

SFH80 A063070 –Åpen

RAPPORT

Fastlegge ytelseskriterier for et spesifikt ORC system. Delprosjekt 1

Nils Harald Bjørshol

SINTEF Fiskeri og havbruk AS

Fiskeriteknologi

Oktober 2006

www.sintef.no



SINTEF Fiskeri og havbruk AS

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse:
SINTEF Sealab
Brattørkaia 17B

Telefon: 4000 5350
Telefaks: 932 70 701

E-post: fish@sintef.no
Internet: www.sintef.no

Foretaksregisteret: NO 980 478 270 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

**Fastlegge ytelseskriterier for et spesifikt ORC system.
Delprosjekt 1**

FORFATTER(E)

Nils Harald Bjørshol

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond

RAPPORTNR. SFH80 A063070	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Eirik Ulsund, Norges Fiskarlags Teknologiforum	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-03963-0	PROSJEKTNR. 83016200	ANTALL SIDER OG BILAG 11
ELEKTRONISK ARKIVKODE	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Nils Harald Bjørshol	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Birger Enerhaug	
ARKIVKODE	DATO 2006-09-28	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Håvard Røsvik, Forsknings sjef	

SAMMENDRAG

Rapporten beskriver bruken av spillvarme fra eksos og HT og LT kjølevann fra hovedmotor for et kombinert kolmule og ringnotfartøy der mest mulig av varmen benyttes til oppvarmingsformål. All eksosvarme foreslås brukt til ORC. Eksostemperaturen er foreslått senket så lavt som mulig for å øke utbyttet fra ORC anlegget. Utbyttet er beregnet for to eksostemperaturer 135 °C og 180 °C og for tre forskjellige driftsprofiler.

For ORC anlegget er det valgt henholdsvis 15 og 6 bar fordampetrykk og 1,5 bar kondensatortrykk. En senkning av eksostemperaturen som foreslått vil øke utbyttet fra ORC anlegget med 21 % på årsbasis. Et styresystem avføler og styrer trykk, temperatur og overheting av arbeidsmediet. Systemet starter og faser inn ORC generatorene i fartøyets hovednett når tilgangen på varme er tilstrekkelig og faser ut og stanser ORC generatorene når tilgangen på varme ikke lenger er tilstrekkelig.

I løpet av 20 år vil tiltakene ha spart energi tilsvarende **24,3 GWh** og har ført til en reduksjon av utslipp til atmosfæren på **14 600 tonn CO₂** og **243 tonn NO_x**.

Forkortelser: ORC – Organic Rankine Cycle.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Energisparing i fiskeflåten	Energy efficiency in the fishing fleet
GRUPPE 2	Miljøvennlig Fiskefartøy	Environment friendly fishing vessel
EGENVALGTE	ORC i fiskeflåten	ORC in the fishing fleet

INNHALDSFORTEGNELSE

1	Målsetting	3
2	Bakgrunn	3
3	Gjenvinning og bruk av varme	3
4	Driftsprofiler	6
5	Senkning av eksostemperatur	7
6	Styring av ORC anlegget	9
	6.1 Trykkstyresystem	9
	6.2 Temperaturstyresystem	9
	6.3 Overheting styresystem	10
	6.4 Inn og utfasing av ORC anlegget	10
7	ORC Medier	10
8	Økonomi og miljø	11
9	Referanser	11

1 Målsetting

Overordnet mål

Demonstrere og vinne erfaring med ORC-teknologi i fiskefartøy.

Målsetting i dette delprosjektet

Fastlegge ytelseskriterier for et spesifikt ORC system

2 Bakgrunn

For å utnytte de store varmetapene fra fiskefartøyers hoved- og hjelpemotorer på en lønnsom måte har SINTEF Fiskeri og Havbruk fokusert på utnyttelse av varme til oppvarming av oppholdsrom og tappevann, og til produksjon av elektrisk energi ved bruk av ORC teknologi. Etter hvert som prisen på olje har økt har dette blitt stadig mer aktuelt.

