



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

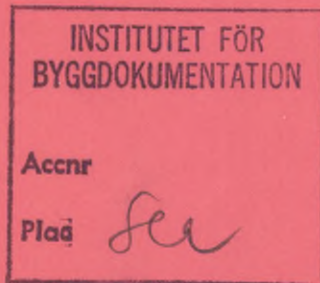
R58:1985

**Absorptionsvärmepump för
utvinning av rökgasspillvärme
vid avfallsförbränning**

Förstudie

Mats Westermark

*K
AWa*



Byggforskningsrådet

R58:1985

ABSORPTIONSVÄRMEPUMP FÖR UTVINNING AV
RÖKGASSPILLVÄRME VID AVFALLSFÖRBRÄNNING

Förstudie

Mats Westermark

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821792-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Scandia-
consult AB, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R58:1985

ISBN 91-540-4390-5
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1985

INNEHÅLL

1	SAMMANFATTNING	1
2	BAKGRUND	2
3	DIMENSIONERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	3
3.1	Sammansättning av bränslet	3
3.2	Sammansättning hos rökgas	3
3.3	Miljökrav för rening av rökgaser och kondensat	6
4	DIMENSIONERING OCH PROCESSVAL	7
4.1	Processval för kombination av rening och värmeutvinning	7
4.2	Material- och energibalanser	9
4.3	Dimensionering och materialval	11
5	KOSTNADSBERÄKNING OCH LÖNSAMHETS- BEDÖMNING	12
6	LITTERATURFÖRTECKNING	14
Bilaga 1	Material- och energibalanser	15
Bilaga 2	Fysikaliska och kemiska data	20
Ritning nr 1	Flödesschema alt 1 (indirekt värmeväxling)	22
Ritning nr 2	Flödesschema alt 2 (direkt värmeväxling)	23
Ritning nr 3	Flödesschema alt 3 (hygroskopisk absorption)	24

1 SAMMANFATTNING

Denna rapport behandlar tekniska, ekonomiska och miljömässiga synpunkter på återvinning av rökgasspillvärme från avfallsförbränning. Slutsatserna kan i korthet sammanfattas enligt nedan:

- Avfallsförbränning genererar för närvarande ca 1,7 TWh värme i totalt 15 st anläggningar i Sverige. Med återvinning av rökgasspillvärme kan ytterligare ca 0,6 TWh värme utvinnas. Med ett värmepris av 150 kr/MWh motsvarar detta ca 90 milj kr/år.
- Olika metoder är teoretiskt möjliga för att utvinna spillvärme från soprökgaser men ingen är noggrant prövad. Den metod vi funnit mest utvecklingsbar är avfuktning av rökgasen med en hygroskopisk kalciumkloridlösning. Metoden ger rening med avseende på saltsyra och kvicksilver samtidigt som den ger en varmare gas med högre stigförmåga än andra metoder (direkt eller indirekt kylning med vattenkontakt).
- En kostnadskalkyl och lönsamhetsbedömning har utförts för en förbränningsanläggning med 20 MW panneffekt. Investeringsbehovet beräknas till ca 8,2 milj kr för värmeåtervinningsutrustningen. Den utvunna spillvärmeeffekten är ca 6,7 MW, vilket innebär en årsintäkt av 6 milj kr vid en årlig drifttid av 6 000 h och ett antaget värmepris av 150 kr/MWh. Återbetalningstiden är mindre än 2 år.
- Ur miljösynpunkt bedöms en kombination av rökgasrening + värmeåtervinning vara att föredra framför nuvarande torra reningsmetoder. Med den nedkylning och vattenkontakt som erhålls vid värmeåtervinningen kan rening nämligen även erhållas för kvicksilverklorid i gasform vilket ej är möjligt med torra reningsmetoder.
- Värmeåtervinning från soprökgaser bör prövas i pilotskala vid någon befintlig förbränningsanläggning (t ex Högdalen). På grund av att saltsyrarening kommer att införas av miljöskäl är en snabb utvärdering av miljöeffekter och ekonomi befogad.

2 BAKGRUND

Rökgaser från sopförbränning har ett högt energiinnehåll på grund av hög temperatur och hög fuktighet. Medelst kylning och avfuktning av rökgaserna skulle energiproduktionen kunna höjas med storleksordningen 25 - 35 %. Det utvunna rökgasvärmnet skulle kunna minska åtgången av olja och andra bränslen i de fjärrvärmenät som utnyttjar sopor.

Potentialen för rökgasspillvärme i Sverige kan uppskattas med hjälp av nedanstående förteckning över anläggningar (1).

Avfallsförbränning 1982

Medlemsverk	Avfallsmängd för produktion av	
	<i>värme</i> <i>ktoe</i>	<i>el</i> <i>ktoe</i>
<i>Avesta</i>	5,4	
<i>Borås</i>	5,2	
<i>Eksjö</i>	1,1	
<i>Göteborg</i>	44,3	
<i>Köping</i>	4,6	
<i>Linköping</i>	10,6	
<i>Lund</i>	0,8	
<i>Malmö</i>	30,2	
<i>Mora</i>	2,0	
<i>Skaraborg</i>	0,2	
<i>Stockholm</i>	27,0	1,9
<i>Sundbyberg</i>	2,5	
<i>Trollhättan</i>	1,9	
<i>Umeå</i>	12,9	
<i>Uppsala</i>	24,2	
Samtliga medlemsverk	172,8	1,9

Tabell 1 Förteckning över avfallsförbränningsanläggningar.

Enligt ovanstående förteckning är den årliga energiproduktionen från avfallsförbränning ca 1,7 TWh/år. Utvinningsbar spillvärmemängd uppskattar vi till ca 35 % av panneffekten, vilket innebar ca 0,6 TWh/år. Med ett energipris av 150 kr/MWh motsvarar detta 90 milj kr/år. Ekonomin för spillvärmeutvinning från avfallsförbränning påverkas gynnsamt av den höga årliga driftstiden (ofta 6000 -7000 h/år). Vidare är avfallsförbränningsanläggningar redan anslutna till fjärrvärmenätet varför kulvertkostnaden bör bli måttlig.

En viktig aspekt vid utnyttjande av rökgaser från avfallsförbränning är att miljökraven måste beaktas. Värmeåtervinningsanläggningen skall om möjligt ge god reduktion av saltsyra och tungmetaller och låg daggpunkt hos rökgaser. Vidare skall det utkondenserade vattnet vara fritt från föroreningar. Det genererade slammet skall avges i så koncentrerad form att deponeringen underlättas.

3 DIMENSIONERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

3.1 Sammansättning av bränslet

Bränslets sammansättning varierar beroende på om hushållsavfallet sorteras före förbränningen eller bränns osorterat. Vid sorteringen mals hushållsavfallet och separeras därefter i en bränslefraktion (lätt fraktion) och en tung fraktion. Motivet för separering är främst miljömässiga ty man minskar mängden miljöstörande komponenter (saltsyra, tungmetaller) som tillförs förbränningen. Tack vare att sorterat avfall har mindre styckestorlek och ett högre och jämnare värmevärde erhålls också bättre och mera konstanta förbränningsförhållanden. Nackdelarna med separering är främst att separeringsanläggningar är kostsamma i investering och drift. Vidare förlorar man vid separeringen ca en tredjedel av värmeinnehållet i soporna på grund av att en del brännbara ämnen medföljer den tunga fraktionen. Huvuddelen av det svenska hushållsavfallet bränns osorterat.

I tabell 2 nedan ges en normal sammanställning av hushållsavfall (2).

		Osorterat avfall	Bränsle- fraktion
Undre bränslevärde	H_U MJ/kg	11	15
Aska	vikt %	25	5
<u>Spårelement</u>			
Klor	Cl g/ton	7 000	5 500
Kvicksilver	Hg g/ton	1,5	1,1
Kadmium	Cd g/ton	4	2
Krom	Cr g/ton	52	25
Koppar	Cu g/ton	200	60
Bly	Pb g/ton	200	80
Zink	Zn g/ton	1 000	500

Tabell 2 Sammansättning av hushållsavfall

3.2 Sammansättning av rökgas

Ur miljösynpunkt är främst emissionen av saltsyra, stoft och tungmetaller (främst kvicksilver) intressanta. Emissionen av ett enskilt ämne bestäms av:

- Halten av ämnet i bränslet
- andel av ämnet som överförs till rökgasen
- avskiljningsgraden för ämnet i gasreningstrutningen

Beträffande halten i bränslet gäller att saltsyran främst beror på halten PVC-plast i avfallet medan man för kvicksilver räknar med att kvicksilverhaltiga batterier är den viktigaste källan. Tungmetallerna bly, zink, tenn härstammar från metallföremål såsom konservburkar etc.

