

Jarðhiti til kælingar. Lausleg athugun á notkun lághitavatns í kælikerfum

Hjörleifur Þór Jakobsson

Greinargerð HÞJ-81/02

Jarðhiti til kælingar. Lausleg athugun á notkun lághitavatts í kælikerfum

Inngangur

Á mynd 1 sést hvernig hefðbundin kælihringrás lítur út. Orkufrekasti þáttur kerfisins er þjöppunin. Kæliefnið er þá í gaskenndu formi og þrýstingsbreytingin krefst töluverðrar orku. Með notkun svonefndra "absorption" kælikerfa er hægt að fara kæliefnið milli þrýstisviða í vökvafasa og þannig minnka mjög alla rafmagnsnotkun. Þetta krefst hins vegar varmaorku t.d. heits vatns. Á Íslandi er að finna mikinn jarðvarma og snemma kom upp sú hugmynd að nota jarðgufu til reksturs "absorption"-kerfa. Gerðar voru prófanir á þessu sviði upp úr 1946 (Kristján Samundsson 1970) og útbúið var frystikerfi í Hveragerði. Eitthvað virðist hafa farið úrskeiðis við gerð þessa kerfis, því að það komst aldrei í notkun. Áhugi manna virðist hafa dvínað við þessar hrakfarir því að lítið er skrifað um þessi mál á næstu áratugum. Einstaka menn sýndu þó málinu alltaf mikinn áhuga og 1973 skrifaði Sigurður Magnússon grein gagnert um þessi mál (Sigurður Magnússon 1973). Árið 1976 er svo unnið lokaverkefni við vélaverkfræðiskor H.Í. sem fjallaði um notkun jarðgufu í frystiðnaði (Árni Ragnarsson 1976). Niðurstöður þessa verkefnis voru þær helstar að hagkvæmara var talið að nota "absorption" kerfi en þjöppukerfi. Stafaði þetta einkum af lágum rekstrarkostnaði en stofnkostnaður reyndist vera hærri vegna dýrra varmaskipta. Þrátt fyrir niðurstöður þessarar skýrslu hefur ekkert slíkt kerfi séð dagsins ljós hérlendis.

Eins og sést á þessu hafa flestar hugleiðingar um "absorption" kerfi miðast við að notuð yrði jarðgufa enda ættu það að vera afkastamestu kerfin. Ekkert er þó sem mælir gegn því að nota lághita og sem dæmi má nefna að Kínverjar hafa nýlega reist stöð sem byggir á lághita (Cai Yihan 1981). Einnig liggur það fyrir að tiltölulega fáir byggðar-
kjarnar á Íslandi hafa aðgang að háhita en margir að lághita. Því er það ekki úr vegi að kanna fræðilega hringrás slíkra kerfa og hværsu vatnsfrek þau eru.

Eins og komið hefur fram nota þessi kerfi tiltölulega lítið rafmagn og eru því sérstaklega hagkvæm í þeim löndum þar sem rafmagn er dýrt en jarðvarmi eða afgangsvarmi er til staðar. Þetta á við um mörg þróunarlöndin. Hér að aftan verða því tekin nokkur dæmi um einföldustu gerð "absorption" kerfa og verður gert ráð fyrir mismunandi hita kæli- vatnsins. Skýrt skal tekið fram að hér er aðeins um mjög lauslega fræðilega úttekt að ræða og ekkert mat er lagt á hina efnahagslegu þætti málsins.

"Absorption kerfi"

Á mynd 2 er teiknuð lausleg hringrás af einföldu ammóníak-vatns absorption kerfi. Eins og áður sagði er mismunur þessara kerfa einkum fólgin í því að í stað mekanískrar þjöppunar er notuð termísk þjöppun. Hún byggist á því að ammóníak getur blandast vatni og því betur sem hitastigið er lægra. Á línuriti 1 sést styrkleiki lausnarinnar sem fall af þrýstingi og hitastigi og á línuriti 2 má sjá breytinguna á varmainnihaldi lausnarinnar fyrir hin ýmsu þrep rásarinnar.

