

RSW – delprosjekt 2.

Utvikling av pilot RSW-anlegg med CO₂ som kulde- medium.

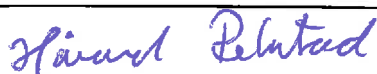
Revidert versjon.

Til: CADIO AS, v/ Sigmund Jenssen

Kopi til:

Fra: Inge Håvard Rekstad, Kåre Aflekt og Trygve M. Eikevik

Signatur:



Postadresse
7491 Trondheim

Org.nr. 974 767 880
E-post:
iept-info@ivt.ntnu.no
<http://www.ntnu.no/ept/>

Besøksadresse
Kolbjørn Heies vei 1b
Gløshaugen

Telefon
+ 47 73 59 38 60
Telefaks
+ 47 73 59 38 59

Tlf: + 47 73 59 1646

Innhold

Revidert versjon.	1
Innledning.	3
1. Testtrigg og instrumentering.	3
2. Testbetingelser og beregningsmetoder.	4
3. Måleresultat.	5
4. Simulering.	10
5. Konklusjon.	11

Innledning.

Dette prosjektet er steg to i et prosjekt som skal ende opp med en fullskala sjøvannskjøler (RSW-kjøler) i en fiskebåt. Bakgrunn, introduksjon og målsetting er beskrevet i tidligere rapport "RSW – steg 1. Ytelsesmåling på vannkjøler med CO₂ som kuldemedium"

Delprosjekt 2 består av følgende:

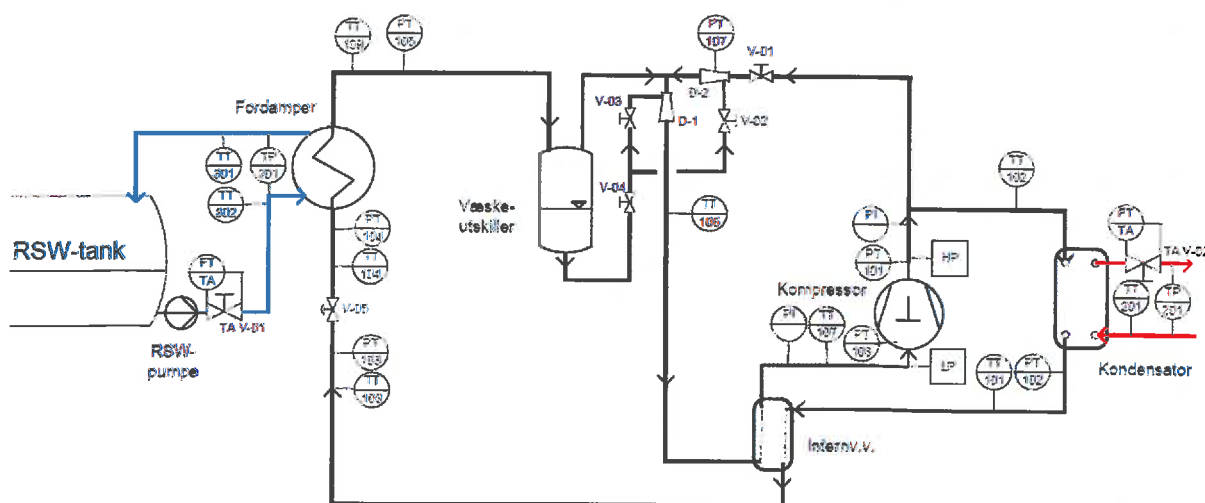
- Produksjon av kuldeanlegg og ny prototype fordampere
- Instrumentering og testing av fordampere
- Evaluering og verifisering av fordampere

NTNU skal gjennomføre tester av anlegg og verifisering av målinger mot simuleringsverdier. Dette er beskrevet i denne rapporten. Etter første versjon av rapporten, datert 15.mars 2014, ble det bestemt at det skulle gjennomføres forsøk med varmere kjølevann inn til kondensator og kjølevanntilførsel ble derfor bygd om. Disse resultatene er tatt med i denne reviderte rapporten.

1. Testtrigg og instrumentering.

Et komplett kuldeanlegg for sjøvannskjøling (RSW) ble bygd av Cadio AS og plassert hos SKALA fabrikk. Kuldeanlegget var bygd for større kapasitet enn prototype fordampere og ble derfor kjørt med redusert (laveste) ytelse.

Prosess og instrumenteringsfigur er vist i figur 1.



Figur 1. Prosess- og instrumentering. Forkortelse TT for temperatur, TP for temperaturdifferanse, PT for trykk og FT for volumstrøm.