Beträffande andel av ämnet som överförs till rökgasen gäller att ämnen som existerar i gasform vid förbränningstemperaturen överförs i relativt hög grad till rökgasen. Exempel på lättförgasade produkter är bl a organiskt bundet klor (t ex i PVC), kvicksilver, zink, bly, aluminium, kadmium och tenn. Exempel på svårförgasade produkter är t ex koppar, järn och kisel; dessa ämnen kvarstannar i högre grad i bottenaskan.

Beträffande avskiljningsgrader gäller att avfallsförbränningsanläggningar i Sverige normalt är utrustade med elektrofilter som ger god stoftavskiljning (ca 98-99 %). Emellertid ger elektrofilter lägre reningsgrad för de mest finpartikulära stoftet samt naturligtvis en mycket ringa rening för komponenter i gasform. Bland kategorin finpartikulärt stoft återfinns bl a lättförgasade tungmetaller såsom zink, bly och kadmium. Bland kategorin gasformiga komponenter återfinns främst saltsyra samt gasformig kvicksilverklorid i form av Hg Cl_2 (g).

Exempel på uppmätta emissioner efter elektrofilter återges i tabell nedan. I kolumnen längst till höger anges vilka värden som valts för denna studie.

Ämne	Högdalen (2)		Malmö (3)	
	Osorterat avfall	Bränslefraktion	Osorterat avfall	Valt värde i denna studie
Stoft mg/m ³ norm torr gas, 10 % CO ₂	155	60	1000 (cyklon) 4-36 (spärrfilter)	40
HCl	"-	626	833	937
HF	"-	1	3	-
SO ₂	"-	256	264	-
SO ₃	"-	13	13	-
Hg (gas)	"-	0,139	0,069	0,134 - 0,169
Hg (stoft)	"-	0,054	0	0,03 (spärrfilter)
Kadmium	"-	0,114	0,045	0,012 (spärrfilter)
Bly	"-	2,50	0,98	0,240 (spärrfilter)
Zink	"-	5,90	2,88	0,700 (spärrfilter)
Rökgasflöde (tot) m ³ norm/kg avfall	6,15	6,23	8,2	7
Rökgasflöde (torr) "	5,22	5,22	6,8	6
O ₂ % (vol)			7,1	
N ₂ % (vol)			63,8	
CO ₂ % (vol)	10,5	10,8	12	10
H ₂ O % (vol)	15	16	17	15
Rökgastemp efter elfilter	219	210	220	220
Daggtemperatur °C	54	56	57	54
Undre värmevärde MJ/kg avfall	11	15	11,7	11

Tabell 3 Emissioner efter elektrofilter

3.3 Miljökrav för rening av rökgaser och kondensat

Miljökraven för rökgasrening är för närvarande främst god stoftrening. Normalt krav är högst 40 - 80 mg/m³ (norm) som månadsmedelvärde. I framtiden kommer saltsyrarening att bli ett krav åtminstone för större anläggningar. Den första saltsyrareningen för sopor i Sverige har installerats i Malmö och består av adsorption på torrt kalkstensmjöl. Reningsgraden med avseende på saltsyra är av storleksordningen 70-80 % för denna metod (3). I en nyligen avkunnad koncessionsdom åläggs Göteborgs-regionens Avfallsaktiebolag (GRAAB) att införa saltsyrarening.

Förutom saltsyrautsläppen diskuteras främst åtgärder för reduktion av kvicksilveremissionen. I jämförelse med andra kvicksilverkällor är avfallsförbränning en betydande utsläppskälla. I undersökningen av Högdalen (2) anges t ex att kvicksilverutsläppet är ca 10,8 g/h. Om man antar att analysen är representativ samt att drifttiden är 7 000 h/år fås ett årsutsläpp av ca 76 kg kvicksilver.

Vid utvinning av spillvärme från fuktiga rökgaser eftersträvar man att kyla rökgasen under daggpunkten så att vattenånga kondenserar. Det utkylda vattnet avger värme samt späder ut korrosiva ämnen såsom saltsyra och svavelsyra. Nedkyllningen kan åstadkommas medelst direktkyllning i vätskrubber eller medelst indirekt kyllning i värmväxlare. Om rökgaser från sopförbränning kyls på något av dessa sätt kommer man att erhålla ett förorenat kondensat. Man kan nämligen förutse att gasformig kvicksilverklorid samt saltsyra kommer att lösa sig i kondensatet. Vidare kommer även en del övriga tungmetaller att hamna i vattenfasen. Tungmetallhalter för skrubbervätska före och efter kalkfällning har publicerats från kommunal sopförbränning i Bamberg, Västtyskland (6). Vidare har Fagersta AB nyligen gjort ett försök med indirekt kyllning vid sopförbränningsanläggningen i Uppsala. För de viktigaste komponenterna erhöles nedanstående halter i kondensatet (4):

Ämne	Bamberg		Uppsala mg/l	Gränsvärde enligt VAV för avledning till avloppsverk (5) mg/l (=ppm)
	Före rening mg/l	Efter fällning mg/l		
Kvicksilver	0,4-4,8	0,17-2,5	1,1	0,001
Koppar	0,2-0,68	0,04-0,13	4,4, 2,1	0,25
Zink	4,5-10,3	0,05-0,13	5,5, 7,8	0,5
Kadmium	0,1-0,4	<0,02	0,15, 0,10	0,0025
Kobolt	-	-	0,3, 0,3	0,003
Bly	2,8-6,4	0,14-0,65	3,0, 3,8	0,05

Tabell 4

Tungmetallhalter i kondensat från soprökgaser

Av analysvärdena framgår att tungmetaller såsom bl a kvicksilver fångas i vätskan. En långt gående rening måste utföras för att kondensatet skall kunna avledas till avloppsverk. Skälet till detta är att slam från reningsverk ofta används som gödselmedel i jordbruket vilket ställer krav på låga tungmetallhalter. Erfarenheten från Tyskland är att fällning ger för dålig avskiljning av främst kvicksilver.

4 DIMENSIONERING OCH PROCESSVAL

4.1 Processval för kombination av rening och värmeutvinning

För att utvinning av spillvärme från sopförbränning skall kunna genomföras måste miljöfrågorna lösas på ett tillfredsställande sätt. Helst skall miljöeffekten bli bättre med en kombination av värmeåtervinning och rening än med enbart nuvarande reningsmetoder.

För en reningsmetod för soprökgaser är följande kriterier viktigast:

- Hög reningsgrad för saltsyra
- God avskiljning av kvicksilver och andra tungmetaller
- Hög temperatur och låg fuktighet hos utgående rökgas (för att minska lokalt nedfall)
- Deponerbar restprodukt
- Lågt investeringsbehov och låg driftkostnad

Nuvarande reningsmetoder för soprökgaser är dels vätskrubber dels torr adsorption på kalkstensmjöl. Vätskrubber med kalk ger den bästa gasreningen med avseende på saltsyra och kvicksilver men ger nackdelar i form av kall- och fuktmättad rökgas efter behandlingen. Vid åre ger en vätskrubber upphov till vätskeformat avfall i form av en tungmetallhaltig vattenlösning av kalciumklorid. Av dessa skäl rekommenderas ofta torra eller halvtorra metoder med kalkadsorption. Dessa metoder ger fördelar i form av en varm rökgas samt ger en torr restprodukt för deponeringen. Nackdelar med den torra metoden är att avskiljningen av gasformigt kvicksilver är låg samt att saltsyraavskiljningen ej blir högre än storleksordningen 70-80 % om tillfredsställande utnyttjning skall erhållas för kalken.

För soprökgaser är vattenångans daggpunkt ca 54°C. För att kunna utvinna huvuddelen av det latenta värmeinnehållet i rökgasen bör daggpunkten sänkas till ca 35°C.

För kombinationer mellan rening och värmeåtervinning är ett antal alternativa utformningar tänkbara. Se vidare ritning nr 1-3.

