



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Optimering af propan/isobutan varmepumpe til fjernvarme i kaskade med vanddamp

Hans Madsbøll, Teknologisk Institut
2015

Titel:

Optimering af propan/isobutan varmepumpe til fjernvarme i kaskade med vanddamp kompressionsanlæg

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Køle- og Varmepumpeteknik

Marts 2015

Forfatter: Hans Madsbøll, Teknologisk Institut

Indholdsfortegnelse

Opsummering	4
1. Indledning	5
2. Base line – simpel kølekreds	6
3. Underkøling af væske til 43 °C vha. fjernvarme retur, 1-trins kompression	8
4. Multistage kompressor med trinvis udtag og gradvis opvarmning af fjernvarmevandet	11
5. Parallelkobling af kompressorer	16
6. Yderligere underkøling af kølemiddel fra 40 °C til næsten 0 °C vha. varmekilden (havvand).....	21

Opsummering

Der er regnet på i alt fire forskellige konfigurationer af en propan/isobutan varmepumpe til fjernvarme under idealiserede forhold, specielt med henblik på at undersøge en multistage kompressor med udtag efter nogle af trinene samt et par alternativer til denne løsning.

Det viste sig, at metoden med udtag i en multistage kompressor forbedrer COP i forhold til den simple kredspocess – og det svarer helt til at parallelkoble en række kompressorer, som gradvist opvarmer fjernvarmevandet.

En anden mulighed er at underkøle Propan/Isobutan kølemidlet med returledningen fra fjernvarmen – en løsning der samtidig er relativ enkel at realisere.

Det viser sig, at de tre mulige løsninger giver næsten samme COP, inden for meget få procenter. Der er ikke nogen klar 'vinder' fra et termodynamisk synspunkt, så det er i langt højere grad en praktisk og økonomisk afgørelse.

Generelt viser isobutan (R600a) sig at have ca. 3 – 6 % bedre COP end propan (R290). Ulempen er, at der kræves 2 - 3 gange så stor slagvolumen for kompressoren, og det er derfor en lidt større investering.

Underkølingen af kølemidlet kan fortsættes fra de ca. 40 °C til næsten 0 °C ved at benytte varmekilden, dvs. havvandet, som så til gengæld opvarmes lidt, ca. 1,5 °C. Forbedringen i COP ligger på ca. 2 procent, så gevinsten er minimal, og det er tvivlsomt, om det vil være rentabelt.

Der kan opnås langt større COP forbedringer, hvis der er mulighed for at operere med en lidt lavere kondenseringstemperatur for varmepumpen, eventuelt ved at booste den sidste temperaturstigning med biobrændsel eller lignende.

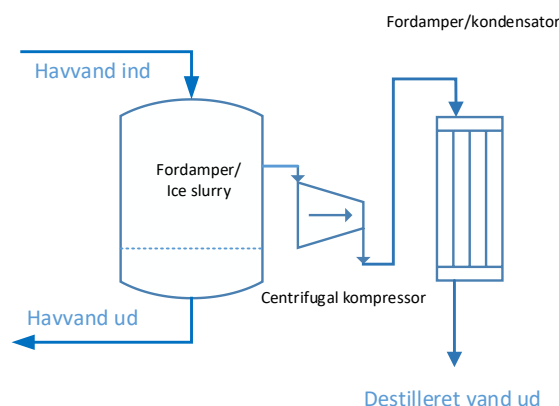
1. Indledning

Vanddamp kompressoranlægget, som tager energien fra havvandet, er fælles for alle konfigurationer, som det nederste anlæg i kaskaden. Udgangspunktet for beregningerne er en kuldeydelse for dette anlæg på 1 MW. Der regnes gennemgående på to eksempler, hhv. vinter- og sommerdrift. Erfaringsmæssigt ligger en årsmiddel nogenlunde midt i mellem de to tilfælde.

Temperaturen af havvandet antages at være 2 °C om vinteren og 20 °C om sommeren. Der antages overalt en temperaturdifferens på 3 °C i varmevekslerne, undtagen i vanddampanlæggets fordamper og kondensator, hvor der antages en temperaturdifferens på 1 °C. Der antages også en kompressor virkningsgrad på 75% (70% for vanddamp kompressoren), og der tages ikke hensyn til eventuelt hjælpeudstyr, tryktab mm. Der er derfor alene tale om betragtninger vedrørende system og kølemiddel, renset for andre forhold.

H₂O kredsen:

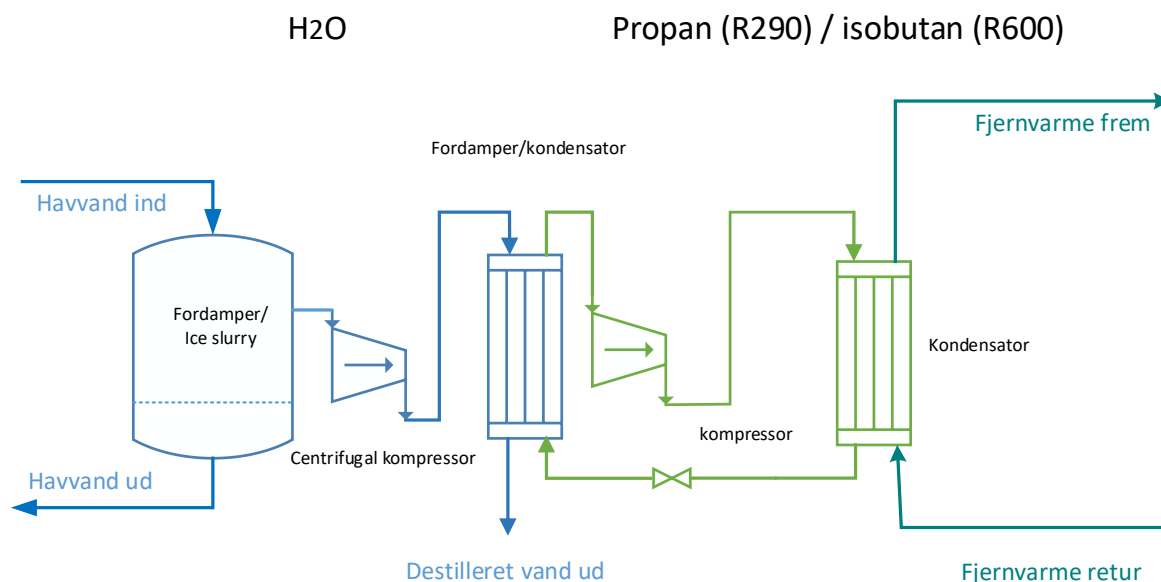
H₂O



		Vinter	Sommer	
Kuldeydelse		1 MW	1MW	2,87 MW
Havvand ind		2 °C	20 °C	20 °C
Havvand ud		Ice slurry (op til 15%)	18,25 °C	15 °C
Isproduktion pr. time		10,7 ton/h (14-15 m ³ /h)	-	-
Havvand flowrate		48 kg/s (172 m ³ /h)	48 kg/s (172 m ³ /h)	48 kg/s (172 m ³ /h)
Kompressor volumen flowrate		97 m ³ /s	28 m ³ /s	97 m ³ /s
Kompressor masse flowrate		0,402 kg/s (1,4 m ³ destilleret vand pr. time)	0,408 kg/s (1,4 m ³ /h vand)	1,17 kg/s (4,2 m ³ /h vand)
H ₂ O anlæg	T ford	-2 °C	17,25 °C	14 °C
	T kond	4 °C	20 °C	20 °C
Effekt forbrug H ₂ O (70% eff)		40 kW	19 kW	104 kW
VP ydelse		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
COP H ₂ O anlæg		25	52	28