Temperaturer ble målt med termoelement type T plassert i prosesstrømmen der økt nøyaktighet var ønskelig. De øvrige ble festet utvendig på rørvegg og isolert. Måleusikkerhet er oppgitt til å være $\pm 0,5$ °C for termoelement montert i prosesstrøm og anslått til ± 1 °C ved plassering utenpå rør. For RSW-temperatur inn og ut av fordamper, som var viktig for å beregne kuldeytelse, ble en 4 punkts termosøyle, TP-301, samt målepunktene TT-301 og TT-302 montert innvendig i rør. Varmebalanse på kondensatorsiden ble bruk til å beregne sirkulert mengde CO₂ og her ble en 3-punkts termosøyle, TP-201, samt TT-201 montert på tilsvarende måte som på RSW-siden.

Absolutt-trykk ble målt med trykktransmittere med måleområde 0-160 eller 0-220 bara. Nøyaktighet er ukjent. RSW-volumstrøm ble målt vha. en TA STAF-150 ventil (TA V-01) og vannstrøm i kondensator med en TA STAD-25 ventil. Et TA-scope som beregner volumstrøm på basis av målt trykkdifferanse over ventil og ventillinnstilling ble benyttet til avlesning. Måleusikkerhet er oppgitt til 1 % av avlest verdi + ventiltoleranse. Dette ble også benyttet til å måle trykktap på RSW-siden i fordamper. Kompressorens motoreffekt og turtall ble avlest på frekvensomformerens skjerm. RSW-pumpe-effekt ble beregnet én gang fra målt strøm og spenning og påstemplet $\cos\phi$.

Alt måleutstyr var tilkopleet en HIOKI LR8400 datalogger som lagret målinger i en datafil for videre beregninger med regneark. Usikkerhet i logger var for temperatur $\pm 0,6$ °C og for trykkmåling $\pm 0,2$ bar.

Følgende parameter ble avlest manuelt ved jevne mellomrom, RSW- og vannmengde, pumpeeffekt, kompressor turtall og effekt samt trykktap RSW-side av fordamper.

En container fylt med ca 6000 liter vann iblandet 3,8 % NaCl-salt ble brukt som RSW-beholder. RSW-pumpen pumpet saltvann fra RSW-tanken gjennom RSW-fordamperen og tilbake til tanken.

Kondensator ble kjølt med kaldtvann fra nett i Test 1 og iblandet varmtvann ved Test 3.

Fordamperen besto av 6 dobbelplater som hver var 0,5 m brede og 2 m høye, som er full størrelse av fordamperplatene. Hver dobbelplate var sammensveist og deretter ekspandert. Platene ble montert i et skall hvor RSW ble pumpet igjennom. Kuldemedium strømmet på innsiden av de ekspanderte platene og RSW på utsiden, begge i parallell strøm.

2. Testbetingelser og beregningsmetoder.

Hovedhensikt med forsøkskjøring var å måle fordamperen oppførsel og ytelse. Alle forsøkene ble utført ved nedkjøling av RSW, dvs. ikke stasjonære forhold.

Forsøksbetingelser var:

- 15 og 10 °C kjølevannstemperatur til kondensator var ønsket. I Test 1 ble det 4 °C. I Test 3 ble CO₂ temperatur foran strupeventil forsøkt holdt på 10 °C hvilket ville være reelt med 10 °C kjølevann og suggassvarmeveksler. Kjølevannstemperatur ble regulert mellom 11 til 20 °C for å oppnå dette.
- RSW nedkjøling fra 15 til -1 °C
- RSW-hastighet mellom fordamperplater ca 2 m/s

- Kompressorturtall på 30 Hz. Det var anslått at 30 Hz ville gi fordampertemperatur på ca $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved RSW-temperatur på $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Kjølevannmengde i kondensator var 1 l/s

Kjølevannstemperatur til kondensator var en av innstillingsverdiene, men nettvannstemperatur var $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ og ikke mulig å øke uten ombygging. For fordamperen er inngående dampkvalitet av betydning for ytelsen. Den bestemmes av trykk og temperatur foran strupeventilen som igjen er avhengig av kjølevannstemperatur og mengde. Den eneste påvirkningsmuligheten var å minke vannmengde for å redusere kondensatorytelsen, men da ville større ytelse bli tatt ut i suggassvarmeveksleren og der-ved påvirket sugesiden til kompressor. Det ble derfor besluttet å kjøre Test 1 med $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vanntemperatur og heller foreta nye simuleringer for verifisering av målinger. Etter ombygging ble det mulig å blande inn varmtvann slik at forsøk kunne utføres med høyere kjølevannstemperatur, Test 3.