I alternativ 1 kyls rökgasen ned med hjälp av indirekt värmeväxling. Det utvunna spillvärmets uppgraderas till användbar temperatur med absorptionsvärmepump eller eventuellt mekanisk värmepump. Problemet med detta alternativ är främst att mycket korrosionsbeständigt material erfordras i kylarna. Kondensatet från sopor håller enligt Fagerstas mätningar ett pH-värde av ca 0,8 och innehåller ca 1 % saltsyra. Den rostfria stålqualität som Fagersta använder för kylning av rökgaser från olja och flis är ej tillräckligt korrosionsbeständigt för att tåla orenade soprökgaser. Man får istället tänka sig betydligt exklusivare stålqualiteter (Hastelloy C, Hastelloy G, Inconel etc). Den högre materialkostnaden torde minst fördubbla kostnaden för kylarna. Enligt en litteraturstudie som vi genomfört har vi ej funnit några praktiska erfarenheter från sådana kylare. Den intressantaste kylartypen torde i stället vara växlare av grafit eller teflonbelagt kolstål. Grafitväxlare är väl beprövade

inom saltsyraindustrin och har visat sig fullt beständig. Teflonbelagda tuber är relativt nya och har hittills endast prövats på rökgaser från olje- och gaseldning. Där har de dock fungerat tillfredsställande.

Ett annat problem med metoden är att den utgående gasen blir mättad med fukt vilket ger risk för utdagning i skorstenen och ovanför skorstenen. Det är också omöjligt att ordna en fullständig saltsyra-rening ty kondensatet kommer att innehålla en viss saltsyrahalt (ca 1 % HCl) vilket ger en viss jämviktshalt av saltsyra i utgående rökgas. För att åstadkomma bästa möjliga rening för saltsyra och kvicksilver torde därför metod 1 kombineras med skrubber, dvs med metod 2 eller 3 nedan.

I alternativ 2 kyla rökgasen med vatten med hjälp av direktvärmewäxling (t ex venturiskrubber eller fyllkroppskolonn). Lämpligen tillsätts kalk till den cirkulerande lösningen för att kunna absorbera saltsyran i gasen. Det utvunna spillvärmets uppgraderas med absorptionsvärmepump eller mekanisk värmepump. Fördelen jämfört med alternativ 1 är att värmeöverföringen och reningen går att utföra i samma utrustning samt att korrosionsproblemen vid värmewäxlingen blir mindre på grund av lägre temperatur och högre pH-värde.

I alternativ 3 kyla och avfuktas rökgasen med en hygroskopisk CaCl_2 -lösning med hjälp av direktvärmewäxling i en fyllkroppskolonn. Därefter värmewäxlas CaCl_2 -lösningen med fjärrvärmenätet för att avge den frigjorda energin. Om man använder en 50 %-ig CaCl_2 -lösning ger denna en kokpunktsförhöjning av ca 25°C . Med en returtemperatur av 50°C i fjärrvärmenätet kan man kyla rökgasen till ca 60°C och avfukta rökgasen till en dagstemperatur av 35°C om man räknar med 5°C i drivande temperaturskillnad i vardera värmewäxlare och kolonnen. För att upprätthålla erforderlig CaCl_2 -halt i absorptionslösningen erfordras att en delmängd av lösningen avdras för indunstning varvid koncentratet återförs till fyllkroppskolonnen och destillatet leds till avlopp. Energin för indunstningen tas från pannans primärkrets men utgör ingen driftkostnad eftersom energin sedan kommer fjärrvärmenätet tillgodo. Processen med hygroskopisk värmeåtervinning är patent-sökt i Sverige och ett antal andra länder (8).

En jämförelse mellan de olika alternativen görs i tabell 5 nedan. Vår bedömning är att värmeåtervinning med hygroskopisk lösning (metod 3) är den bästa ur såväl miljösynpunkt som värmeåtervinningssynpunkt. Ur miljösynpunkt är den förhållandevis varma och omättade rökgasen en väsentlig fördel i jämförelse med de kalla och fuktmättade gaserna från de övriga processerna. Vidare erhålls det utvunna vattnet i form av ett destillat vilket ger mindre utsläpp av tungmetaller och andra miljöföroreningar än de båda andra processerna där man måste rena ett förorenat kondensat. Ur energisynpunkt gäller att alternativ 2 med direktkylning fordrar att all spillvärme uppgraderas med värmepump. Med alternativ 1 (indirekt kylning) och 3 (hygroskopisk lösning) kan rökgasens sensibla värmeinnehåll överföras medelst värmewäxling vilket gör att kapaciteten hos värmepumpen ungefär halveras. För en 20 MW avfallspanna blir värmepumpens kapacitet ca 3,5 MW större för alternativ 2 än för alternativ 1 eller 3. Investeringsbehovet för extra värmepumpskapacitet blir ca 5-6 milj kr för alternativ 2.

För att uppnå godtagbara reningsgrader för kondensat från metod 1 och 2 kan man knappast använda fällning ty detta ger för dålig rening av bl a kvicksilver (jämför reningsresultat enligt tabell 4). Det miljömässigt bästa är troligen att indunsta kondensatet vilket ger en god reningsgrad med avseende på även kvicksilver. Indunstning av kondensat har bl a diskuterats i Tyskland (7).

Parameter	Alt 1 Indirekt kylning + värmepump	Alt 2 Direkt kylning + värmepump	Alt 3 Hygroskopisk lösning
Temperatur hos behandlad gas	35°C	35°C	60°C
Daggpunkt hos behandlad gas	35°C	35°C	35°C
Reningsgrad för HCl	80-95	> 95 %	> 95 %
Behandlingsmetod för kondensat	indunstning ?	indunstning ?	destillation i processen
Kapacitet hos värmepump	3,5 MW kyleffekt	7 MW kyleffekt	3,5 MW kyleffekt

Tabell 5 Jämförelse mellan olika alternativ för rening + värmeåtervinning

På grund av att alternativet 3 förefaller miljömässigt gynnsammast har detta alternativ valts för de fortsatta beräkningarna.

4.2 Material- och energibalanser

Som räknebas väljs 1 m³ (norm) torr rökgas (1 normalkubikmeter torr rökgas). 1 kg avfall ger ungefär 5,22 m³ (norm) rökgas. Vi antar att rökgasen genomgått stoftrening i elektrofilter innan den tillförs värmeutvinningsanläggningen. De detaljerade beräkningarna redovisas i bilaga 1.

Följande antaganden görs i material- och värmebalanserna:

- Rökgasen har genomgått stoftrening i elektrofilter före värmeåtervinningen. Stofthalten sätts till 40 mg/m³ (norm).
- Rökgasen har en temperatur av 210°C efter elektrofiltret.
- Rökgasen har en vattenhalt av 15 vol-% vilket motsvarar en dagstemperatur av 54°C.
- Rökgasen innehåller syrakomponenter i form av 600 mg HCl/m³ (norm) samt 250 mg SO₂/m³ (norm).
- Absorptionstornet dimensioneras för minst 95 % reduktion av sura komponenter (HCl och SO₂).

- Returtemperaturen i fjärrvärmenätet är normalt 50°C men kan vid spetslast stiga till maximalt 70°C.
- Vid returtemperaturen 50°C i fjärrvärmenätet kyls rökgasen till 60°C och avfuktas till en dagtemperatur av 35°C.
- Som absorptionslösning används 50 %-ig CaCl₂-lösning. Vid indunstningen i generatoren höjs halten till 65 %.
- Undre värmevärdet för sopor har satts till 11 MJ/kg.
- Pannans verkningsgrad har satts till 75 % räknat på det undre värmevärdet.

Som beräkningsexempel väljs en anläggning med 20 MW panneffekt. Flödet av sopor blir 8,7 ton/h och rökgasflödet 52 300 m³(norm) torr gas/h. Följande resultat erhålls (se vidare bilaga 1):

Materialbalans

Kalkstensbehov	62,8 kg/h
Destillatflöde	4,9 m ³ /h
Avdrag av CaCl ₂ +slam	220,0 kg/h
CaCl ₂ -flöde till generator	21,1 ton/h
CaCl ₂ -flöde från generator	16,2 ton/h

Energi balans

Utvunnen effekt från vattenånga i rökgas	4,0 MW
Utvunnen effekt från torr gas i rökgas	3,2 MW
Förlorad effekt i utgående varmt kondensat	- 0,5 MW
Utvunnen nyttig spillvärme	6,7 MW
Överförd effekt i absorbator	7,5 MW
Överförd effekt i kondensator	3,2 MW
Överförd effekt i generator	4,0 MW

$$\text{"Värmefaktor"} = \frac{\text{utvunnen energi}}{\text{drivenergi}} = \frac{7,5 + 3,2}{4,0} = 2,68$$

Förvärmare för värmeväxling mellan varm och kall lösning vid indunstning har utelämnats. Skälet till detta är att vi bedömer att utfällningsrisken är för stor. På kalla sidan kan utfällning av gips inträffa (gips är svårslösligare vid hög temperatur varför utfällning sker vid förvärmning av lösningen). På varma sidan kan utkristalli-

sering ske av $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - kristaller. Dessa kristaller riskerar att helt sätta igen värmeväxlaren om de börjar kristallisera vid nedkyllning av lösningen eller vid avställning av utrustningen. Utelämnandet av förvärmare innebär ett extra uppvärmningsbehov i absorbatoren (ca 10 % ökning) och ett extra kylbehov i avfuktningsskretsen (ca 5 % ökning). Inbesparingen av förvärmare gör emellertid att åtgärden knappast innebär en fördyring.