2. Base line – simpel kølekreds

System skitse:



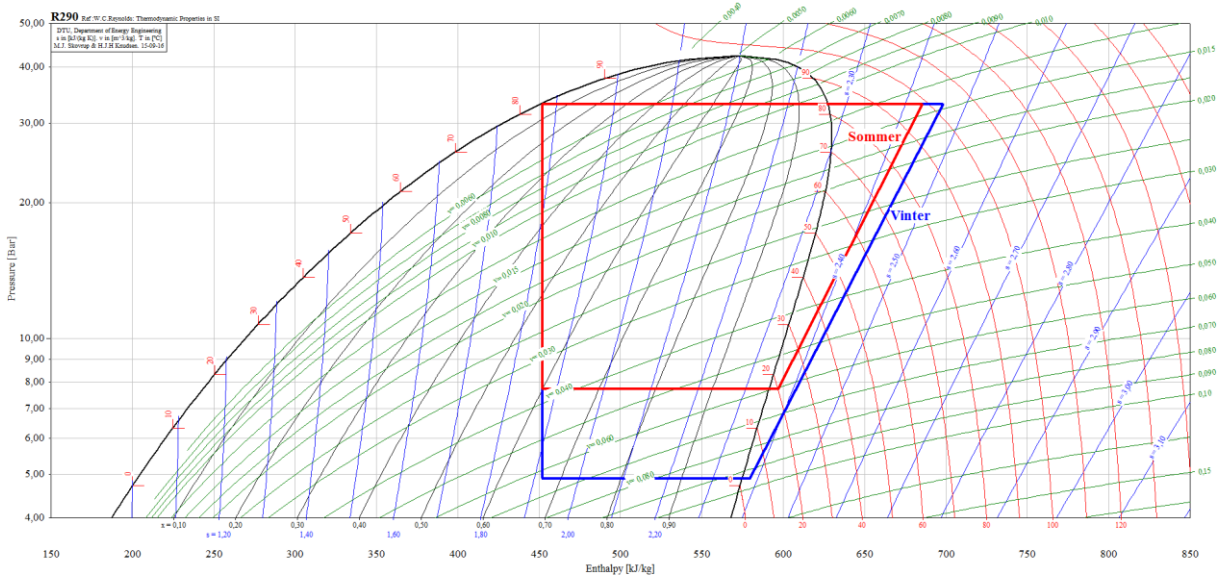
R 290 (propan):

	Vinter		Sommer	
Fordamper ydelse	1,04 MW		1,02 MW	2,97 MW
R290 masse flowrate	8,18 kg/s		7,06 kg/s	20,56 kg/s
R290 volumen flowrate	0,775 m ³ /s 2790 m ³ /h		0,427 m ³ /s 1538 m ³ /h	1,24 m ³ /s 4480 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
Fjernvarme retur	40 °C		40 °C	
Fjernvarme frem	80 °C		80 °C	
VP ydelse	2,01 MW		1,65 MW	4,79 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)	971 kW		627 kW	1825 kW
COP R290 anlæg	2,07		2,63	2,63
COP total VP kaskade anlæg	1,99		2,55	2,49

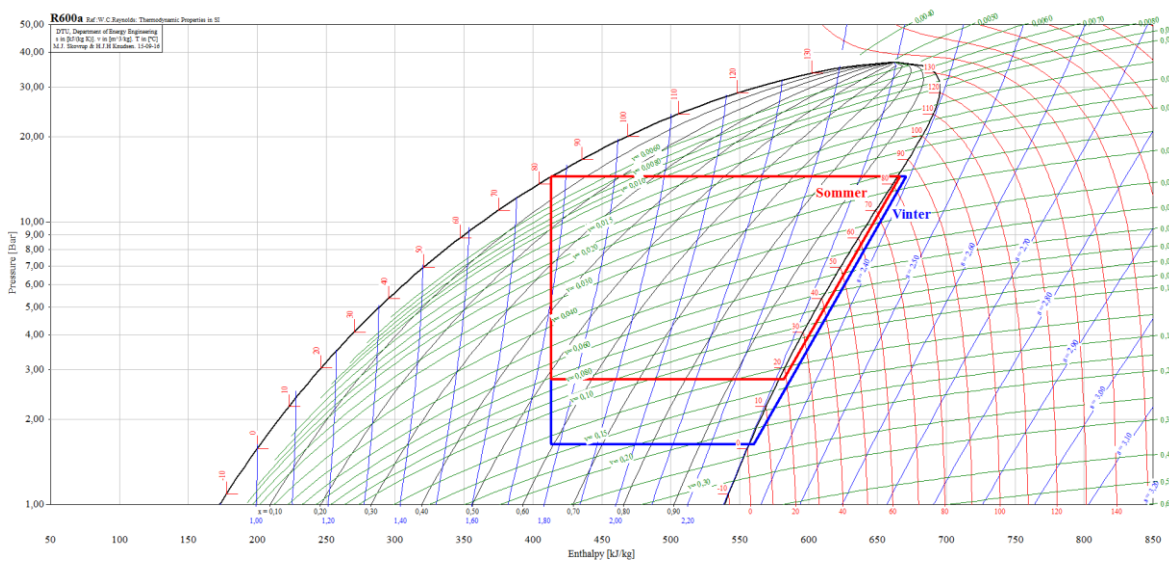
R 600a (isobutan):

	Vinter		Sommer	
Fordamper ydelse	1,04 MW		1,02 MW	2,97 MW
R600a masse flowrate	7,17 kg/s		6,11 kg/s	17,8 kg/s
R600a volumen flowrate	1,65 m ³ /s 5923 m ³ /h		0,85 m ³ /s 3065 m ³ /h	2,48 m ³ /s 8925 m ³ /h
R 600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
Fjernvarme retur	40 °C		40 °C	
Fjernvarme frem	80 °C		80 °C	
VP ydelse	1,82 MW		1,53 MW	4,50 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)	782 kW		507 kW	1675 kW
COP R290 anlæg	2,33		3,01	3,01
COP total VP kaskade anlæg	2,22		2,90	2,81

R290 (Propan) – h-logp diagram:

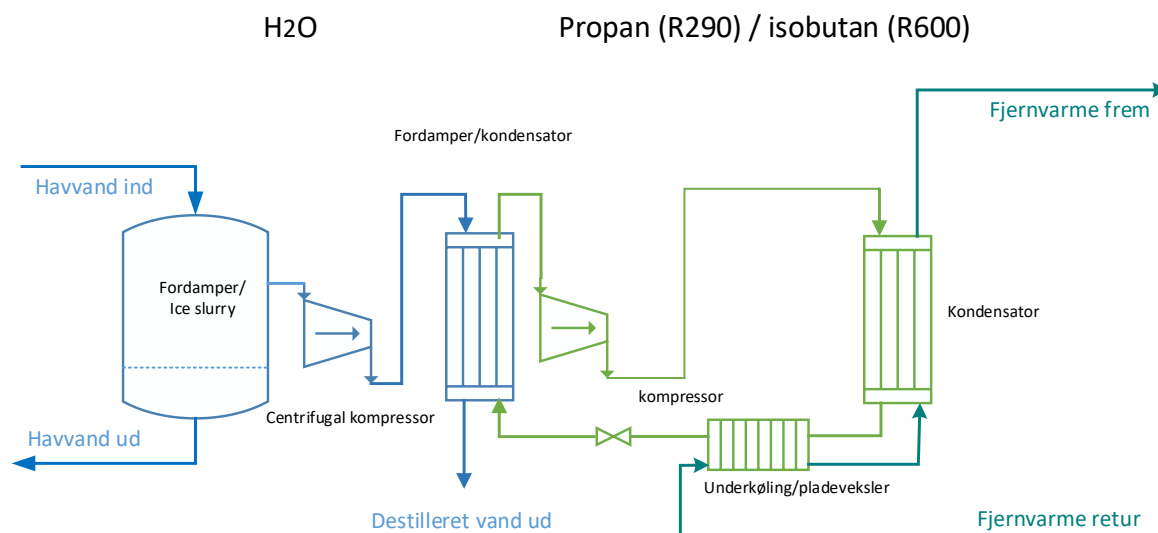


R600a (Isobutan) – h-logp diagram:



3. Underkøling af væske til 43 °C vha. fjernvarme retur, 1-trins kompression

System skitse:



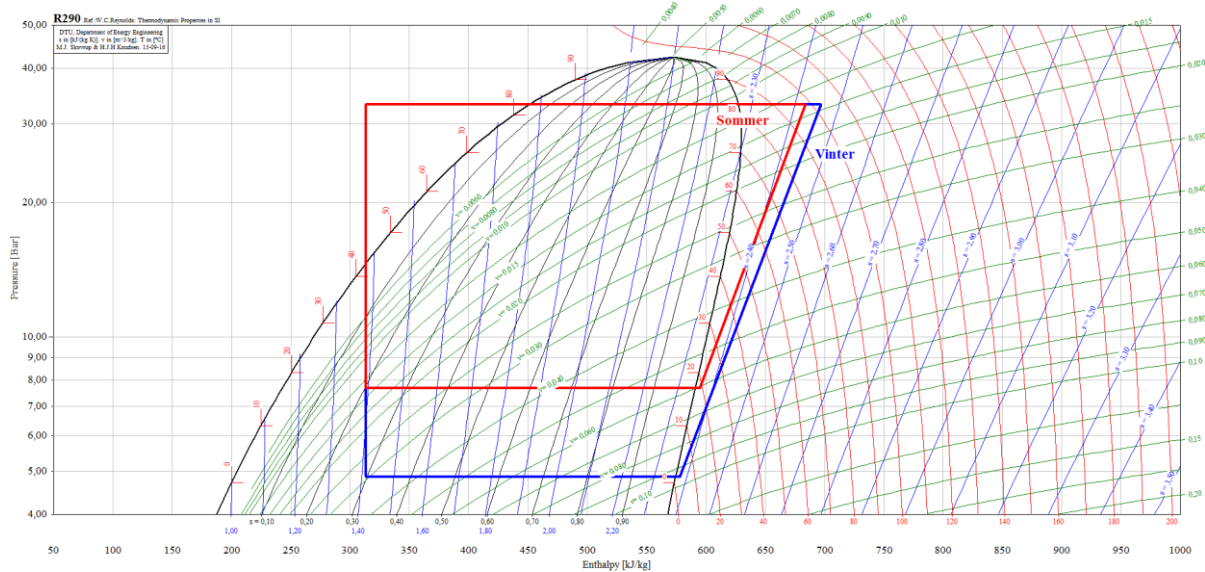
R290 (propan):

		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
R290 masse flowrate		3,94 kg/s	3,63 kg/s	20,56 kg/s
R290 volumen flowrate		0,37 m ³ /s 1345 m ³ /h	0,22 m ³ /s 790 m ³ /h	0,64 m ³ /s 2300 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
	T væske	43 °C	43 °C	
Fjernvarme retur		40 °C	40 °C	
Fjernvarme frem		80 °C	80 °C	
VP ydelse		1,51 MW	1,35 MW	3,94 MW
- Kondensator		0,97 MW	0,85 MW	2,48 MW
- Subcooler		0,54 MW	0,50 MW	1,46 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		468 kW	322 kW	1825 kW
COP R290 anlæg		3,22	4,17	4,17
COP total VP kaskade anlæg		2,97	3,92	3,75

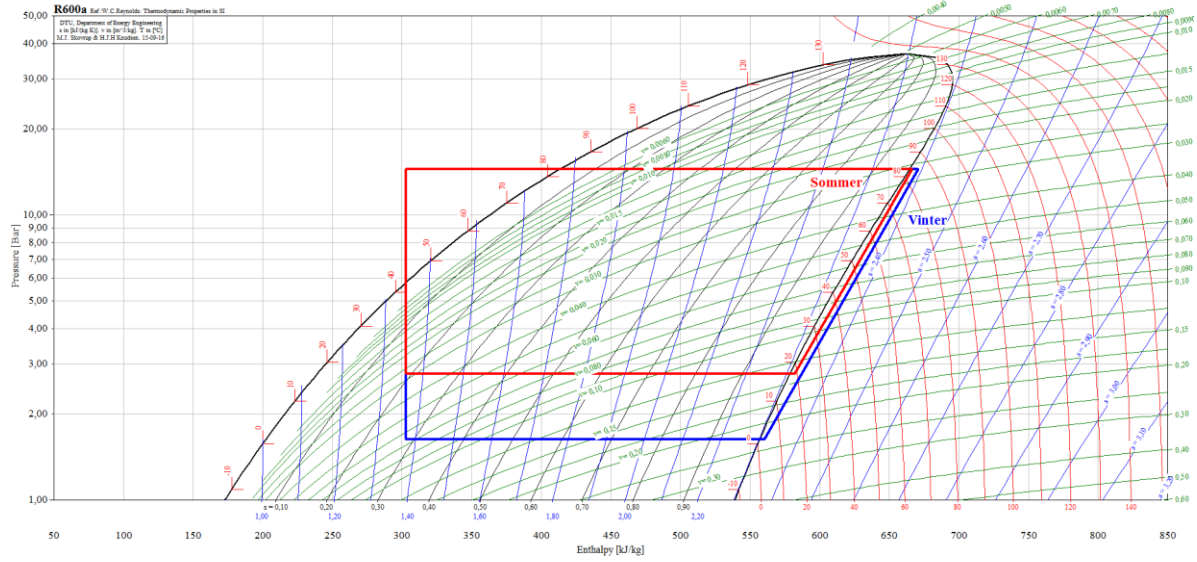
R 600a (isobutan):

		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
R600a masse flowrate		4,08 kg/s	3,69 kg/s	10,7 kg/s
R600a volumen flowrate		0,94 m ³ /s 3375 m ³ /h	0,51 m ³ /s 1850 m ³ /h	1,49 m ³ /s 5387 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
	T væske	43 °C	43 °C	
Fjernvarme retur		40 °C	40 °C	
Fjernvarme frem		80 °C	80 °C	
VP ydelse		1,49 MW	1,33 MW	3,87 MW
- Kondensator		1,04 MW	0,92 MW	2,68 MW
- Subcooler		0,45 MW	0,41 MW	1,19 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		446 kW	306 kW	891 kW
COP R290 anlæg		3,33	4,33	4,33
COP total VP kaskade anlæg		3,06	4,06	3,88

R290 (Propan) h-logp diagram:

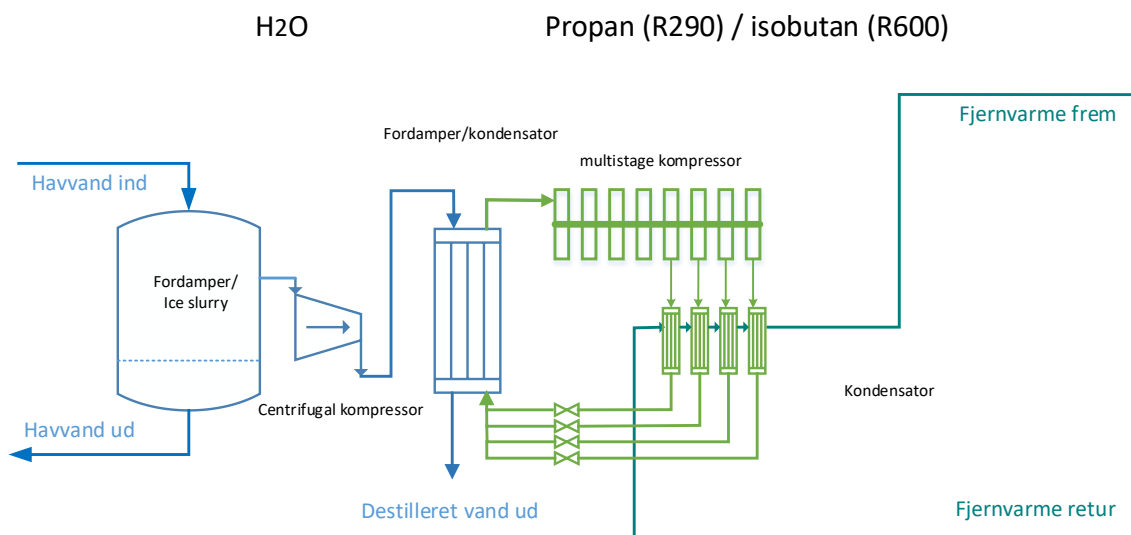


R 600a (isobutan) – h-logp diagram:



4. Multistage kompressor med trinvis udtag og gradvis opvarmning af fjernvarmevandet

System skitse:



Eksemplet er udregnet for en 8-trins kompressor svarende til et temperaturløft på ca. 10 °C pr. trin fra ca. 0 °C til ca. 80 °C. Dette svarer til et trykforhold pr. trin på ca. 1,27 for R290 og ca. 1,31 for R600a, hvilket er temmelig lavt for en multistage centrifugal kompressor.

Dette betyder, at der er udtag på 5., 6., 7. og 8. trin, hvilket svarer til opvarmning af fjernvarmevandet fra 40 °C til 80 °C med ca. 10 °C pr. trin. Der kan være forskellige strategier for, hvor meget masse flow der udtages pr. trin. I dette tilfælde er masse flow afpasset, så fjernvarmevandet opvarmes 10,0 °C pr. udtag.

R290 (propan):

		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse totalt		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
1. udtag				
Fordamper ydelse		0,292 MW	0,282 MW	0,821 MW
R290 masse flowrate		1,110 kg/s	1,003 kg/s	2,921 kg/s
R290 volumen flowrate		0,105 m ³ /s 379 m ³ /h	0,061 m ³ /s 219 m ³ /h	0,178 m ³ /s 638 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	53 °C	53 °C	
	T væske	43 °C	43 °C	
Fjernvarme retur		40 °C	40 °C	
Fjernvarme frem		50 °C	50 °C	
VP ydelse		0,384 MW	0,335 MW	0,975 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		92,1 kW	53,8 kW	156,6 kW
COP R290 anlæg		4,171	6,224	6,224

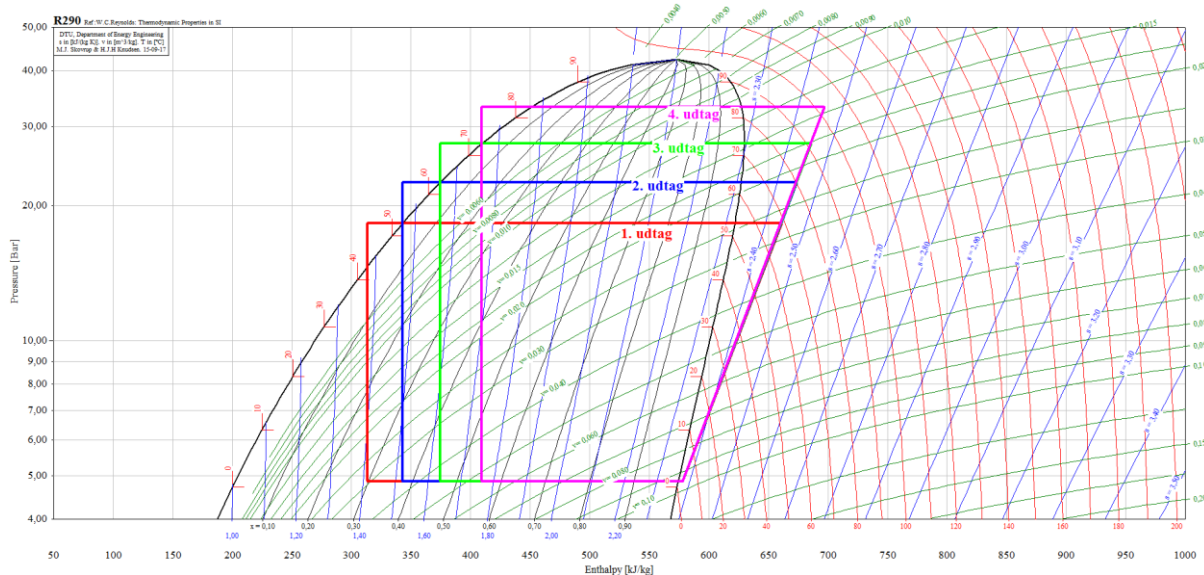
2. udtag				
Fordamper ydelse		0,272 MW	0,265 MW	0,772 MW
R290 masse flowrate		1,168 kg/s	1,057 kg/s	3,078 kg/s
R290 volumen flowrate		0,111 m ³ /s 398 m ³ /h	0,064 m ³ /s 230 m ³ /h	0,186 m ³ /s 670 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	63 °C	63 °C	
	T væske	53 °C	53 °C	
Fjernvarme retur		50 °C	50 °C	
Fjernvarme frem		60 °C	60 °C	
VP ydelse		0,384 MW	0,335 MW	0,975 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		111,8 kW	70,1 kW	204,1 kW
COP R290 anlæg		3,434	4,779	4,779
3. udtag				
Fordamper ydelse		0,250 MW	0,247 MW	0,719 MW
R290 masse flowrate		1,241 kg/s	1,128 kg/s	3,284 kg/s
R290 volumen flowrate		0,117 m ³ /s 423 m ³ /h	0,068 m ³ /s 246 m ³ /h	0,198 m ³ /s 716 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	73 °C	73 °C	
	T væske	63 °C	63 °C	
Fjernvarme retur		60 °C	60 °C	
Fjernvarme frem		70 °C	70 °C	
VP ydelse		0,384 MW	0,335 MW	0,975 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		133,5 kW	87,9 kW	255,9 kW
COP R290 anlæg		2,874	3,81	3,81
4. udtag				
Fordamper ydelse		0,225 MW	0,227 MW	0,661 MW
R290 masse flowrate		1,337 kg/s	1,219 kg/s	3,549 kg/s
R290 volumen flowrate		0,127 m ³ /s 456 m ³ /h	0,074 m ³ /s 266 m ³ /h	0,215 m ³ /s 775 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
	T væske	73 °C	73 °C	
Fjernvarme retur		70 °C	70 °C	
Fjernvarme frem		80 °C	80 °C	
VP ydelse		0,384 MW	0,335 MW	0,975 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		158,6 kW	108,3 kW	315,3 kW
COP R290 anlæg		2,421	3,09	3,09
Samlet for hele VP				
VP ydelse - total		1,536 MW	1,340 MW	3,90 MW
VP effektforbrug - total		496,0 kW	320,1 kW	932 kW
VP R290 COP		3,10	4,19	4,19
COP total VP kaskade anlæg		2,87	3,94	3,77