Kuldeytelsen ble målt og beregnet vha. 2 uavhengige metoder:

- RSW-side. Fra massestrøm, spesifikk varmekapasitet (c_p) og temperaturdifferanse over fordamper målt med søyle TP-301. Denne metoden ble ansett som den mest nøyaktige.
- CO_2 -side. Fra entalpidifferanse inn/ut fordamper og massestrøm beregnet fra varme- og massebalanse i kondensator. CO_2 -massestrøm ble også beregnet ut fra kompressorturtall og trykkforhold for kontroll. Denne lå noe høyere enn massestrøm fra kondensatorbalansen.

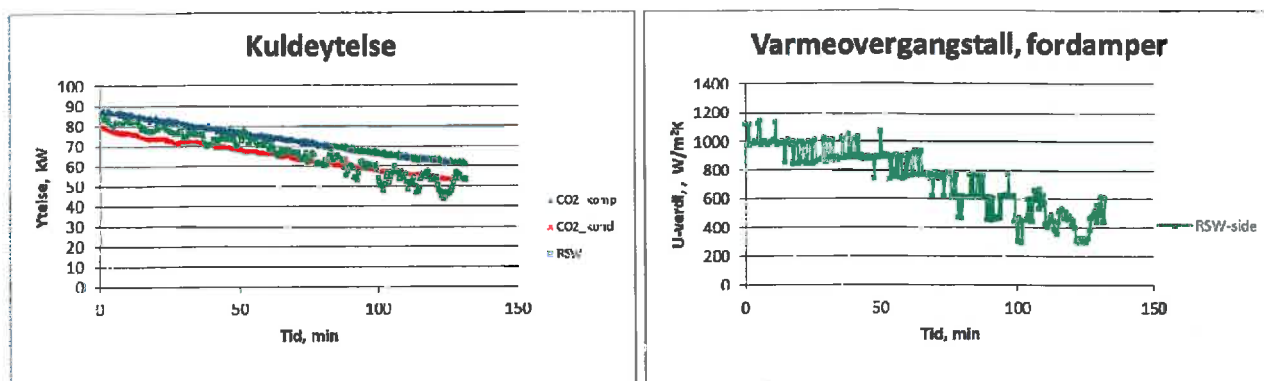
Det ble også utført forsøk for å undersøke alternative metoder for oljeretur. Dette for å finne løsninger slik at enklere og billigere CO_2 -anlegg kan bygges. Resultat fra disse forsøkene er ikke presentert i denne rapporten.

3. Måleresultat.

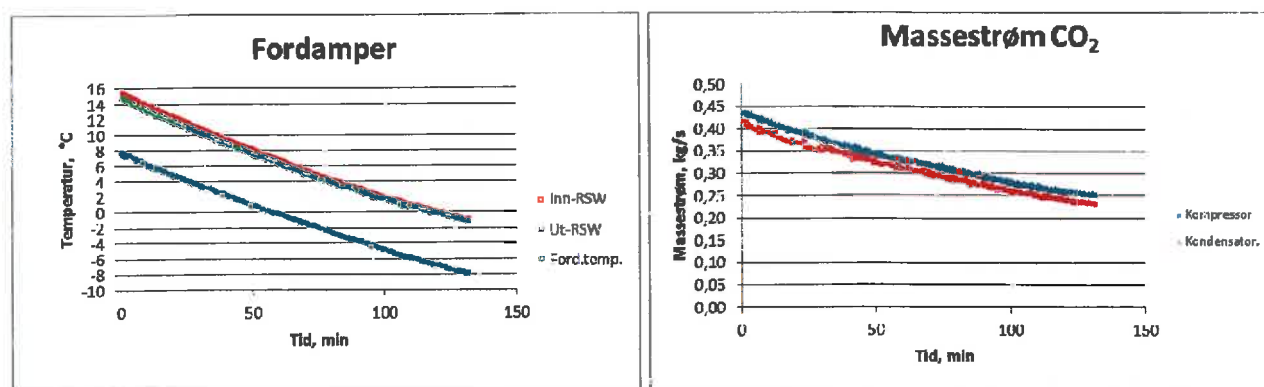
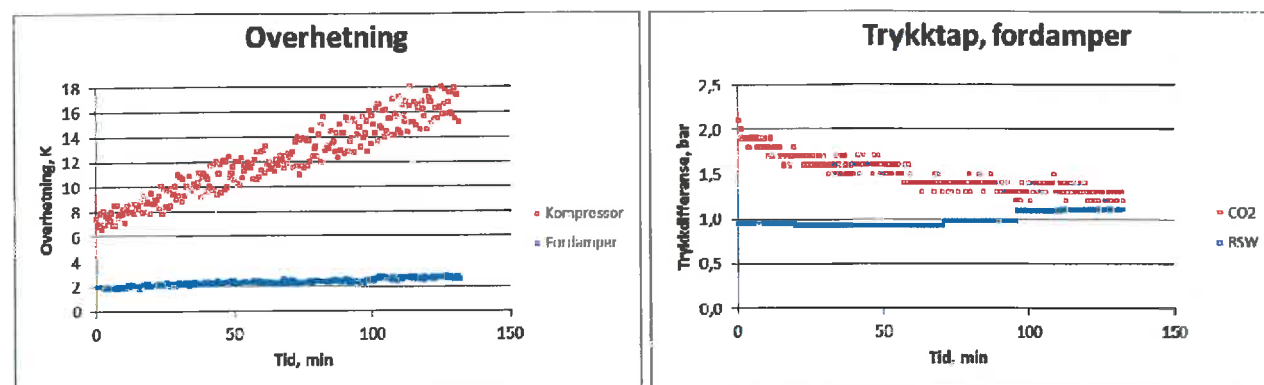
Effekt tilført RSW-pumpe ble målt manuelt én gang til 18 kW ved RSW-mengde på $111\text{ m}^3/\text{time}$. Effekt fra frekvensomformer til kompressor ble avlest hvert 10 minutt og var for Test 1 10,6 og 11,4 kW ved henholdsvis 15 og $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ RSW-temperatur. Datalogging ble foretatt med 30 sekunders intervall.