Hringrásinni má lýsa á eftirfarandi hátt:

Þurrmettuð ammóníak gufa kemur út úr uppgufaranum (pkt 9) og mætir þar veikri vatns-ammóníaks lausn við uppgufunarþrýsting (pkt 4). Þetta blandast síðan saman í kældum varmaskipti (absorper) og úr verður sterk lausn við uppgufunarþrýsting og heldur herra hitastig en kalivatnið (pkt 1). Sterku lausninni er nú dælt upp í þéttþrýsting en um leið er lausnin hituð samkvæmt línuriti 1 (pkt 2). Sterka lausnin fer síðan inn í sjóðarann þar sem lausnin er hituð (t.d. með heitu vatni) og ammóníakið þannig soðið af (pkt 5) en eftir verður veik lausn (pkt 3). Ammóníakgufan er nú við háan þrýsting en enn er eitthvað af vatni í henni og fer hún því næst í gegnum rakaskilju (pkt 6). Síðan fer ammóníakið sína venjulegu hringrás þ.e. þéttir, þrýstingslökkun (þrottlunarloki) og uppgufari. Veika lausnin (pkt 3) fer í gegnum þrottlunarloka og er um leið kæld til að fullnægja kröfum línurits 1 (pkt 4). Hér mætast lausnirnar aftur og hringrásin lokast.

Grundvöllur útreikninga

Nauðsynlegt magn af heitu og köldu vatni er fengið með hefðbundnum varmafræðilegum útreikningum þ.e. með því að taka varmajafnvægi um hvert tæki kerfisins. Spurning er hversu stórum varmaskiptum á að gera ráð fyrir. Hvað kælivatnið varðar verður hér miðað við að hægt sé að halda absorper og þéttihitastigi 5°C herra en kælivatnið og kælivatnið nýtist um 10°C . Fyrir heita vatnið er gert ráð fyrir að hitastig veiku lausnarinnar út úr sjóðara sé 5°C lægra en upprunalegt hitastig heita vatnsins. Við hitunina 1-2 og kælinguna 3-4 er gert ráð fyrir að settur sé varmaskiptir þarna á milli og því ekki reiknað með heitu eða köldu vatni fyrir þessa þætti kerfisins.

Útreikningar og dæmi

Í útreikningum er miðað við að kerfið vinni við uppgufunarhitastigið -10°C en það er algengt fyrir framleiðslu á ís og til kælingar á matmatvælum. Gert verður ráð fyrir 3 hitastigum á heita vatninu, 60°C , 70°C og 80°C og 4 hitastigum á kalda vatninu 5°C , 10°C , 15°C og 20°C .

Hér verður miðað við ísframleiðslu 15 tonn/sólarhring sem krefst ca. 80.000 kcal/h og ísgeymslu sem krefst 5.000 kcal/h. Auðvelt er þó að aðlaga niðurstöður hvað þetta varðar því hér er um bein hlutföll að ræða.

Til að hægt sé að glöggva sig betur á útreikningunum verður hér tekið dæmi. Hiti kælivatns er 15°C og hiti heits vatns er 70°C . Út frá línuriti 1 sést að uppgufunarþrýstingur við -10°C er 3 at. Vegna kælivatnsins er ekki hægt að halda lægri hitastigi í absorper og þétti en 20°C . Þannig fæst punktur 1 á línuriti 1 og styrkur sterku lausnarinnar er því $c_s = 0,52$. Þéttiþrýstingur við 20°C er 8,75 at og þannig fæst punktur 2. Ekki er hægt að hita lausnina í meira en 65°C með 70°C vatni og þá er punktur 3 fenginn og styrkleiki veiku lausnarinnar verður $c_v = 0,45$. Hinir punktarnir á línuriti 1 leiða síðan hver af öðrum.

Punktana má síðan yfirfæra á línurit 2 en ekki er kannski augljóst hvernir punktur 5 er fenginn. Hann er fenginn með því að draga lóðrétta línu úr punkti 3 og láta hana skera viðkomandi þéttiþrýsting í hjálparferlaknyppinu. Þaðan er dregin lárétt lína í gufulínurnar og þannig fæst ástand ammóníakgufunnar út úr sjóðara.

Ástand í hverjum punkti er síðan lesið út úr þessum línuritum.