R600a (isobutan):

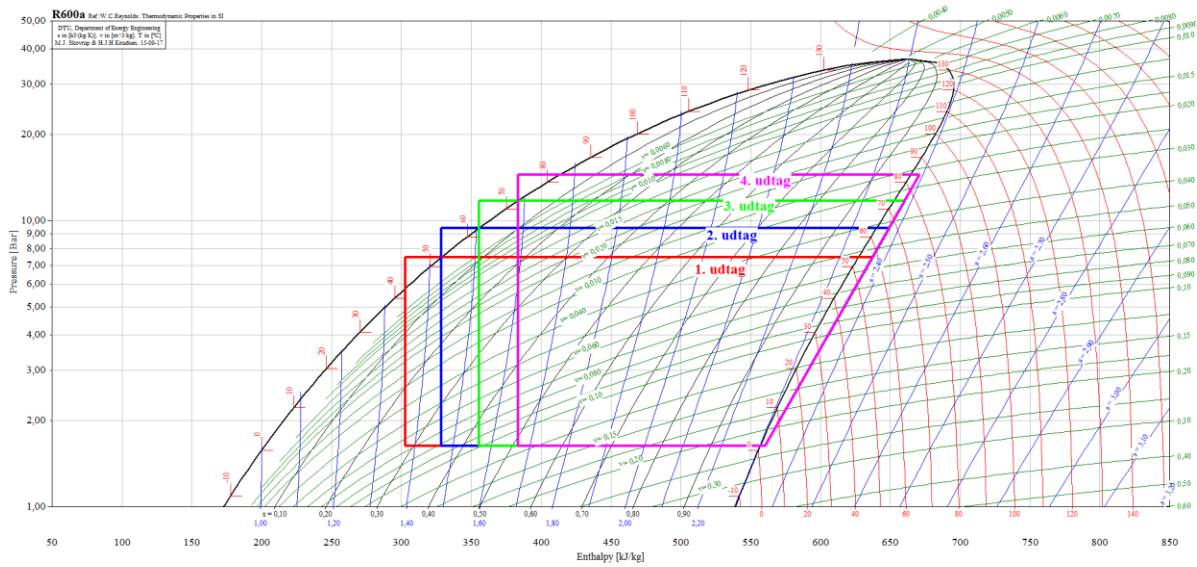
		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse totalt		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
1. udtag				
Fordamper ydelse		0,288 MW	0,278 MW	0,809 MW
R600a masse flowrate		1,130 kg/s	1,005 kg/s	2,926 kg/s
R600a volumen flowrate		0,259 m ³ /s 934 m ³ /h	0,140 m ³ /s 504 m ³ /h	0,408 m ³ /s 1467 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 C	17 C	
	T kond	53 C	53 C	
	T væske	43 C	43 C	
Fjernvarme retur		40 C	40 C	
Fjernvarme frem		50 C	50 C	
VP ydelse		0,375 MW	0,329 MW	0,958 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		86,9 kW	50,8 kW	147,9 kW
COP R600a anlæg		4,314	6,471	6,471
2. udtag				
Fordamper ydelse		0,270 MW	0,263 MW	0,766 MW
R600a masse flowrate		1,182 kg/s	1,052 kg/s	3,063 kg/s
R600a volumen flowrate		0,271 m ³ /s 977 m ³ /h	0,146 m ³ /s 527 m ³ /h	0,425 m ³ /s 1535 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	63 °C	63 °C	
	T væske	53 °C	53 °C	
Fjernvarme retur		50 °C	50 °C	
Fjernvarme frem		60 °C	60 °C	
VP ydelse		0,375 MW	0,329 MW	0,958 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		104,7 kW	65,5 kW	190,7 kW
COP R600a anlæg		3,582	5,019	5,019
3. udtag				
Fordamper ydelse		0,251 MW	0,248 MW	0,722 MW
R600a masse flowrate		1,245 kg/s	1,109 kg/s	3,229 kg/s
R600a volumen flowrate		0,286 m ³ /s 1029 m ³ /h	0,154 m ³ /s 556 m ³ /h	0,448 m ³ /s 1619 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	73 °C	73 °C	
	T væske	63 °C	63 °C	
Fjernvarme retur		60 °C	60 °C	
Fjernvarme frem		70 °C	70 °C	
VP ydelse		0,375 MW	0,329 MW	0,958 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		123,7 kW	81,1 kW	236,1 kW
COP R600a anlæg		3,032	4,057	3,81

4. udtag				
Fordamper ydelse		0,230 MW	0,231 MW	0,673 MW
R600a masse flowrate		1,262 kg/s	1,180 kg/s	3,436 kg/s
R600a volumen flowrate		0,262 m ³ /s 1094 m ³ /h	0,164 m ³ /s 591 m ³ /h	0,478 m ³ /s 1721 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
	T væske	73 °C	73 °C	
Fjernvarme retur		70 °C	70 °C	
Fjernvarme frem		80 °C	80 °C	
VP ydelse		0,375 MW	0,329 MW	0,958 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		144,4 kW	97,9 kW	285,1 kW
COP R600a anlæg		2,596	3,359	3,09
Samlet for hele VP				
VP ydelse – total		1,500 MW	1,316 MW	3,83 MW
VP effektforbrug – total		459,7 kW	295,3 kW	860 kW
VP R290 COP		3,26	4,46	4,46
COP total VP kaskade anlæg		3,00	4,18	3,98

R290 (Propan) h-logp diagram:

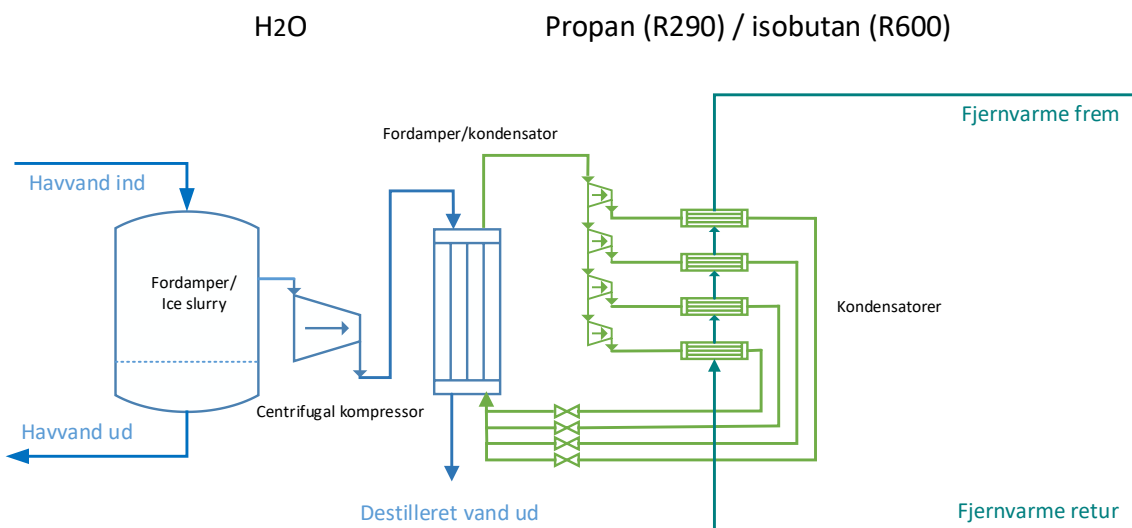


R 600a (isobutan) – h-logp diagram:



5. Parallelkobling af kompressorer

System skitse:



Rent køleteknisk svarer metoden i det foregående afsnit med udtag undervejs i en multistage kompressor helt til situationen, hvor en række parallelkoblede kompressorer gradvist opvarmer fjernvarmevandet. Det er derfor nøjagtig den samme udregning, som under **afsnit 4** er gældende for de fire parallelkoblede kompressorer.