RSW-hastighet mellom fordamperplater ble høyere enn spesifisert, ca 2,7 m/s, siden avstand mellom platene var mindre enn forutsatt.

Figur 2, 3 og 4 viser målte og beregnede verdier for hver måling under nedkjølingsforløpet i Test 1. Pga. kaldt kondensatorkjølevann avviker temperatur før strupeventil fra settpunkt i alle forsøkene.



Figur 2. Test 1. Målt kuldeytelse og varmeovergangstall i fordampner under RSW-nekjøling.

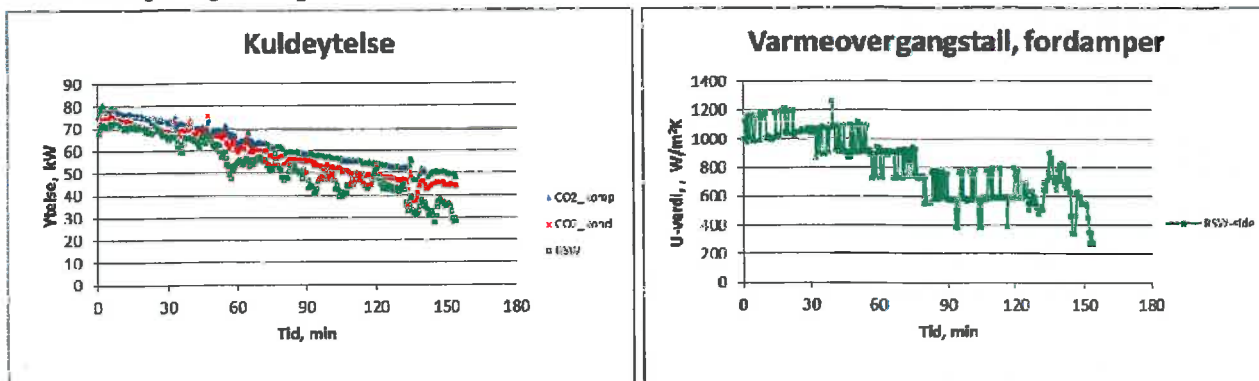
Figur 3. Test 1. Målt RSW- og fordampningstemperatur samt CO₂-massestrøm under RSW-nekjøling.Figur 4. Test 1. Målt overhetning ut av fordampner og inn på kompressor samt fordampertykktap på CO₂ og RSW-side under RSW-nekjøling.

Tabell 1 viser fullstendige beregninger fra Test 1 målinger ved inngående RSW-temperatur til fordampner på hhv. 15, 10, 5 og -1 °C.