4.3 Dimensionering och materialval

Fyllkroppstorn för kylning och avfuktning av rökgasen utformas på samma sätt som för rening av soprökgaser. Detta innebär att man med direktinsprutning av CaCl_2 -lösning kyler ned rökgaserna till under 100°C . Tack vare kylningen kan fyllkroppstornet utföras i glasfiberarmerad plast. Fyllningen i tornet utgörs av t ex 2-tums Intaloxsadlar i polypropen.

Värmewäxlaren i avfuktningsskretsen utförs som blockkylare av impregnerad grafit. Rör, pumpar och ventiler i avfuktningsskretsen utförs av glasfiberarmerad plast eller annan lämplig plast (t ex polypropen).

Värmewäxlare av impregnerad grafit har valts för att eliminera risken för korrosion på grund av saltsyrahalten och kloridhalten i mediet. Andra tänkbara alternativ är Hastelloy C eller teflonklädda värmewäxlartuber, men dessa alternativ är ej lika korrosionsbeständiga. Hittills är grafit det material som man har mest erfarenhet av i likartade applikationer. Grafit används bl a i värmewäxlare vid framställning av saltsyra och är beständig mot saltsyra och svavelsyra ända till ca 150°C .

För att gardera sig mot inläckning av absorptionslösning i fjärrvärmenätet vid ett eventuellt läckage bör man sätta in en extra värmewäxlare (plattvärmewäxlare med plattor i SIS 2343) mellan grafitväxlaren och fjärrvärmenätet.

Indunstaren utförs med tvångscirkulation med värmewäxlare av impregnerad grafit. Pump för tvångscirkulation av kalciumkloridlösningen utförs av grafit eller PVDF-plast.

5 KOSTNADSBERÄKNING OCH LÖNSAMHETSBEDÖMNING

Krav på saltsyrarening av soprökgaser kommer att bli vanligt i framtiden. Investering i kalksilo, tvättorn, slamhantering, större fläktkapacitet etc kan därför bedömas vara en investering som måste göras av miljöskäl.

Kostnadsberäkning och lönsamhetsbedömning bör därför inriktas på att avgöra lönsamhet för värmeåtervinningen. Investering i kylare för torktorn och investering i indunstare etc måste kunna betalas av återvunnet värme.

En preliminär bedömning av värmeväxlarkostnaden kan göras enligt nedan:

Utrustning	Överförd effekt MW	Temperatur- differens °C	Värmeöver- föringstal kW/m ² °C	Yta m ²	Pris kkr
Torktornsväxlare(grafit)	7,50	5°C	1	1500	3000
Generator (inkl kärl)	4,0	20°C	1	200	500
Kondensator	3,2	5°C	3	110	100
Fjärrvärmeväxlare	7,5	3°C	3	830	<u>800</u>

Σ 4400

Preliminära investeringsbehovet för en komplett anläggning har sammanställts i tabell 6 nedan:

<u>Processutrustning</u>	kkr
Värmeväxlare	4 400
Rör, pumpar, instrument, automatik	500
Montage	500
<u>Yttre rördragning</u>	
Rörledning till fjärrvärmenät	100
Rörledning till primärkrets	100
2 cirkulationspumpar	100
<u>Byggnadsarbeten</u>	
Byggnad L x B x H = 10 x 5 x 10 m	800

Övrigt

Ränta under byggtid	500
Projektering	500
Projekteringleddning etc	200
Oförutsett	<u>500</u>
	8 200

Tabell 6 Investeringsbehov för värmeåtervinningsanläggning

Lönsamhetsbedömningen grundas på en drifttid av 6 000 h och ett värmepris av 150 kr/MWh för levererad energi.

<u>Intäkter</u>	kk/år
Försäld värme (6,7 MW x 6 000 h x 150 kr/MWh)	6 000

Utgifter

Kapitalkostnad (16 % annuitet)	1 310
Drift och underhåll (5 % av processutrustning)	<u>300</u>
Vinst kkr/år	4 390

$$\text{Återbetalningstid} = \frac{\text{Investeringsbehov}}{\text{Nettointäkt före ränta och avskrivning}}$$

$$= \frac{6\,500}{5\,800} = 1,4 \text{ år}$$

Framställningskostnad för levererad energi =

$$= \frac{1\,610 \text{ kkr}}{40\,200 \text{ MWh}} = 4,0 \text{ öre/kWh}$$

Tabell 7 Lönsamhetsbedömning

LITTERATURFÖRTECKNING

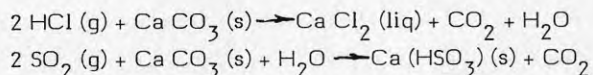
- 1 Bioenergi nr 5, Augusti 1983, sid 20-21
- 2 Jan Bergström: Separering av hushållsavfall, värdering av förbränningsförsök, Aktiebolaget Svarthålsforsen, Stockholm; Studsvik Energiteknik AB 1981-03-16.
- 3 Driftstudie av SYSAV:s avfallsverk i Malmö, 1983, Statens Naturvårdsverk PM 1667.
- 4 Ragnar Bernstein, Fagersta AB, Box 501, 773 01 Fagersta. Personkontakt.
- 5 Vatten- och avloppsverksföreningen (VAV).
- 6 Huber L, Klingl H: Untersuchung zur Toxizität und Reinigung von Rauchgaswässern.

3. Mülltechnisches Seminar, Abgasreinigung und Gewässerschutz bei der thermischen Abfallbehandlung. Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität, München. Nr 26, 1980, sid 61-70.
- 7 Reimer H: Eindampfung von Waschwässern aus Müllverbrennungsanlagen; Verfahrenstechnik, Anlagentechnik, Systemvergleich. *ibid* sid 105-119.
- 8 Svensk patentansökan nr 8203308-5. Uppfinnare: Gunnar Svedberg, Scandiaconsult AB.
- 9 Hougen O A, Watson K M, Ragatz R A: Chemical Process Principles, part 1 - material and energy balances, 2nd Ed, 1962, sid 160.

BILAGA 1. Material- och energibalanser

Materialbalans för kalk och sura komponenter

Kalkbehovet tillgodoses med finmalet kalkstensmjöl. Absorptionslösningen hålls vid ett pH-värde av ca 4-5 genom att en pH-mätare får styra kalkstenstillsatsen. Följande kemiska reaktioner sker:



Vid de aktuella halterna erhålls:

600 mg	HCl	förbrukar	822 mg	CaCO ₃	och ger	1 825 mg CaCl ₂
250 g	SO ₂	förbrukar	195 mg	"	och ger	395 mg Ca(HSO ₃) ₂
			1 017 mg			

Vid dosering av kalkstensmjöl måste man dessutom ta hänsyn till att kalkstenen innehåller ca 15 % inerta komponenter samt att en del kalkstenspartiklar ej hinner lösa sig fullständigt. Kalkstensbehovet torde därför bli ca 20 % högre än det teoretiska dvs ca $1\,200 \text{ g CaCO}_3/\text{m}^3$ (norm) gas.

Den mängd CaCl₂ och Ca (HSO₃)₂ som bildas vid absorptionen avtappas i form av absorptionsvätska med ca 50 % Ca Cl₂. Denna vätska innehåller även föroreningar i form av tungmetaller, stoft etc och används t ex för uppfuktning av aska.

Materialbalans för vatten

Inkommande rökgas till värmeåtervinningen har en vattenhalt av 15 volym%. Detta motsvarar 142 g vatten/m³ (norm) och ger en daggpunkt av 54°C. I absorptionskolonnen sker en absorption av vattenånga i den hygroskopiska kalciumkloridlösningen. Vattenhalten i den rökgas som lämnar värmeåtervinningsanläggningen beror på temperatur och kokpunktsförhöjning hos kalciumkloridlösningen. Om man antar att returvattnet från fjärrvärmenätet håller 50°C är det realistiskt att kyla kalciumkloridlösningen till 55°C. Kalciumkloridhalten i lösningen kan hållas vid ca 50 % vilket motsvarar 25°C i kokpunktsförhöjning. Om jämvikt uppnås i typen av absorptionstornet mellan utgående rökgas och inkommande kalciumkloridlösning kan daggpunkten i den renade rökgasen sänkas till 55°C - 25°C = 30°C. Emellertid kan man i ett absorptionstorn ej uppnå fullständig jämvikt utan det är rimligt att dimensionera absorptionstornet för ca 5 graders drivande temperaturdifferens i toppen. Därmed skulle en daggpunkt av 35°C vara möjlig att uppnå i den behandlade rökgasen. Det absorberade vattnet som destillat i generatoren samt i viss mån med den avtappade kalciumkloridlösningen.