Pkt	c [kg/kg]	P [at]	T [°C]	h [kcal/kg]
1	0,52	3,0	20	7
2	0,52	8,75	52	42
3	0,45	8,75	65	47
4	0,45	3,0	31	9
5	0,98	8,75		422
6	1,0	8,75		390
7	1,0	8,75		105
8	1,0	3,0		105
9	1,0	3,0		390

Þægilegt er að miða fyrstu reikninga við að fá 1 kg/h af hreinu ammóníaki í gegnum kerfið. Nauðsynlegt magn af sterkari lausn verður þá:

$$f = \frac{c_5 - c_s}{c_s - c_v} = \frac{0,98 - 0,52}{0,52 - 0,45} = 6,57 \frac{\text{kg/h}}{\text{kg/h}}$$

Með því að taka varmajafnvægi um sjóðara, fæst nauðsynlegur varmi þar inn

$$Q_s = (f-1) \cdot (h_3 - h_2) + 1 \cdot (h_5 - h_2) = 5,57 \cdot (47 - 42) + 1 \cdot (422 - 42) = 408 \text{ kcal/h}$$

Vatnið nýtist samkvæmt framangreindum forsendum niður í $52^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C} = 57^\circ\text{C}$

Nauðsynlegt vatnsstreymi verður því:

$$m_{hv} = \frac{Q_s}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{408}{1 \cdot (70 - 57)} = 31,4 \text{ kg/h}$$

Með því að taka varmajafnvægi um absorper fæst sá varmi sem nauðsynlegt er að fjarlægja þar.

$$Q_A = (f-1) (h_4 - h_1) + 1 \cdot (h_9 - h_1) = 5,57 (9 - 7) + 1 \cdot (390 - 7) = 394 \text{ kcal/h}$$

Nauðsynlegt magn af kælivatni fyrir absorper verður því:

$$m_{kvl} = \frac{Q_A}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{394}{1 \cdot 10} = 39,4 \text{ kg/h}$$

Með því að taka varmajafnvægi um þéttinn fæst sá varmi sem nauðsynlegt er að fjarlægja þar

$$Q_b = 1 \cdot (h_6 - h_7) = 390 - 105 = 285 \text{ kcal/h}$$

Nauðsynlegt magn af kálivatni fyrir þétti verður því:

$$m_{kv2} = \frac{Q_b}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{285}{1 \cdot 10} = 28,5 \text{ kg/h}$$

Nauðsynleg afköst dælu fást út úr jöfnunni:

$$q_d = 23,4 \cdot (P_p - P_u) \cdot \frac{f}{\gamma}$$

Þar sem

$$\begin{aligned} P_p &= \text{Þéttiprýstingur} && [\text{at}] \\ P_u &= \text{Uppgufunarprýstingur} && [\text{at}] \\ \gamma &= \text{Eðlismassi} && [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

Nú fæst

$$q_d = 23,4 \cdot (8,75 - 3,0) \cdot 6,57/800 = 1,1 \text{ kcal/kg}$$

Út úr hverju kg/h af ammóníaki fást uppgufunarafköst

$$Q_u = h_9 - h_8 = 390 - 105 = 285 \text{ kcal/h}$$

Forsendur útreikninga gerðu ráð fyrir afkastapörf $Q_{TOT U} = 85000 \text{ kcal/h}$ og því er nauðsynlegt að ammóníaksstreymið sé

$$m_a = \frac{Q_{TOT U}}{Q_u} = \frac{85000}{285} \approx 300 \text{ kg/h}$$

Því er nauðsynlegt að margfalda niðurstöðurnar með 300 og þá fæst

$$\begin{aligned} m_{hv} &= 9420 \text{ kg/h} \approx 2,6 \text{ kg/s} \\ m_{kv1} &= 11820 \text{ kg/h} \approx 3,3 \text{ kg/s} \\ m_{kv2} &= 8550 \text{ kg/h} \approx 2,4 \text{ kg/s} \\ q_d &= 330 \text{ kcal/h} \approx 385 \text{ W} \end{aligned}$$

Í töflum 1, 2, 3 og 4 er að finna samsvarandi niðurstöður fyrir mismunandi tilfalli. Sum tilfallin eru merkt X og er það vegna þess að þau ganga ekki fræðilega og stafar það af því

að þegar sterka lausnin á að fara inn í sjóðarann er hún orðin það heit að það vatns sem til staðar er ónothæft til að sjóða ammóníak af og lausnin verður því áfram sterk.