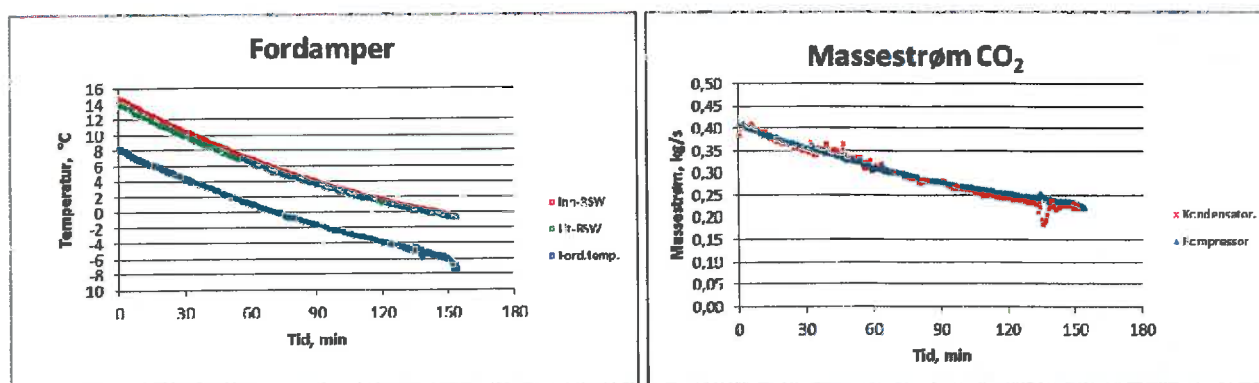
Tabell 1. Test 1. Målinger ved 4 ulike RSW- temperaturer før fordampner og 4 °C kjølevannstemperatur.

RSW fordampner					
Kuldemedium	R744				
Saltinnhold RSW, %	3,8				
Loggeintervall, s	30	Test_15	Test_10	Test_5	Test_-1
Testbetingelser		Enhet	Satt verdi	Satt verdi	Satt verdi
Volumstrøm RSW	m ³ /h	112	112	112	112
Temperatur RSW	°C	15	10	5	-1
CO ₂ temperatur før strupeventil	°C	15	15	15	15
Fordampner		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Trykk før struping	bara	55,9	53,8	51,7	49,1
Metningstemperatur før struping	°C	19,0	17,3	15,7	13,5
Temperatur før struping	°C	10,5	6,4	2,1	-3,2
Trykk ut	bara	42,8	38,0	33,9	28,6
Temperatur inn	°C	9,4	5,2	1,0	-4,9
Temperatur ut	°C	9,2	4,9	0,5	-5,5
Metningstemperatur	°C	7,9	3,3	-1,1	-7,3
Overhetning ut (rørvegg utside)	K	1,3	1,5	1,6	1,8
Dampkvalitet ut (beregnet)	-	0,97	0,96	0,95	0,94
Massestrøm (kompressorturtall)	kg/min	26,1	22,0	18,8	15,0
Massestrøm (kondensatorbalanse)	kg/min	24,6	21,0	17,7	13,9
Kuldeytelse (RSW side)	kW	83	76	65	53
Kuldeytelse (CO ₂ side, mettet ut, m_kond.)	kW	79	72	63	53
Kuldeytelse (CO ₂ side, m_kond.)	kW	83	76	68	57
Temperatur RSW inn	°C	15,1	10,1	5,1	-1,0
Temperatur RSW ut	°C	14,4	9,5	4,6	-1,4
Volumstrøm RSW	l/s	31,13	31,00	30,77	30,55
LMTD	K	6,8	6,4	5,9	6,1
U-verdi	W/m ² K	1098	1020	845	538
Trykktap	bar	1,31	1,02	0,76	0,69
Spaltehastighet RSW	m/s	2,71	2,70	2,68	2,66
Trykktap RSW	bar	0,94	0,92	0,97	1,11
Kondensator		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Trykk ut	bara	56,4	54,2	52,1	49,5
Temperatur inn	°C	40,9	46,1	50,8	59,5
Temperatur ut	°C	17,9	15,9	12,6	11,9
Underkjøling ut	K	1,4	1,8	2,1	2,0
Temperatur vann inn	°C	3,8	3,8	3,8	3,9
Temperatur vann ut	°C	18,1	20,9	22,8	24,2
Ytelse	kW	85,8	79,7	71,5	61,3
Suggassvarmeveksler		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Temperatur inn lavtrykk-side	°C	9,4	5,1	0,9	-4,8
Temperatur ut lavtrykk-side	°C	14,4	12,7	10,9	9,7
Temperatur inn høytrykk-side	°C	17,9	15,9	12,6	11,9
Temperatur ut høytrykk-side	°C	10,5	6,4	2,1	-3,2
Underkjøling ut høytrykk-side	K	8,4	10,9	13,6	16,7
Kompressor		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Sugetrykk	bara	41,9	37,4	33,3	28,3
Sugetemperatur	°C	14,4	12,7	10,9	9,7
Overhetning sugestuss	K	7,3	10,1	12,6	17,4
Utløpstrykk	bara	57,4	54,9	52,5	49,6
Utløpstemperatur	°C	40,9	46,1	50,8	59,5
Kraftforbruk	kW	10,3	10,6	10,9	11,4
Leveringsgrad	-	0,88	0,87	0,88	0,86