Ingående vatten i varm rökgas (daggpunkt = 54°C)	141 g/m ³ (norm)
Utgående vatten i behandlad rökgas	<u>47 g/m³ (norm)</u>
Absorberad vattenmängd	95 g/m ³ (norm)
Avtappad mängd vatten i Ca Cl ₂ avdrag (ca 4 g 50 %-ig lösning)	2 g/m ³ (norm)
Avtappad mängd vatten i destillat från generator	93 g/m ³ (norm)

Man kan således konstatera att $95/142 = 67\%$ av vatteninnehållet i rökgasen absorberas och avger sitt kondenseringsvärme. Detta är ett gott utnyttjande av rökgasens latent värmeinnehåll. Den behandlade gasen har en relativ fuktighet av 28 %.

Materialbalans för stoft och tungmetaller

Tungmetaller, stoft och andra icke-flyktiga föreningar förångas ej i generatoren utan anrikas i absorptionslösningen. Enligt materialbalansen för vatten bortgår endast ca 2 % av det absorberade vattnet som avtappad kalciumkloridlösning medan ca 98 % förångas i generatoren. Med denna process erhålls därför de avskilda tungmetallerna i Ca 50 gånger mindre volym än vid konventionell kondensering (skrubber eller indirekt kylare). Mängd och sammansättning hos avdraget framgår nedan.

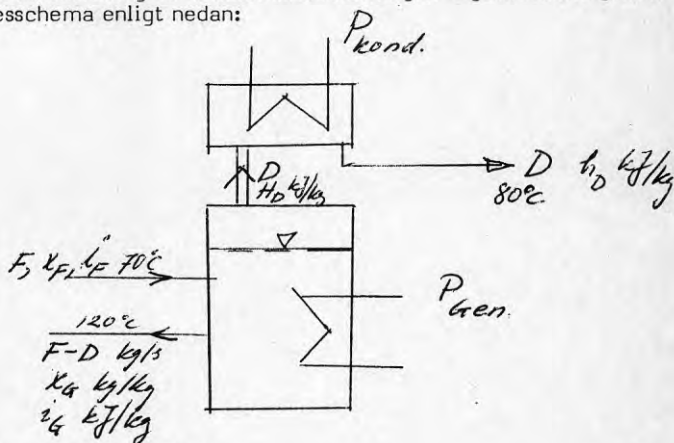
Stoft från rökgaser (inkl tungmetaller)	40 mg/m ³ (norm)
Oupplöst material från kalksten (10 % av kalkstensdos)	120 mg/m ³ (norm)
Utfälld Ca (HSO ₃) ₂ (allt antas utfällt)	<u>395 mg/m³ (norm)</u> 555 mg/m ³ (norm)
Avdragsmängd Ca Cl ₂	1 825 mg/m ³ (norm)
Avdragsmängd vatten	1 825 "
Susp halt i avdrag	$\frac{555}{3\ 650 + 555} = 13\% \quad 75$
Total mängd avdrag	3 650 + 555 = 4 205 mg = = 4,2 g/m ³ (norm)

Om man önskar lägre halt suspenderade ämnen i absorptionslösningen bör man kunna åstadkomma detta genom att filtrera lösningen genom en filterpress eller avskilja slam i en centrifug.

Ett speciellt problem att beakta är risken för medstänkning av lösning i destillatet. Om man tex har en kvicksilverhalt av 1 ppm i indunstaren och av miljöskäl kräver lägre än 1 ppb i destillatet får medstänkningen av vätska vara högst 10^{-6} i ångan från indunstaren. För att helt vara säker på att uppnå detta har vi i flödesschemat antagit att ångan passerar ett par klockbottnar för rening med avseende på stänk.

Energibalans för generator och kondensor

För koncentrerung av kalciumkloridlösningen i generatorn gäller flödesschema enligt nedan:



Energibalans för kondensor:

$$P_{\text{kond}} = D(H_D - h_D) \dots\dots(1)$$

$$D = 93 \text{ g/m}^3 \text{ (norm) enligt materialbalans för vatten}$$

$$H_D = 2704 \text{ kJ/kg (vattenånga } 120^\circ\text{C)}$$

$$h_D = 335 \text{ kJ/kg (vatten } 80^\circ\text{C)}$$

$$P_{\text{kond}} = 0,093 (2704 - 335) = 220 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)}$$

Energibalans för generatorbehållare:

$$P_{\text{Gen}} = D H_D + (F - D) i_G - F i_F \dots\dots (2).$$

Materialbalans för kalciumklorid(3).

$$F X_F = (F - D) X_G \text{ ger } F = D \frac{X_G}{X_G - X_F}$$

Insättes (3) i (2) fås:

$$P_{\text{Gen}} = D H_D + D \left(\frac{X_G}{X_G - X_F} - 1 \right) - D \left(\frac{X_G}{X_G - X_F} \right) i_F$$

$$D = 93 \text{ g/m}^3 \text{ (norm)}$$

$$H_D = 2704 \text{ kJ/kg (vattenånga } 120^\circ\text{C)}$$

$$X_G = 0,65 \text{ kg/kg}$$

$$X_F = 0,50 \text{ kg/kg}$$

$$i_G = 120 \cdot C_p (65 \%) = 120 \cdot 2,5 = 300 \text{ kJ/kg}$$

$$i_F = 70 \cdot C_p (50 \%) = 70 \cdot 2,5 = 175 \text{ kJ/kg}$$

$$F = D \frac{X_G}{X_G - X_F} = 0,093 \frac{0,65}{0,15} = 0,403 \text{ kg/m}^3 \text{ (norm)}$$

$$P_{\text{Gen}} = 0,093 (2704 + 3,33 i_F - 4,33 i_F)$$

$$P_{\text{Gen}} = 0,093 (2704 + 999 - 758) = 274 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)}$$

Energibalans för absorbator

Utvunnen energi från vattenångan

$$= 0,142 \text{ kg} \times 2799 \text{ kJ/kg} - 0,047 \text{ kg} \times 2609 \text{ kJ/kg} = 275 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)}.$$

Utvunnen energi från torr gas = 1 m³ norm torr gas kyls 160^oC. Den torra rökgasen består av ca 105 l (=10,5 vol%) = 206 g koldioxid samt resten (dvs 895 l = 1120 g) huvudsakligen kvävgas. Värmekapacitiveteten för koldioxid är ca 0,90 kJ/kg ^oC och för kvävgasen 1,05 kJ/kg ^oC. Utvunnen energi från torr gas blir då 0,206 kg x 0,90 kJ/kg ^oC x 160^oC + 1,12 kg x 1,05 kJ/kg ^oC x 160^oC = 218 kJ/m³ (norm).

$$P_{\text{Abs}} = 275 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)} + 218 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)} - 0,40 \text{ kg}.$$

$$70^\circ\text{C} - 2,5 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} + 0,31 \text{ kg} \times 120^\circ\text{C} \times 2,5 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} = 516 \text{ kJ/m}^3 \text{ (norm)}.$$

Sammanställning av material- och energibalans

Som beräkningsexempel väljs en anläggning med 20 MW panneffekt. Rökgasflödet antas till 52 300 m³ norm torr gas/tim vid 220°C och 54 graders dagtemperatur. Pannans verkningsgrad har satts till 75 % räknat på det undre värmevärdet. Flödet av sopor blir 2,42 kg/s = 8,7 ton/h vid ett antaget undre värmevärde av 11 MJ/kg. I värmeåtervinningen kyls rökgasen till 60°C och avfuktas till en dagtemperatur av 35°C. Förutsättningar i övrigt enligt tabell 2.