Lokaorð

Eins og fram hefur komið er hér um mjög grófa könnunar athugun að ræða og allir reikningar miðast við taplaust kerfi. Næsta skref í þessu máli gæti hugsanlega verið að gera nákvæmari útreikninga fyrir hin ýmsu kerfi og athuga síðan gaumgæfilega kostnaðarhlið málsins. Ef samanburður við þjöppukerfi yrði hagstæður væri bygging tilraunakerfis athugandi.

Hér að aftan fylgir listi yfir heimildir sem gæti orðið gagnlegur þeim sem frekari útreikninga vilja framkvæma.

Hjörleifur Þór Jakobsson.

Heimildaskrá

Andersen S.A., 1959: Automatic Refrigeration. Meclaren & Sons Ltd,
Denmark

ASHRAE. Handbook of Fundamentals

Árni Ragnarsson, 1976: Notkun jarðvarma í frystiðnaði. Lokaverkefni
í vélaverkfræði, H.Í.

Cai Yihan, 1981: Present status of the utilization of geothermal energy
in the People's Republic of China. Sino-American Geothermal Resource
Conference, Tiajin, April 1981.

Danfoss A/S 1967: Kölemaskiner. Nordborg, April 1967.

Dannies J.H., 1951: Die Absorptionskältemaschine. Brücke Verlag, Kurt
Schmersow, Hannover.

Holman J.P., 1972: Heat Transfer. McGraw-Hill Kogaknsha Ltd.

Krex Helge E., 1974: Maskin Ståbi. Teknisk forlag.

Kristján Sæmundsson, 1970: Jarðhiti á Suðurlandsundirlendi og nýting hans.
Suðri, II, 101-160.

Macintire H.J., Hutchinson F.W. 1950: Refrigeration Engineering. John
Wiley & sons, New York.

Niebergall Wilhelm 1959: Handbuch der Kältetechnik, VII. Band. Springer
Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelber.

Ólafur Arnason 1976: Fiskiðnaðarstöð, verkefni í kálitækni II, unnið á
vormisseri 1976, óútgefið.

Pohlmann Maake-Eckert 1971: Taschenbuch für Kältetechniker. C.F. Müller
Verlag, Karlsruhe.

Reynolds G., 1970: Cooling with geothermal heat. Geothermics, Proceedings
of the United Nations symposium on the development and utilization
of geothermal resources, Pisa, Italy.

Sigurður Magnússon 1973: Absorptionskælikerfi, kuldaframleiðsla með nýtingu hitaorku. Tæknimál fiskiðjuvera, 2. tbl., september 1973.

Woolrich W.R., Bartlett L.H., 1948: Handbook of refrigerating engineering. D. Van Nostrand Company, Inc, New York.

Tafla 1

Nauðsynlegt magn af heitu vatni [kg/s] til að anna 85.000 kcal/h kælikerfi með uppgufunarhitastigi -10°C fyrir hin ýmsu tilfalli.

Hiti kælivatns	Hiti heita vatnsins		
	60°C	70°C	80°C
5°C	1,3	1,0	0,7
10°C	2,7	1,6	1,1
15°C	x	2,6	1,5
20°C	x	x	3,7

Tafla 2

Nauðsynlegt magn af kælivatni [kg/s] í absorper til að anna 85000 kcal/h kælikerfi með uppgufunarhitastigi -10°C fyrir hin ýmsu tilfalli.

Hiti kælivatns	Hiti heita vatnsins		
	60°C	70°C	80°C
5°C	3,3	3,3	3,3
10°C	3,3	3,3	3,4
15°C	x	3,3	3,4
20°C	x	x	2,7