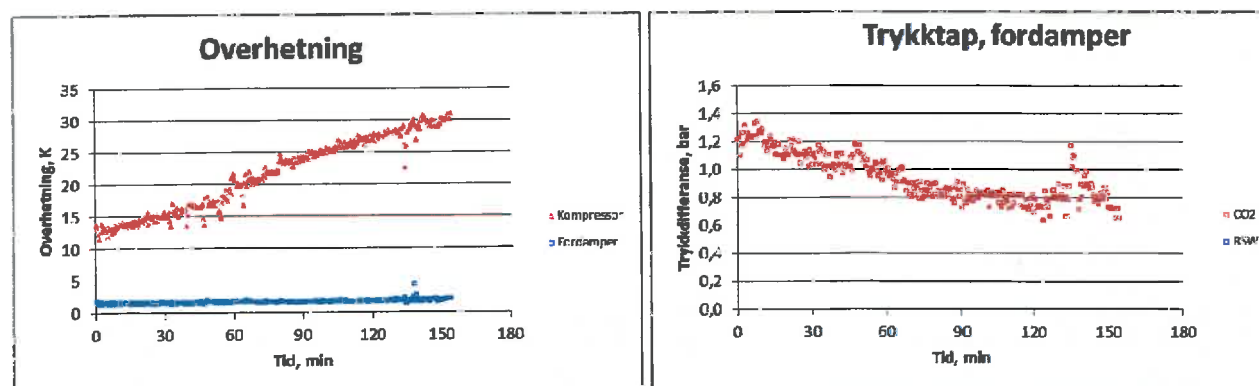
I Test 3 ble CO₂ temperatur før strupeventil holdt konstant på 15 eller 10 °C ved å øke kondensatorens kjølevannstemperatur etter hvert som RSW-temperatur sank. Kjølevannstemperaturen ble regulert fra 11 til 20 °C under forsøket. Figur 5, 6 og 7 viser målte og beregnede verdier for hver måling under nedkjølingsforløpet.



Figur 5. Test 3. Målt kuldeytelse og varmeovergangstall i fordampner ved RSW-nedkjøling.



Figur 6. Test 3. Målt RSW- og fordampningstemperatur samt CO₂-massestrøm ved RSW-nedkjøling.



Figur 7. Test 3. Målt overhetning ut av fordampner og inn på kompressor samt fordampertykktap på CO₂ side ved RSW-nedkjøling.

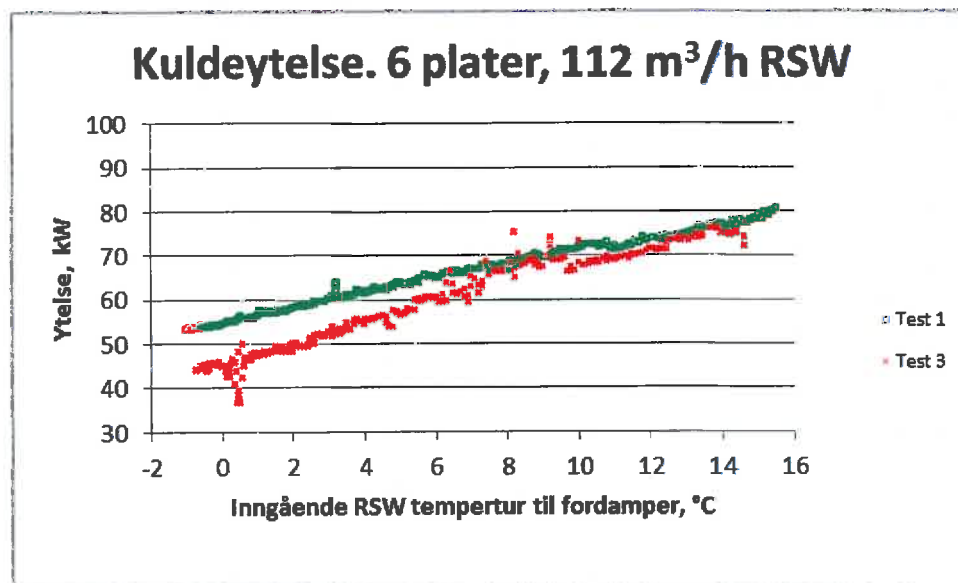
Tabell 2 viser fullstendige beregninger fra Test 3 målinger ved inngående RSW-temperatur til fordampner på hhv. 15, 10, 5 og – 1 °C.