Materialbalans:

Kalkstensbehov:	52 300 m ³ (norm)/h	1,2 g CaCl ₂ /m ³ (norm)	=62,8 kg/h
Destillatflöde:	52 300 m ³ (norm)/h	93 g H ₂ O/m ³ (norm)	=4,9 m ³ /h
Avdrag av CaCl ₂ + slam:	52 300 m ³ (norm)/h	4,2 g /m ³ (norm)	=220 kg/h
CaCl ₂ -flöde till generator:	52 300 m ³ (norm)/h	403 g lösning/m ³ (norm)	=21 100 kg/h
CaCl ₂ -flöde från generator:	52 300 m ³ (norm)/h	310 g lösning/m ³ (norm)	=16 200 kg/h

Energibalans:

Utvunnen effekt från vattenånga:	52 300 m ³ (norm)/h	275 kJ/m ³ (norm)	=3,995 MW
Utvunnen effekt från torr gas:	52 300 m ³ (norm)/h	218 kJ/m ³ (norm)	=3,167 MW
Förlorad effekt i utgående varmt kondensat:			= -0,46
Utvunnet nyttigt spillvärme:			=6,7 MW
Överförd effekt i absorbatör	52 300 m ³ (norm)/h	516 kJ/m ³ (norm)	=7,5 MW
Överförd effekt i kondensör:	52 300 m ³ (norm)/h	220 kJ/m ³ (norm)	=3,2 MW
Överförd driveffekt i generator:	52 300 m ³ (norm)/h	274 kJ/m ³ (norm)	=4,0 MW

$$\text{"Värmefaktor" } \eta = 1 + \frac{\text{återvunnet nyttigt spillvärme}}{\text{tillförd drivenergi}} = 1 + \frac{6,7}{4,0} = 2,68$$

MW (7)

Bil 2 Fysikaliska och kemiska data

Kokpunktsförhöjning och löslighet för kalciumkloridlösningar framgår av diagram nedan (9):

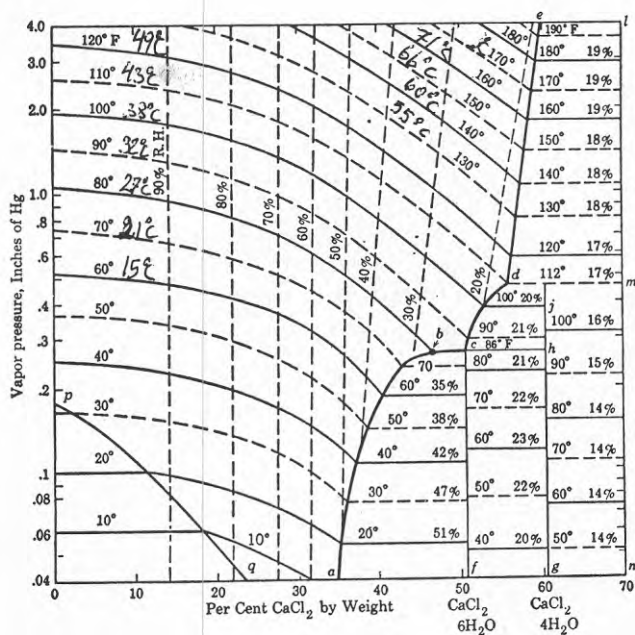
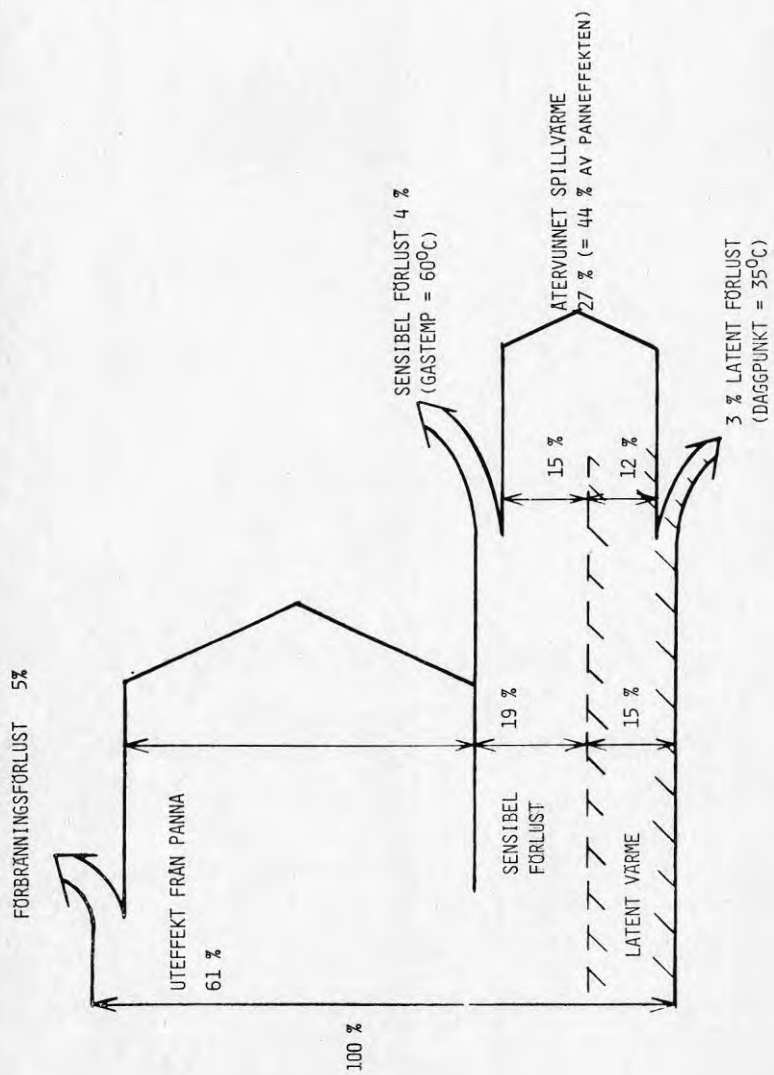
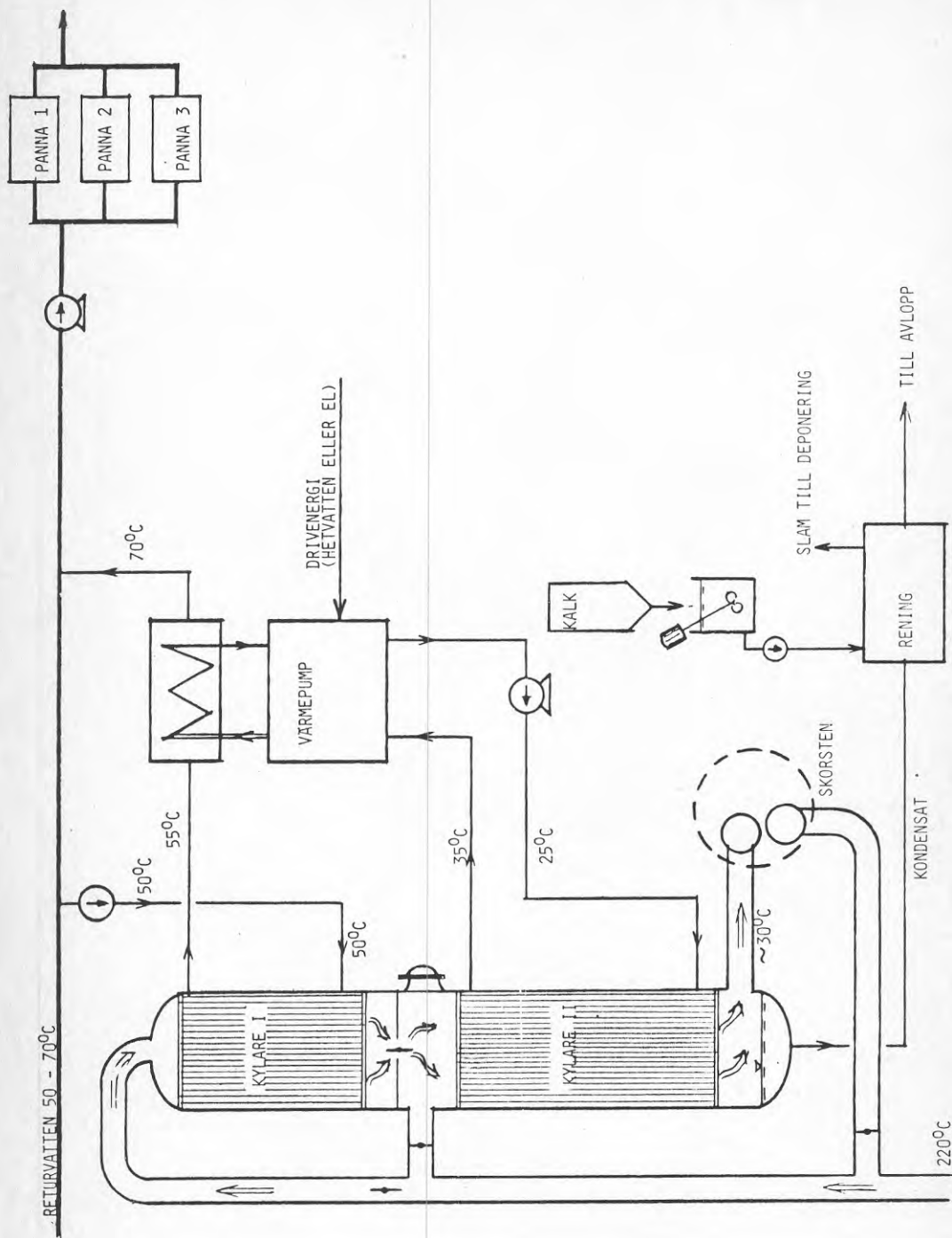