Tafla 3

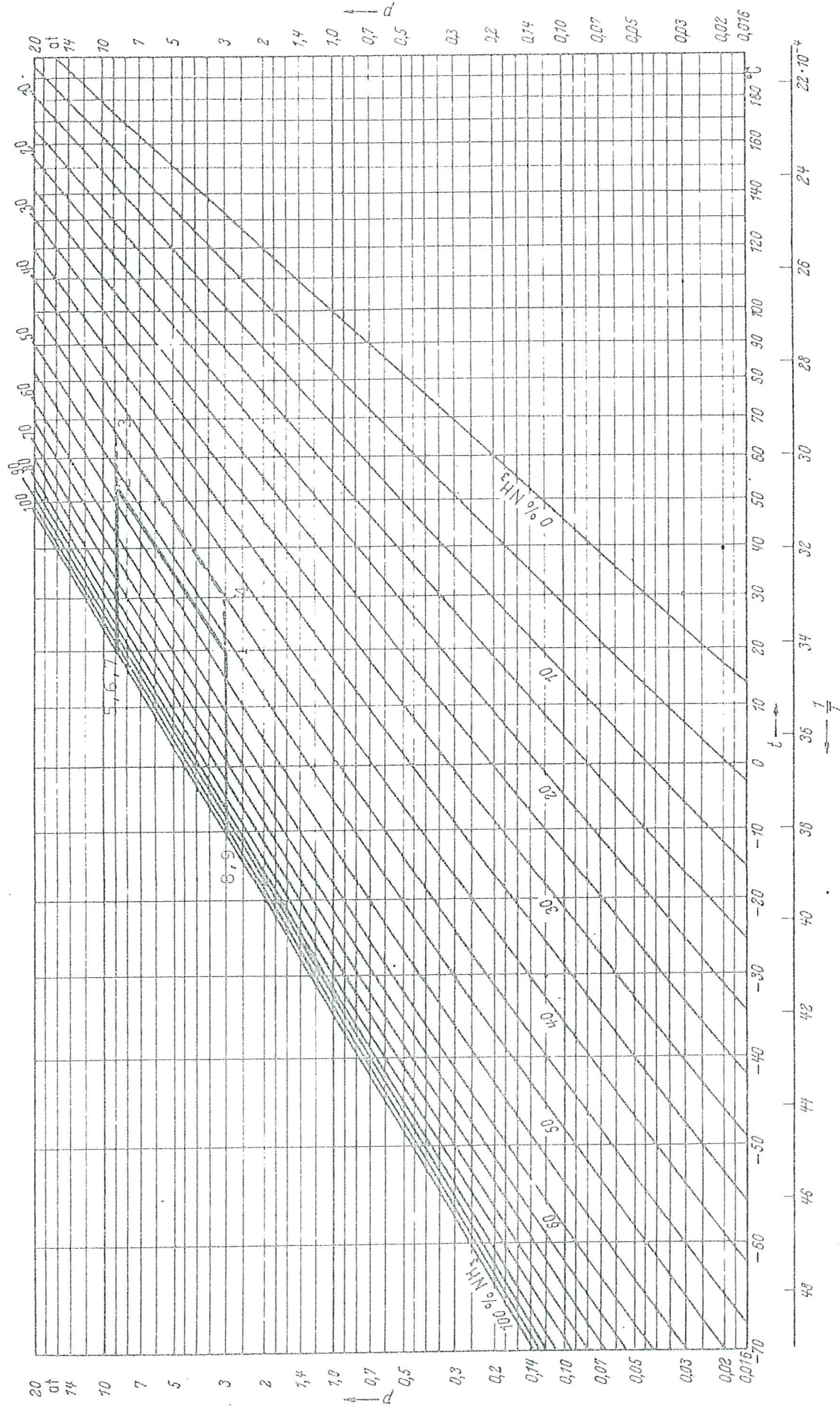
Nauðsynlegt magn af kælivatni [kg/s] í þétti til að anna 85.000 kcal/h kælikerfi með uppgufunarhitastig -10°C fyrir hin ýmsu tilfalli.

Hiti kælivatns	Hiti heita vatnsins		
	60°C	70°C	80°C
5°C	2,5	2,5	2,5
10°C	2,4	2,4	2,4
15°C	x	2,4	2,5
20°C	x	x	2,3

Tafla 4

Nauðsynleg afköst dælu [W] til að anna 85.000 kcal/h kælikerfi með upp-
gufunarhitastig -10°C fyrir hin ýmsu tilfalli.