Tabell 2. Test 3. Målinger ved 4 ulike RSW temperaturer inn fordampner og 15 / 10 °C CO₂-temperatur før strupeventil.

RSW fordampner					
Kuldemedium	R744				
Saltinnhold RSW, %	3,8				
Loggeintervall, s	30	Test_15	Test_10	Test_5	Test_-1
Testbetingelser		Enhet	Satt verdi	Satt verdi	Satt verdi
Volumstrøm RSW	m ³ /h	112	112	112	112
Temperatur RSW	°C	15	10	5	-1
CO ₂ temperatur før strupeventil	°C	15	10	10	10
Fordampner		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Trykk før struping	bara	60,6	60,2	62,1	63,8
Metningstemperatur før struping	°C	22,4	22,1	23,4	24,6
Temperatur før struping	°C	15,3	10,0	9,2	8,1
Trykk ut	bara	42,9	37,7	34,3	28,7
Temperatur inn	°C	10,3	5,0	1,5	-4,6
Temperatur ut	°C	9,8	4,4	0,9	-5,2
Metningstemperatur	°C	8,1	3,0	-0,6	-7,2
Overhetning ut (rørvegg utside)	K	1,7	1,5	1,6	2,0
Dampkvalitet ut (beregnet)	-	1,00	0,97	0,96	0,95
Massestrøm (kompressorturtall)	kg/min	24,3	20,3	17,4	13,3
Massestrøm (kondensatorbalanse)	kg/min	23,6	20,9	17,1	13,1
Kuldeytelse (RSW side)	kW	69	63	54	28
Kuldeytelse (CO ₂ side, mettet ut, m_kond.)	kW	73	69	57	44
Temperatur RSW inn	°C	14,6	8,8	5,0	-0,7
Temperatur RSW ut	°C	14,0	8,2	4,6	-0,9
Volumstrøm RSW	l/s	30,49	30,41	30,10	31,00
LMTD	K	6,2	5,5	5,4	6,4
U-verdi	W/m ² K	1063	973	736	296
Trykktap	bar	1,22	1,03	0,85	0,67
Spaltehastighet RSW	m/s	2,65	2,65	2,62	2,70
Trykktap RSW	bar	-	-	-	-
Kondensator		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Trykk ut	bara	61,2	60,6	62,5	64,2
Temperatur inn	°C	54,1	63,0	76,6	99,1
Temperatur ut	°C	22,7	21,3	23,7	24,4
Underkjøling ut	K	0,1	1,1	0,8	0,6
Temperatur vann inn	°C	11,1	12,1	15,6	19,4
Temperatur vann ut	°C	28,9	29,0	30,4	31,5
Ytelse	kW	81,6	79,1	68,0	56,6
Suggassvarmeveksler		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Temperatur inn lavtrykk-side	°C	9,2	4,6	1,2	-4,6
Temperatur ut lavtrykk-side	°C	20,6	18,9	20,6	22,8
Temperatur inn høytrykk-side	°C	22,7	21,3	23,7	24,4
Temperatur ut høytrykk-side	°C	15,3	10,0	9,2	8,1
Underkjøling ut høytrykk-side	K	7,1	12,1	14,3	16,5
Kompressor		Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi	Målt verdi
Sugetrykk	bara	42,0	37,0	33,8	28,3
Sugetemperatur	°C	20,6	18,9	20,6	22,8
Overhetning sugestuss	K	13,4	16,6	21,8	30,6
Utløpstrykk	bara	62,0	61,0	62,5	63,7
Utløpstemperatur	°C	54,1	63,0	76,6	99,1
Kraftforbruk	kW	12,4	12,6	14,4	15,5
Leveringsgrad	-	0,89	0,86	0,84	0,82

Ved $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ RSW-temperatur (Test_-1) er det stor forskjell på målt kuldeytelse på vann- og CO_2 – side. Dette kan skyldes ustabilitet som oppsto ved ca $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ RSW-temperatur pga. nettvannsmengde og/eller temperatur endret seg og den automatiske strupeventilen begynte å regulere. Dette kan også avleses på trykktapmålingen, figur 7.

Figur 8 viser en sammenligning av kuldeytelse i Test 1 og Test 3 som funksjon av inngående RSW-temperatur til fordamper. Verdier beregnet fra CO_2 siden er vist i sammenligning.



Figur 8. Målt kuldeytelse (fra CO_2 -side) i Test 1 og 3 som funksjon av RSW-temperatur før fordamper.