I stedet for at gentage beregningen kan der regnes på en anden strategi for fordelingen mellem kompressorer. I tilfældet med de parallelkoblede kompressorer vil de typisk være ens og dermed indbyrdes have samme masse og volumenstrøm, hvilket ikke nødvendigvis giver ens opvarmning af fjernvarmevandet (dog stadig ca. 10 °C).

R290 (propan):

		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse totalt		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
1. Kompressor				
Fordamper ydelse		0,313 MW	0,300 MW	0,874 MW
R290 masse flowrate		1,20 kg/s	1,092 kg/s	3,180 kg/s
R290 volumen flowrate		0,113 m ³ /s 409 m ³ /h	0,066 m ³ /s 238 m ³ /h	0,192 m ³ /s 693 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	53,9 °C	55,0 °C	
	T væske	43,9 °C	45,0 °C	
Fjernvarme retur		40 °C	40 °C	
Fjernvarme frem		50,9 °C	52,0 °C	
VP ydelse		0,414 MW	0,361 MW	1,051 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		100,9 kW	61,4 kW	178,8 kW
COP R290 anlæg		4,096	5,879	5,879

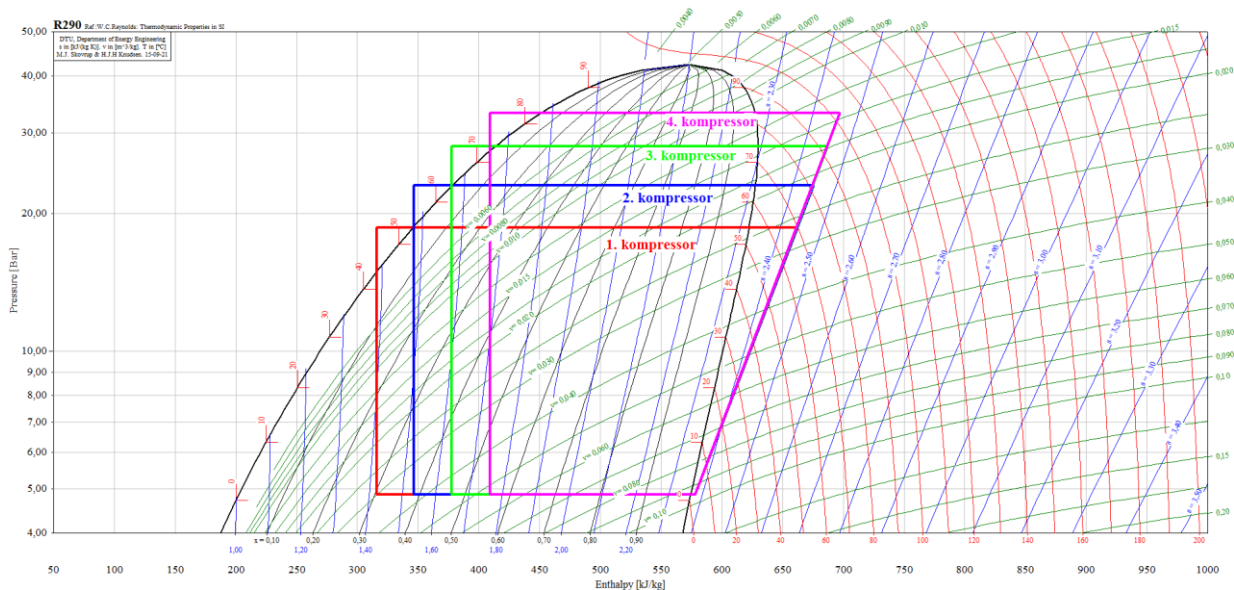
2. Kompressor				
Fordamper ydelse		0,275 MW	0,264 MW	0,769 MW
R290 masse flowrate		1,20 kg/s	1,092 kg/s	3,180 kg/s
R290 volumen flowrate		0,113 m ³ /s 409 m ³ /h	0,066 m ³ /s 238 m ³ /h	0,192 m ³ /s 693 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	64,2 °C	65,7 °C	
	T væske	54,2 °C	55,7 °C	
Fjernvarme retur		50,9 °C	52,0 °C	
Fjernvarme frem		61,2 °C	62,7 °C	
VP ydelse		0,392 MW	0,340 MW	0,990 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		116,7 kW	75,9 kW	221,0 kW
COP R290 anlæg		3,358	4,483	4,483
3. Kompressor				
Fordamper ydelse		0,238 MW	0,232 MW	0,676 MW
R290 masse flowrate		1,2 kg/s	1,092 kg/s	3,180 kg/s
R290 volumen flowrate		0,113 m ³ /s 409 m ³ /h	0,066 m ³ /s 238 m ³ /h	0,192 m ³ /s 693 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	74,0 °C	75,0 °C	
	T væske	64,0 °C	65,0 °C	
Fjernvarme retur		61,2 °C	62,7 °C	
Fjernvarme frem		71,0 °C	72,0 °C	
VP ydelse		0,369 MW	0,320 MW	0,932 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		130,5 kW	87,6 kW	255,1 kW
COP R290 anlæg		2,827	3,641	3,641
4. Kompressor				
Fordamper ydelse		0,202 MW	0,203 MW	0,591 MW
R290 masse flowrate		1,20 kg/s	1,092 kg/s	3,180 kg/s
R290 volumen flowrate		0,113 m ³ /s 409 m ³ /h	0,066 m ³ /s 238 m ³ /h	0,192 m ³ /s 693 m ³ /h
R 290 anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	83 °C	83 °C	
	T væske	73 °C	73 °C	
Fjernvarme retur		71,0 °C	72,0 °C	
Fjernvarme frem		80,0 °C	80,0 °C	
VP ydelse		0,345 MW	0,300 MW	0,874 MW
Effektforbrug R290 (75% eff)		142,5 kW	96,9 kW	282,2 kW
COP R290 anlæg		2,421	3,09	3,09
Samlet for hele VP				
VP ydelse – total		1,5200 MW	1,321 MW	3,85 MW
VP effektforbrug – total		490,6 kW	321,8 kW	937 kW
VP R290 COP		3,10	4,11	4,11
COP total VP kaskade anlæg		2,87	3,87	3,70

R600a (isobutan):