Hiti kælivatns	Hiti heita vatnsins		
	60°C	70°C	80°C
5°C	70	55	40
10°C	250	150	100
15°C	x	385	225
20°C	x	x	690



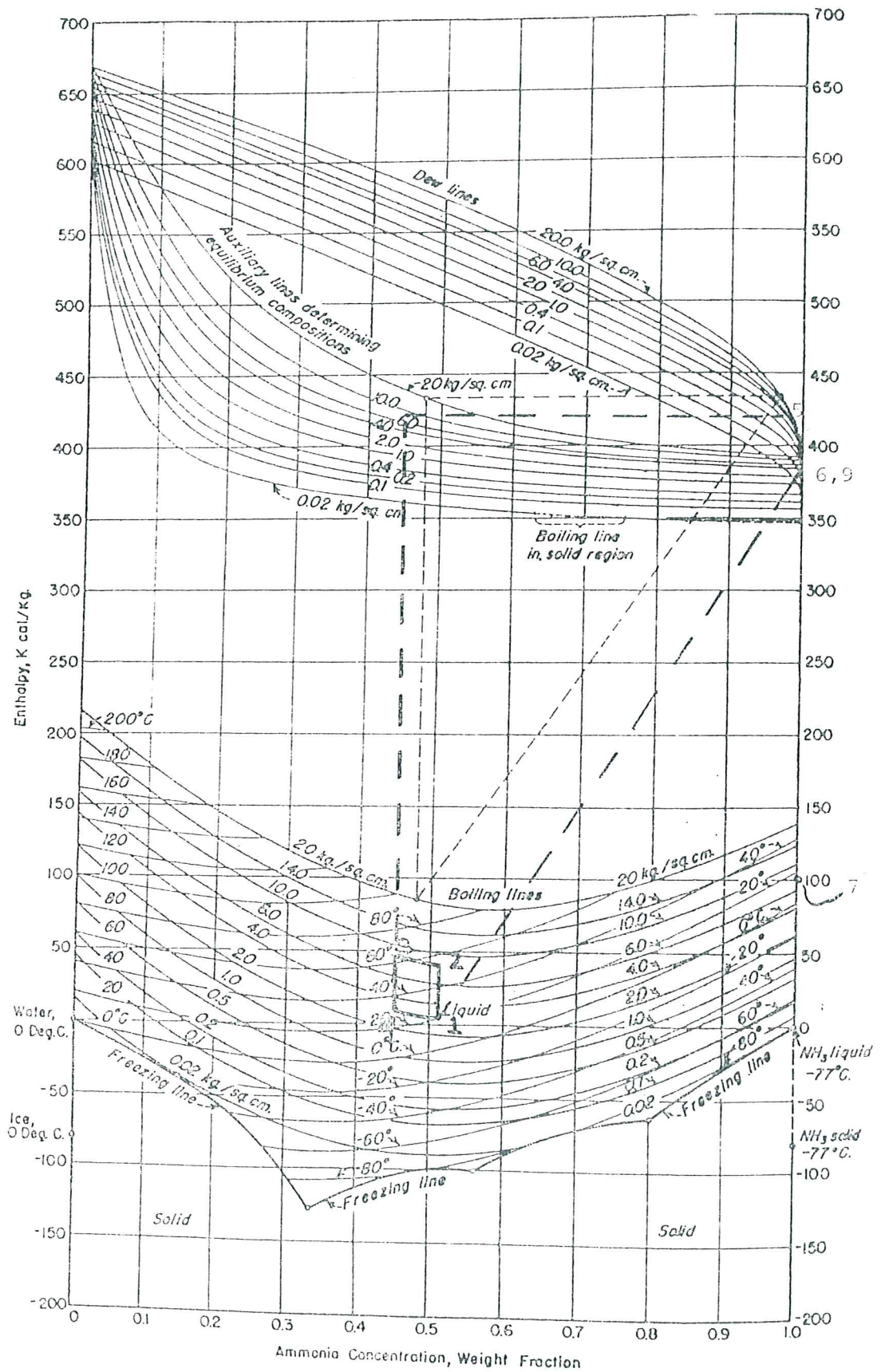
lg p, 1/T-Diagramm für Ammoniak-Wassergemische