Ved $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ RSW-temperatur sank kuldeytelsen fra 53 kW ved lav kjølevannstemperatur til 44 kW ved høy kjølevannstemperatur. Høy kjølevannstemperatur ($19,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) bidro til høyt kondensatortrykk og stor overhetning (fig. 7) før kompressor. Dette medførte redusert CO_2 massestrøm og derav lavere kuldeytelse.

4. Simulering.

Fordampersimuleringer ble utført med inngangsverdier fra Test 1 (tabell 1). Målt CO_2 -trykk og temperatur samt RSW-flow og inngående temperatur var inngangsverdier for simulering. Kuldeytelse og utgående RSW-temperatur blir beregnet i simuleringsprogram.

Simulering gir fra 10 til 24 % høyere kuldeytelse enn målt i Test 1 noe som kan forklares ved at platene lå for tett sammen ved måling samt at noe RSW kunne strømme på siden av platene.

Målte og simulerte verdier er vist i tabell 3.

Tabell 3. Målt og simulert fordamperverdier

Testbetingelser	Enhet	Satt verdi	Satt verdi	Satt verdi	Satt verdi				
Volumstrøm RSW	m ³ /h	112	112	112	112				
Temperatur RSW	°C	-1	5	10	15				
CO ₂ temperatur før strupeventil	°C	15	15	15	15				
Fordamper		Målt verdi	Simulert	Målt verdi	Simulert	Målt verdi	Simulert	Målt verdi	Simulert
Trykk før struping	bara	49,1		51,7		53,8		55,9	
Metningstemperatur før struping	°C	13,5		15,7		17,3		19,0	
Temperatur før struping	°C	-3,2		2,1		6,4		10,5	
Trykk ut	bara	28,0		33,3		37,4		42,2	
Temperatur inn	°C	-4,9		1,0		5,2		9,4	
Temperatur ut	°C	-5,5	-8,0	0,5	-1,7	4,9	2,7	9,2	7,4
Metningstemperatur	°C	-8,0	-8,0	-1,8	-1,7	2,7	2,7	7,4	7,4
Overhetning ut	K	2,6	0,0	2,3	0,0	2,1	0,0	1,9	0,0
Dampkvalitet ut (beregnet) (inn: simulert)	-	0,94	0,0	0,95	0,0	0,96	0,0	0,97	0,0
Massestrøm (kondensatorbalanse)	kg/min	13,9	13,9	17,7	17,7	21,0	21,0	24,6	24,6
Kuldeytelse (RSW side)	kW	53		65		76		83	
Kuldeytelse (CO ₂ side, overhetet ut, m_kond.)	kW	57	71	68	74	76	88	83	103
Temperatur RSW inn	°C	-1,0	-1,0	5,1	5,1	10,1	10	15,1	15
Temperatur RSW ut	°C	-1,4	-1,5	4,6	4,5	9,5	9,5	14,4	14,4
Volumstrøm RSW	l/s	30,55	31,64	30,77	34,32	31,00	32,1	31,13	32,2
LMTD	K	6,9	6,7	6,6	6,5	7,0	7,1	7,4	7,3
U-verdi	W/m ² K	641	876	822	946	900	1038	942	1180
Trykktap	bara	1,30		1,37		1,63		1,92	
Spaltehastighet RSW	m/s	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,72	2,7	2,74

5. Konklusjon.

Det er utført målinger på et prototype kuldeanlegg for RSW-kjøling med fokus på fordamperen. Anlegget fungerte uten driftsproblemer.

Målingene viste at:

- Ved 4 °C kjølevannstemperatur var kuldeytelsen var tilnærmet som forventet under nedkjøling, men noe lavere ved laveste RSW-temperatur.
- Med varmere kjølevann ble kuldeytelsen mellom 11-17 % lavere. Målt reduksjon var størst, ved lav RSW temperatur, men kjølevannstemperaturen på 20 °C medførte høyt kondensatortrykk og redusert CO₂-massestrøm som bidro til lavere ytelse.

Simulerte kuldeytelse var mellom 8 og 24 % høyere enn målt i Test 1. Målt varmeovergangstall ved laveste RSW-temperatur var 4 ganger mindre enn det som ble målt på en liten testplate i Steg-1.

Dette kan tyde på at en ikke har fått utnytte potensialet i fordamperen fullt ut. En mulig årsak kan være at avstand mellom fordamperplatene ble for liten slik at RSW-strømning blir delvis blokkert og at noe av RSW strømmen går på siden av fordamperplatene.

Erfaring fra tilvirkning av denne fordamperprototypen gjør at det skal være mulig å produsere fremtidige plater med minimal bukling slik at det blir enklere å montere de med en fast og kontrollert avstand.