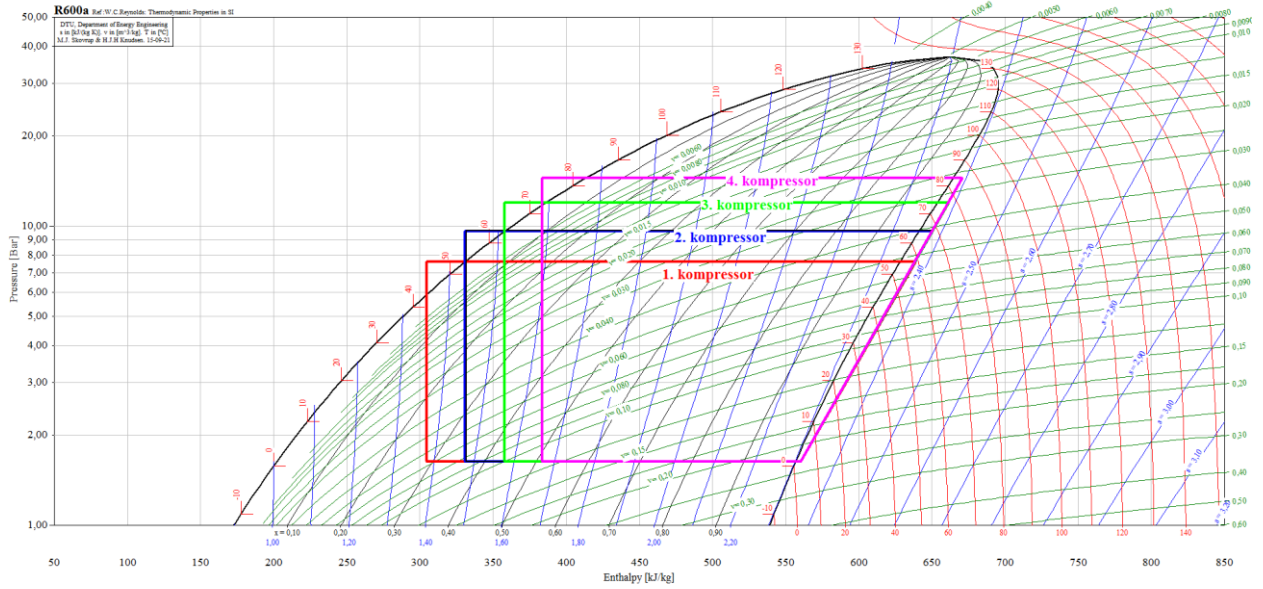
		Vinter	Sommer	
Fordamper ydelse totalt		1,04 MW	1,02 MW	2,97 MW
1. kompressor				
Fordamper ydelse		0,306 MW	0,302 MW	0,879 MW
R600a masse flowrate		1,21 kg/s	1,10 kg/s	3,202 kg/s
R600a volumen flowrate		0,278 m ³ /s 1000 m ³ /h	0,153 m ³ /s 551 m ³ /h	0,446 m ³ /s 1604 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	53,8 °C	53,8 °C	
	T væske	43,8 °C	43,8 °C	
Fjernvarme retur		40 °C	40 °C	
Fjernvarme frem		50,8 °C	50,8 °C	
VP ydelse		0,400 MW	0,358 MW	1,042 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		94,2 kW	56,6 kW	164,8 kW
COP R600a anlæg		4,249	6,335	6,335
2. kompressor				
Fordamper ydelse		0,273 MW	0,272 MW	0,792 MW
R600a masse flowrate		1,21 kg/s	1,10 kg/s	3,202 kg/s
R600a volumen flowrate		0,278 m ³ /s 1000 m ³ /h	0,153 m ³ /s 551 m ³ /h	0,446 m ³ /s 1604 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	64,1 °C	64,1 °C	
	T væske	54,1 °C	54,1 °C	
Fjernvarme retur		50,8 °C	50,8 °C	
Fjernvarme frem		61,1 °C	61,1 °C	
VP ydelse		0,382 MW	0,342 MW	0,996 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		108,6 kW	69,8 kW	203,2 kW
COP R600a anlæg		3,517	4,899	4,899
3. kompressor				
fordamperydelse		0,242 MW	0,243 MW	0,708 MW
R600a masse flowrate		1,21 kg/s	1,10 kg/s	3,202 kg/s
R600a volumen flowrate		0,278 m ³ /s 1000 m ³ /h	0,153 m ³ /s 551 m ³ /h	0,446 m ³ /s 1604 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C	
	T kond	73,8 °C	73,8 °C	
	T væske	63,8 °C	63,8 °C	
Fjernvarme retur		61,1 °C	61,1 °C	
Fjernvarme frem		70,8 °C	70,8 °C	
VP ydelse		0,363 MW	0,325 MW	0,946 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)		121,2 kW	81,3 kW	236,7 kW
COP R600a anlæg		2,993	3,992	3,992

4. kompressor			
Fordamper ydelse	0,211 MW	0,215 MW	0,626 MW
R600a masse flowrate	1,21 kg/s	1,10 kg/s	3,202 kg/s
R600a volumen flowrate	0,278 m ³ /s 1000 m ³ /h	0,153 m ³ /s 551 m ³ /h	0,446 m ³ /s 1604 m ³ /h
R600a anlæg	T ford	1 °C	17 °C
	T kond	83 °C	83 °C
	T væske	73 °C	73 °C
Fjernvarme retur	70,8 °C	70 °C	
Fjernvarme frem	80 °C	80 °C	
VP ydelse	0,343 MW	0,306 MW	0,891 MW
Effektforbrug R600a (75% eff)	132,0 kW	91,2 kW	265,6 kW
COP R600a anlæg	2,596	3,359	3,359
Samlet for hele VP			
VP ydelse - total	1,488 MW	1,331 MW	3,88 MW
VP effektforbrug - total	456,0 kW	298,9 kW	870 kW
VP R290 COP	3,26	4,45	4,45
COP total VP kaskade anlæg	3,00	4,17	3,98

R290 (Propan) h-logp diagram:



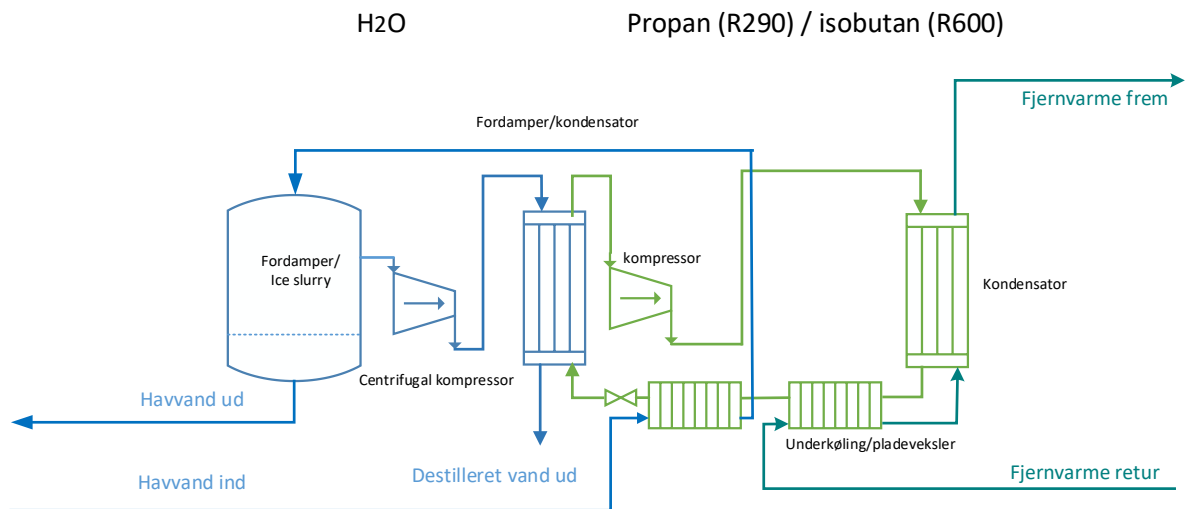
R 600a (isobutan) – h-logp diagram:



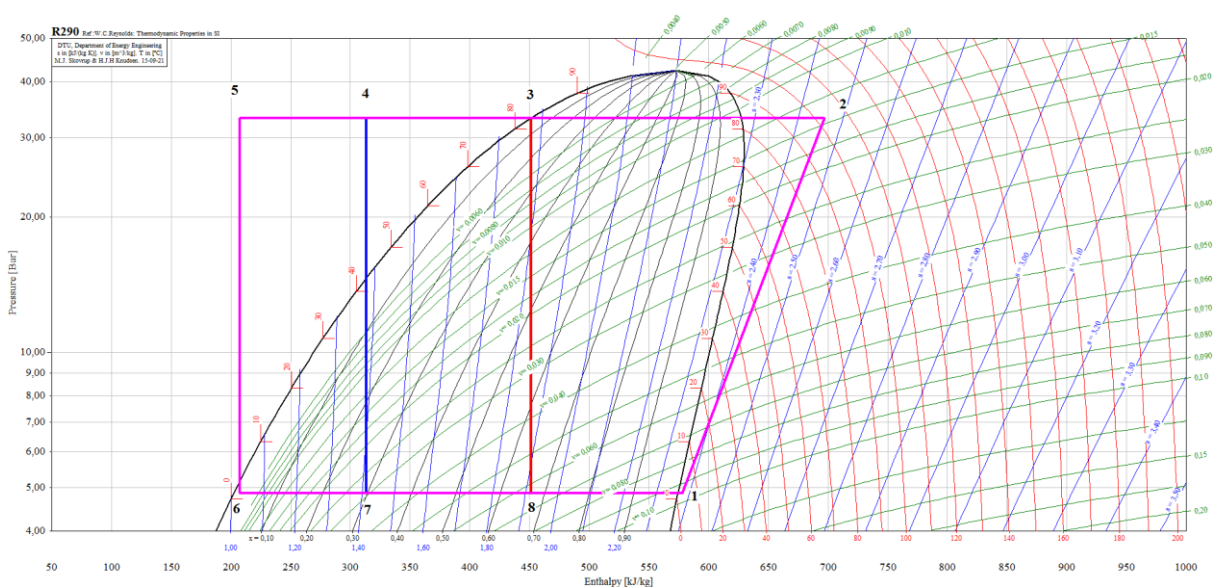
6. Yderligere underkøling af kølemiddel fra 40 °C til næsten 0 °C vha. varmekilden (havvand)

Hvis der skal gøres et forsøg på at hente resten af energien ud af kølemidlet efter underkølingen til ca. 40 °C, kan det ikke længere ske via fjernvarmesystemet. Den eneste anden mulighed er at bruge det kolde havvand, som derved bliver opvarmet relativt lidt.

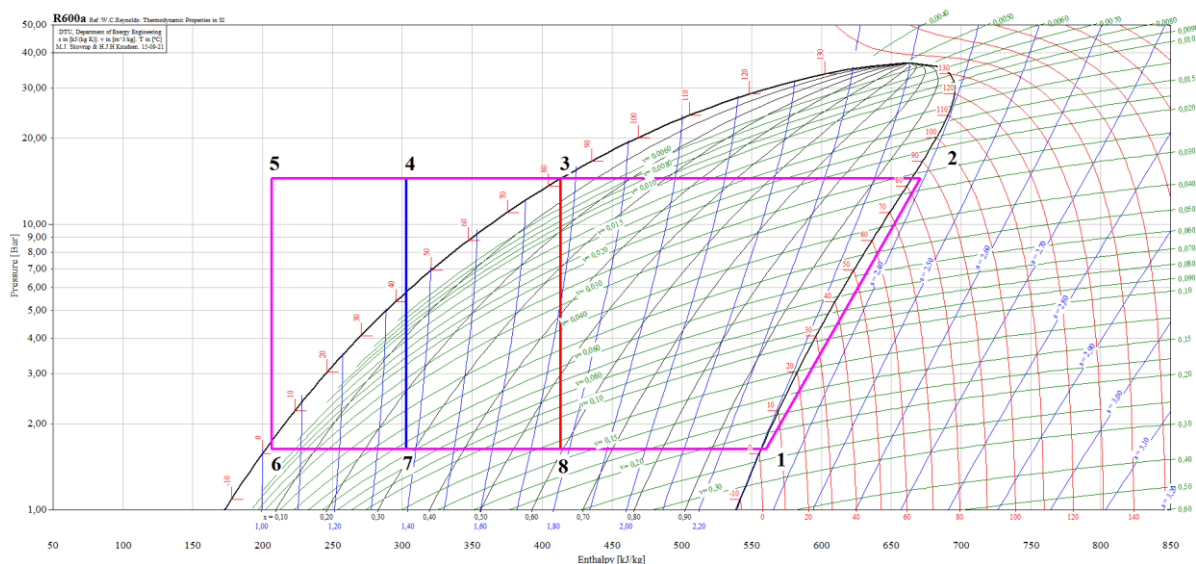
System skitse:



R290 (Propan) h-log diagram:



R 600a (isobutan) – h-logp diagram:



Entalpien i de otte punkter i kredsprocessen er hhv.:

State	R290	R600a
h_1 [kJ/kg]	579,4	559,7
h_2 [kJ/kg]	698,1	668,8
h_3 [kJ/kg]	452,3	414,5
h_4 [kJ/kg]	315,5	305,0
h_5 [kJ/kg]	209,1	207,9
h_6 [kJ/kg]	209,1	207,9
h_7 [kJ/kg]	315,5	305,0
h_8 [kJ/kg]	452,3	414,5

R290:

Entalpi-differens, fordamper: $h_1 - h_6 = 370,3$ kJ/kg

Ved en fordamper ydelse på 1,04 MW svarer det til massestrømmen $m_{R290} = 2,809$ kg/s

Kondensator ydelse $m_{R290}(h_2-h_3) = 0,690$ MW

Underkøling, fjernvarme $m_{R290}(h_3-h_4) = 0,384$ MW

Samlet fjernvarme VP varmeydelse = 1,074 MW

Effektforbrug $m_{R290}(h_2-h_1) = 0,333$ MW

COP VP = 3,22

Underkøling ved hjælp af havvand = $m_{R290}(h_4-h_5) = 0,299$ MW

Svarende til en opvarmning af indløb havvand på 0,299 MW / 1,000 MW * 5C = 1,49C

Det vil sige, at fordamper temperaturen øges fra 1 °C til 2,49 °C om vinteren, potentiel forbedring af COP fra 3,22 til 3,29 (ca. 2%).

Tilsvarende beregning for R600a:

Entalpi-differens, fordamper: $h_1 - h_6 = 351,8 \text{ kJ/kg}$

Ved en fordamper ydelse på 1,04 MW svarer det til massestrømmen $m_{R600a} = 2,956 \text{ kg/s}$

Kondensator ydelse $m_{R600a}(h_2-h_3) = 0,752 \text{ MW}$

Underkøling, fjernvarme $m_{R600a}(h_3-h_4) = 0,324 \text{ MW}$

Samlet fjernvarme VP ydelse 1,076 MW

Effektforbrug $m_{600a}(h_2-h_1) = 0,323 \text{ MW}$

COP VP = 3,33

Underkøling havvand = $m_{600a}(h_4-h_5) = 0,287 \text{ MW}$

Opvarmning havvand $0,287 \text{ MW} / 1,000 \text{ MW} * 5C = 1,44C$

Det vil sige, at fordamper temperaturen øges fra 1 °C til 2,44 °C om vinteren, potentiel forbedring af COP fra 3,33 til 3,41 (ca. 2 %).

Der er dermed minimal gevinst ved at afkøle kølemidlet yderligere.