FIG. 27. Vapor pressure and relative humidity over calcium chloride solutions

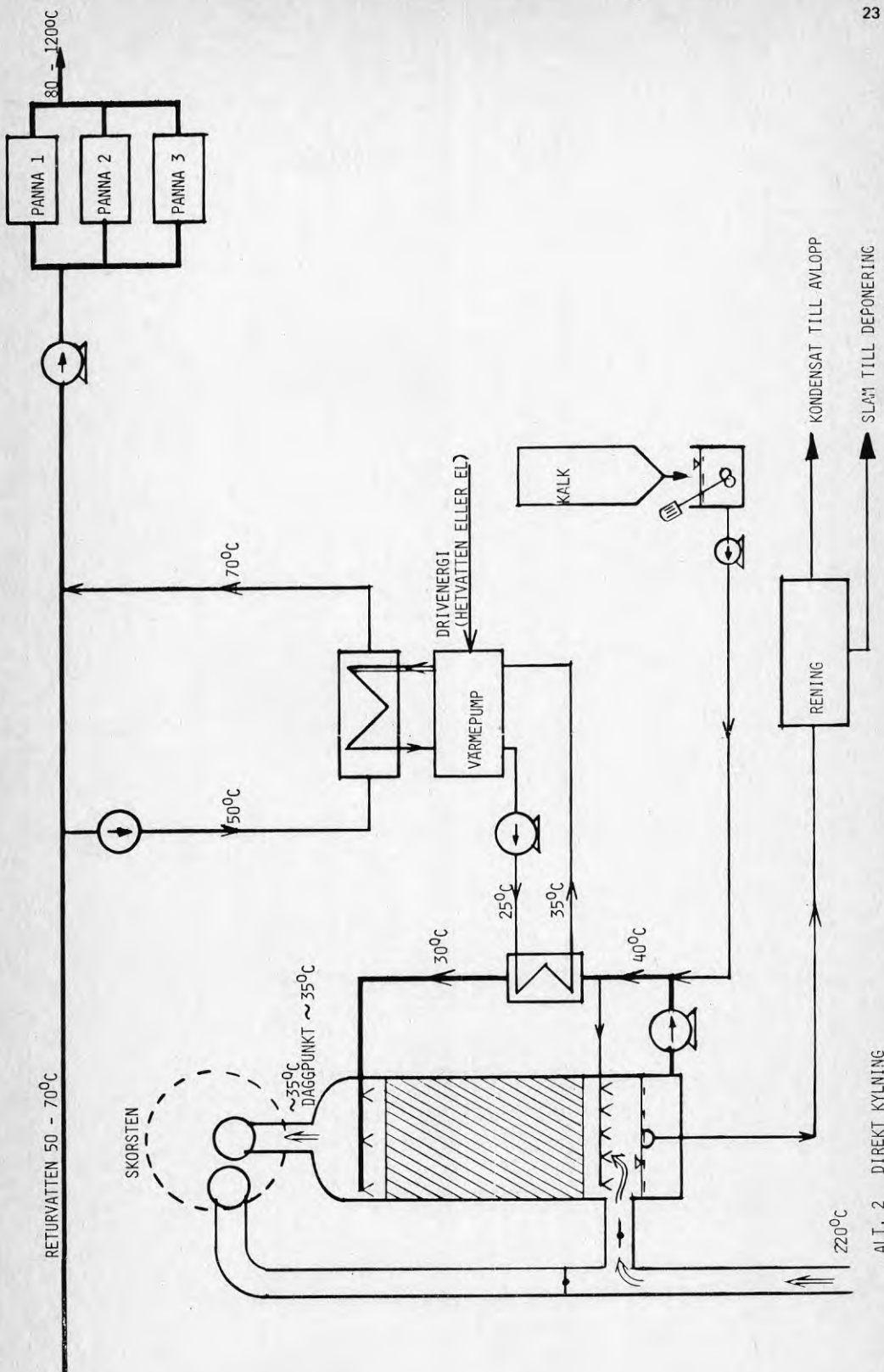
	VERKNINGSGRAD	
	KALORI-METRISKT VÄRMEVÄRDE	UNDRE VÄRMEVÄRDE
KONV. PANNA	61 %	~ 76 %
KONV. PANNA + HYGROSKOPISK VÄRMEÅTERVINNING; ("HYGROHEAT")	88 %	110 %