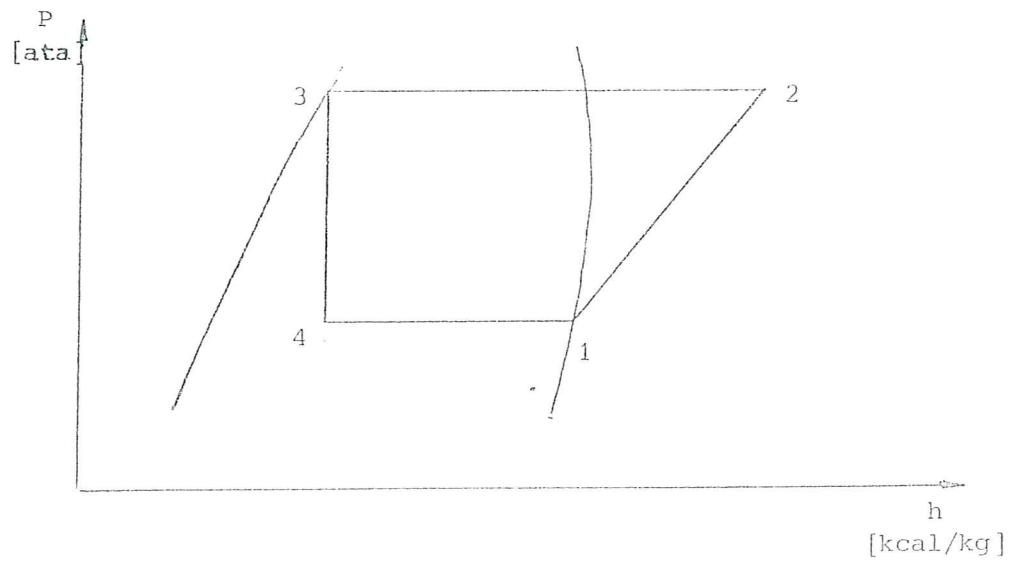
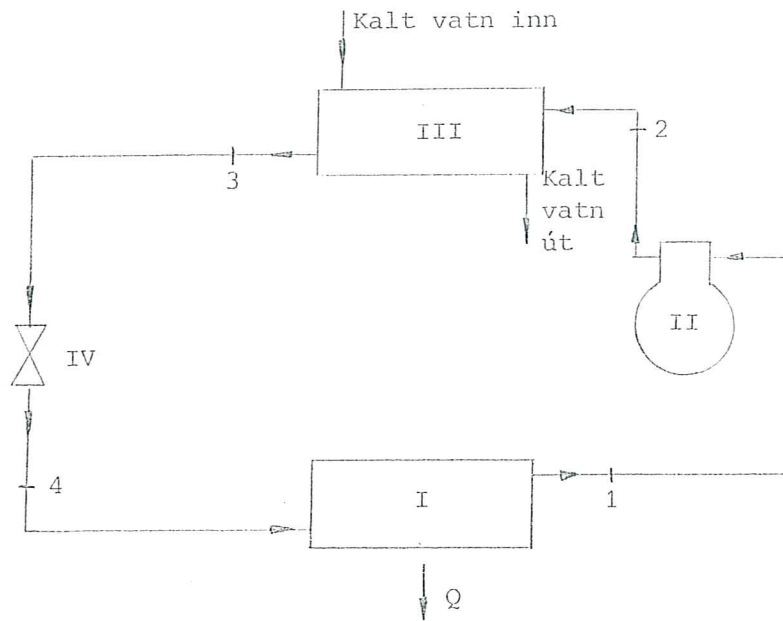
Nach BOŠNJAČKOVIĆ und WUCHERER,

