-7877-078-5.
- Heller A. og Vejen N.K.(2001b) *Optimering af energisystemer*. Rapport, R-01t, BYG*DTU, Danmarks Tekniske Universitet, ISSN 1601-2917, ISBN: 87-7877-080-7.
- Klein S.A. & others. (1996) *TRNSYS - A Transient System Simulation Program*. Version 14.2, University of Wisconsin—Madison, USA