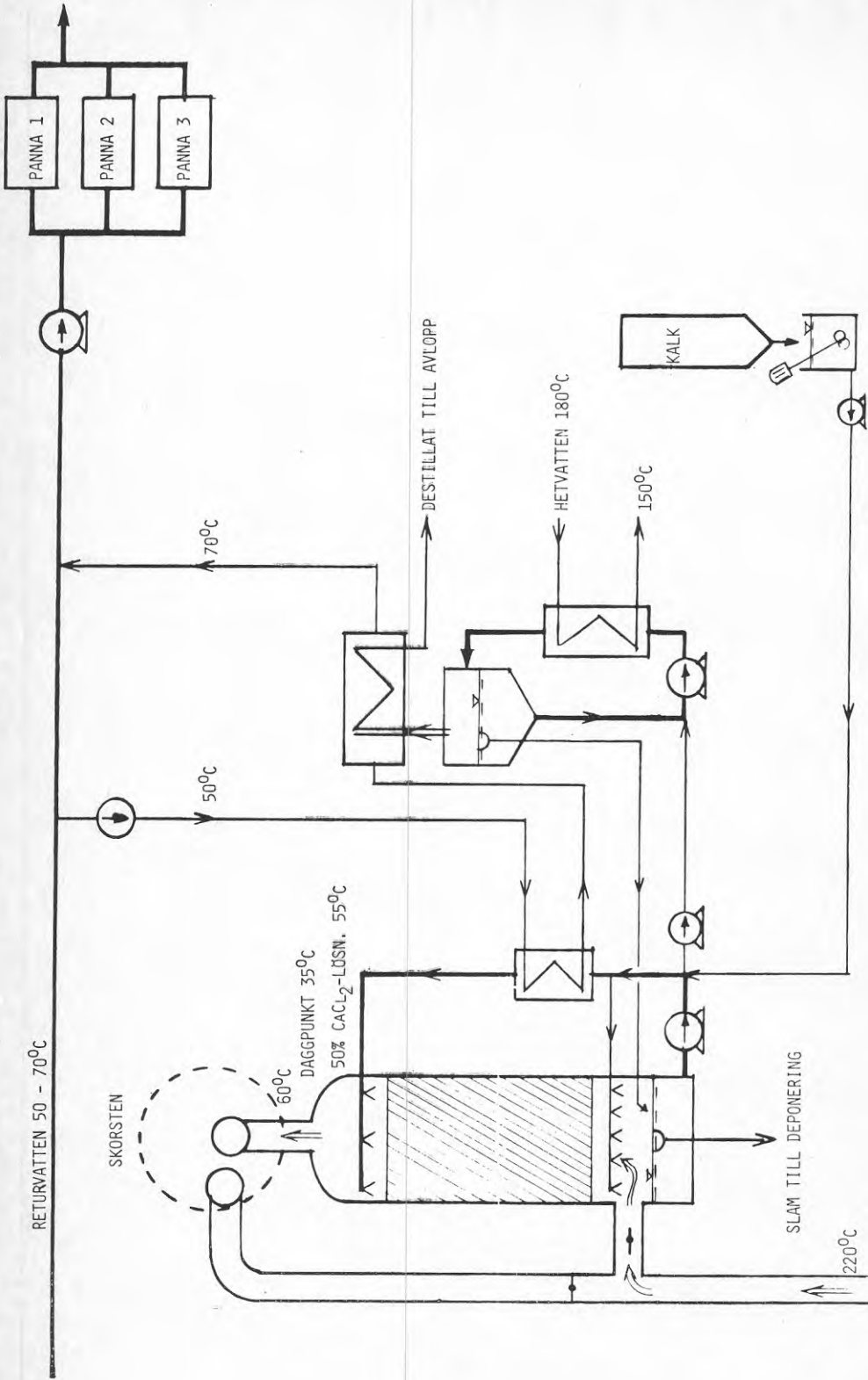
ENERGIBALANS FÖR AVFALLSFÖRBRÄNNING



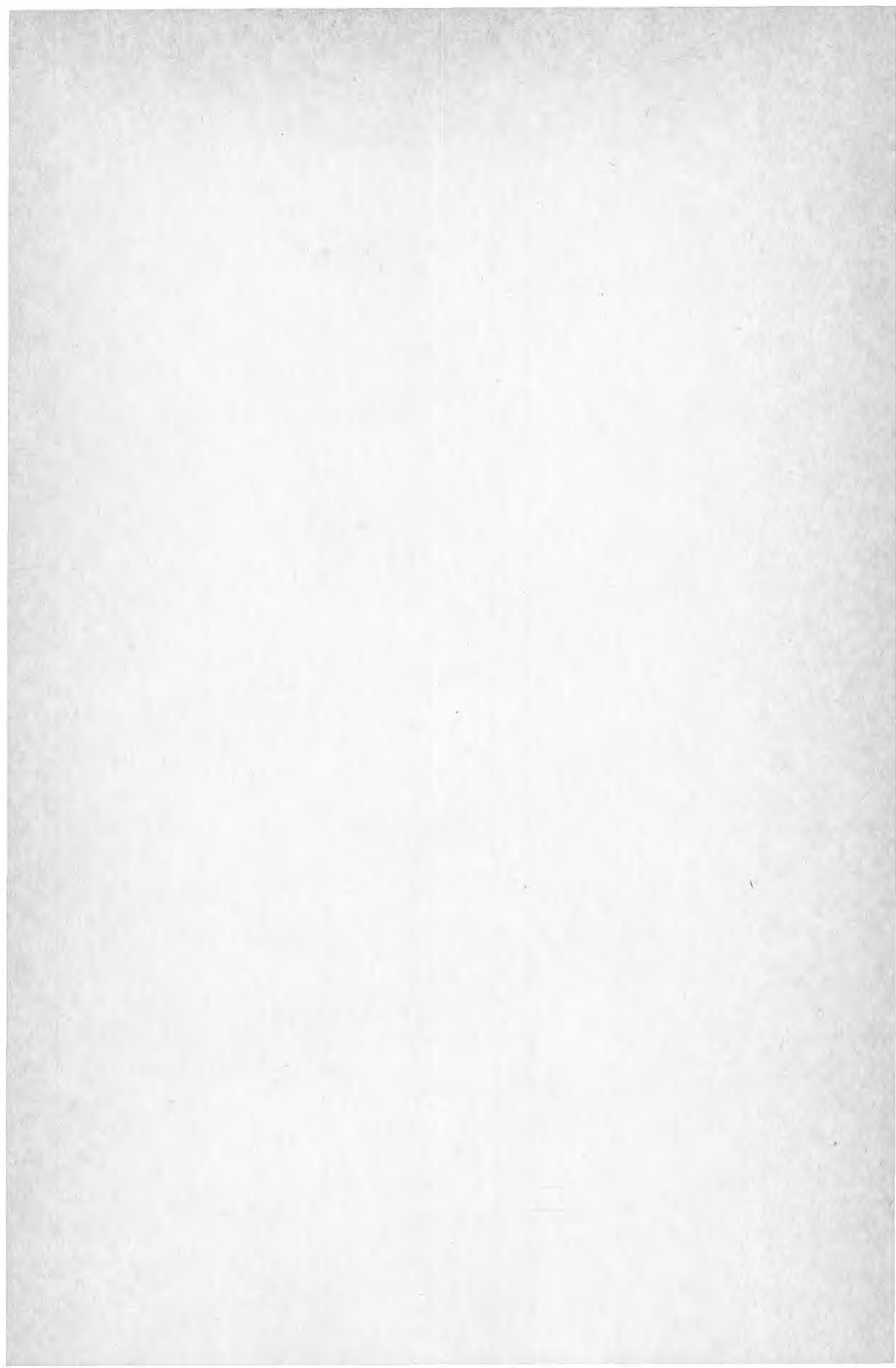
ALT. 1 INDIREKT KYLING

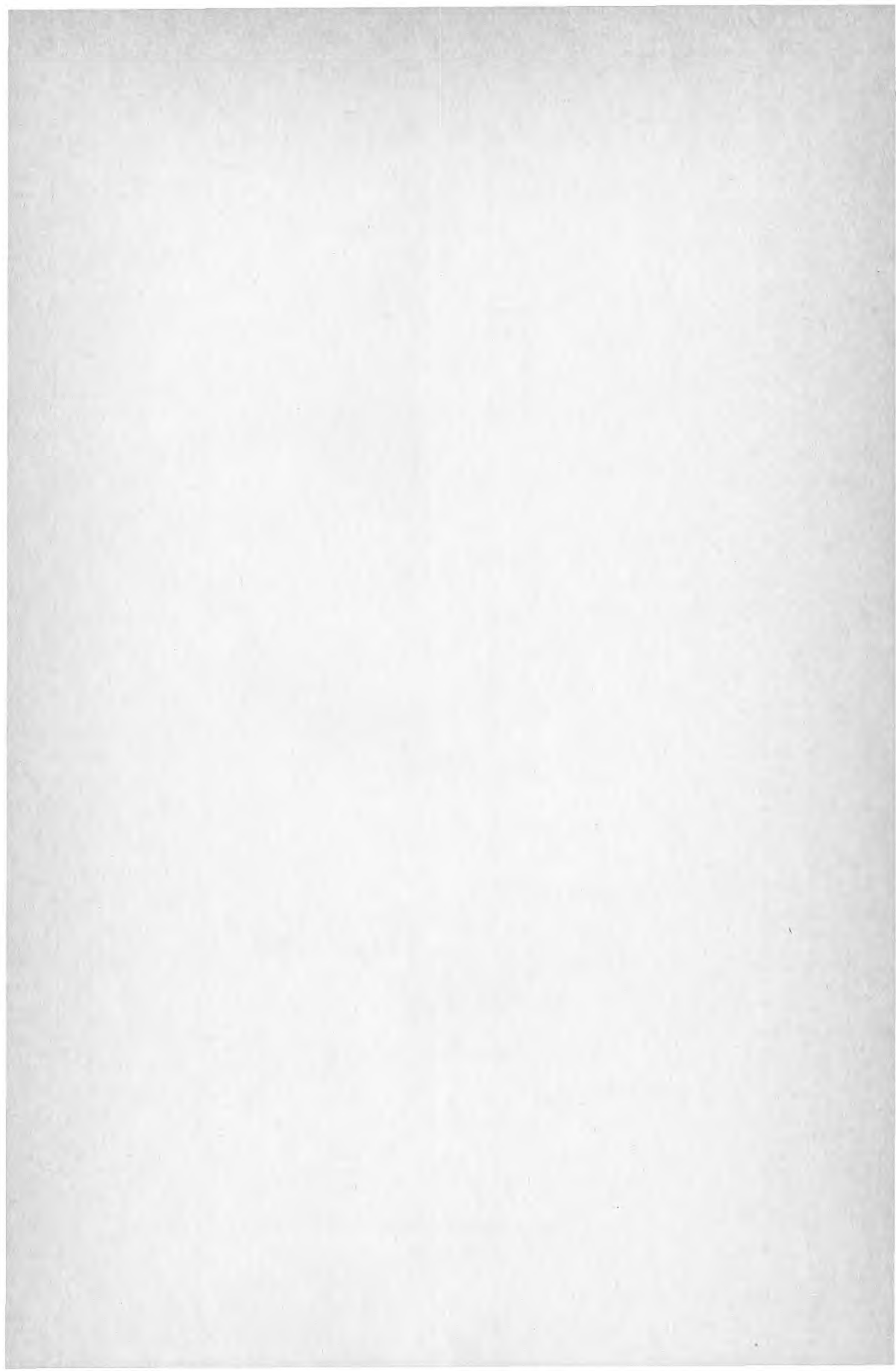


ALT. 2 DIREKT KYLNING



ALT. 3 DIREKT KYLNING MED HYGROSKOPISK LÖSNING, "HYGROHEAT"





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821792-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Scandiaconsult
AB, Stockholm.**

R58: 1985

ISBN 91-540-4390-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6705058

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 25 kr exkl moms