entnommen: VDI 1006,

Kältemaschinen-Regeln: Absorptions-Kältemaschinen,

Berlin: VDI-Verlag G.m.b.H. 1943

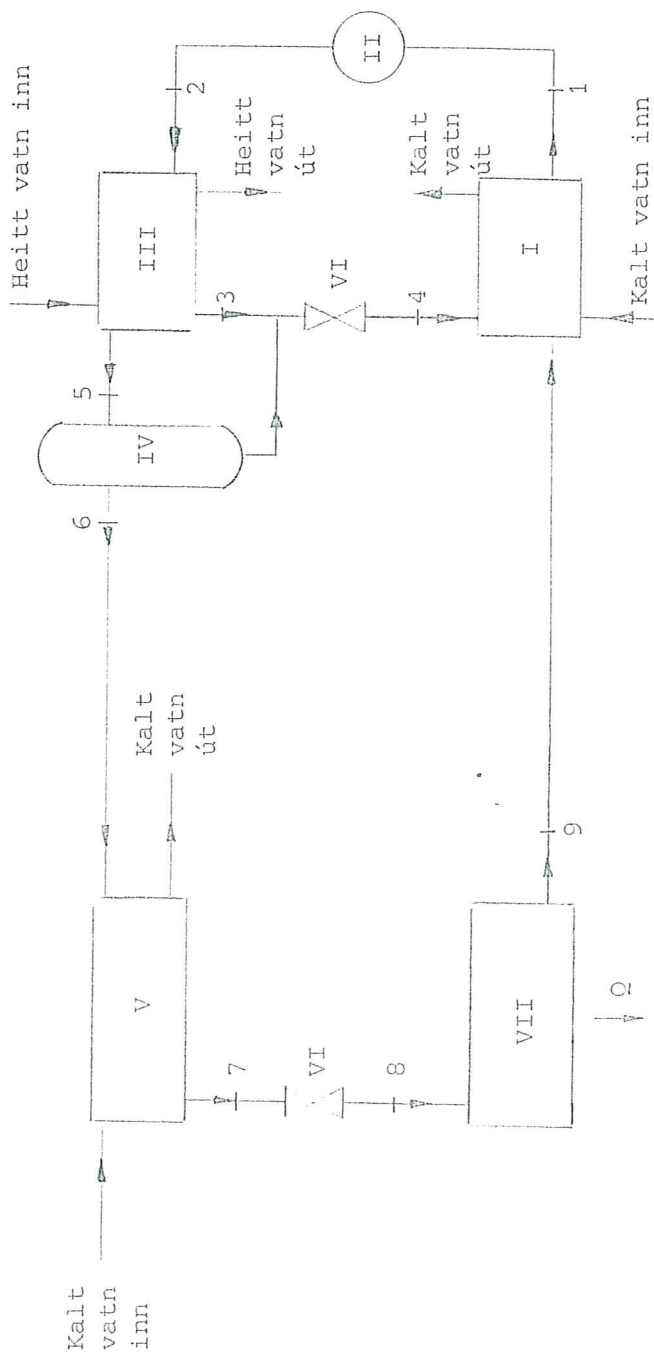




Mynd 1 Þjöppu kælikerfi

- I Uppgufari
- II Þjappa
- III Þéttir
- IV Þrottlunarventill

Mynd 2 Absorption kálfkerfi (ammóníak-vatn)



- I Absorper
- II Dæla
- III Sjóðari
- IV Vöskilja
- V Péttir
- VI Prottlunarventill
- VII Uppgufari

Listi yfir tákni og útskýringar

c	: Ammóníaksstyrkleiki blöndunar	
P	: Þrýstingur	[at]
T	: Hitastig	[°C]
h	: Varmainnihald	[kcal/kg]
f	: Nauðsynlegt magn af sterkri lausn fyrir hvert kg/h af ammóníaki	
Q_s	: Varmi í sjóðara	[kcal/h]
m_{hv}	: Massastreymi heita vatnsins í sjóðara	[kg/h]
C_p	: Varmarýmd vatns	[kcal/kg°C]
T	: Hitamismunur	[°C]
Q_A	: Varmi fjarlægður úr absorper	[kcal/h]
m_{kv1}	: Massastreymi kálivatns í absorper	[kg/h]
Q_p	: Varmi fjarlægður í þétti	[kcal/h]
m_{kv2}	: Massastreymi kálivatns í þétti	[kg/h]
q_d	: Nauðsynleg afköst dælu	[kcal/kg]
P_p	: Þéttiþrýstingur	[at]
P_u	: Uppgufunarþrýstingur	[at]
γ	: Eðlismassi ammóník-vatnsblöndu	[kg/m ³]
Q_u	: Varmi í uppgufara	[kcal/h]
m_a	: Massastreymi ammóníaks í kerfinu	[kg/h]
$Q_{TOT U}$: Heildarafköst kerfisins	[kcal/h]