I samarbeid med Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF) ble det gjennomført et forprosjekt som vurderte 3 ulike ORC anlegg. (Bjørshol 2005)

Arbeidet ble videreført i et nytt prosjekt finansiert av FHF *ORC Pilotprosjekt Oppstart*. Her ble det dannet et konsortium som skulle gjennomføre finansiering og utvikle, spesifisere, installere og teste ut et lønnsomt varmegjenvinnings- og ORC anlegg om bord et fiskefartøy. Prosjektet rapporterte også ORC anleggets forventede ytelse, økonomi og miljøgevinst basert på den innsikt SINTEF da hadde. (Bjørshol 2006)

Prosjektet er delt i 5 delprosjekter der de to første har mest fokus på FOU, mens de neste 3 har fokus på oppfølging, pilotinstallasjon og dokumentasjon. *Delprosjekt 1 "Fastlegge ytelseskriterier for et spesifikt ORC system"* er gjennomført og rapporteres her. I dette delprosjektet har vi samarbeidet med UTRC¹, Rolls Royce Marine og et rederi som er kunde hos Rolls Royce Marine. UTRC er potensiell leverandør av ORC anlegg for utprøving om bord.

3 Gjenvinning og bruk av varme

Ca 40 % av energien som tilføres en dieselmotor omsettes i mekanisk energi, resten 60 % blir til varme. Dette prosjektets bærende ide er å ta tak i disse 60 % som blir til varme og gjøre best mulig bruk av dem. Dersom vi hadde bruk for alt i form av varme ville det være helt ideelt og vi ville fått opp mot 100 % utnyttelse av energien. Vi har identifisert bare to anvendelser av den tilgjengelige spillvarme: til oppvarming av tappevann og til oppvarming av oppholdsrom.

I Figur 1 er vist at 20 kW kan brukes til oppvarming av tappevann. Dette kan gjøres ved å sirkulere en liten del av gjenvinningsløyfa i HT kjølesløyfa for hovedmotoren i en varmtvannsbereder. Temperaturen er høy nok (87 °C) for formålet og vil bare bruke en liten del av varmen som kan gjenvinnes i denne sløyfa. Dette vil spare inntil **20 kW** elektrisk energi som ellers måtte produseres ved hjelp av dyr diesel.

¹ UTC - United Technologies, UTRC - United Technologies Research Centre

Fra lavtemperatur delen av kjøleanlegget til motoren er det i Figur 1 tegnet inn en sløyfe for oppvarming av oppholdsrom. Temperaturen her er 50 °C eller høyere og vil være tistrekkelig for både radiator oppvarming og dørkoppvarming. Varmebehovet er anslått til **80 kW**. Ved full last er det tilgjengelig 685 kW som skulle tilsi at 80 kW er tilgjengelig helt ned til 11 % motorbelastning. Både varmtvannsbereder og oppvarmingen av oppholdsrom må ha en alternativ varmekilde enten oljefyrt eller elektrisk.

Ut fra dette ser vi at vi ikke behøver å bruke eksosvarme for oppvarming av oppholdsrom eller oppvarming av tappevann. Vi ser dessuten at vi bruker bare en liten del av varmemengden i kjølevannet. Det aller meste forsvinner over bord gjennom sjøvannskjøleren hvis vi ikke har andre behov.

I Figur 1 er det derfor inntegnet en ORC evaporator i høytemperatur (HT) kretsen og en ORC forvarmer i lavtemperatur (LT) kretsen. ORC evaporatoren fordampes drivgass og forvarmeren varmer opp kondensatet ved fordampetrykk. Dette ser ut til å passe fint med temperaturene.

Siden vi ikke har identifisert andre behov for direkte bruk av varme med temperatur over 90 °C er all eksosvarme tenkt brukt til ORC. I Figur 1 er det vist en eksoskjele med ventil og bypass rør. Ventilen leder eksosen gjennom kjelen eller direkte ut til omgivelsene. Ventilen er en type som kan regulere all eller bare deler av eksosen gjennom kjelen.

I Figur 2 er det vist eksempel på to ORC sirkelprosesser med drevet med varme fra eksos og kjølevann.

Dersom vi velger 15 og 6 bar kjeletrykk i eksos og kjølevanns turbin, og 1,5 bar kondensatortrykk, får vi følgende isentropiske (adiabatiske) virkningsgrader for ORC sirkelprosessene:

$$\eta_{is} = (522-473)/(522-233) = 0,1696 \text{ (eksosdrevet ORC)}$$

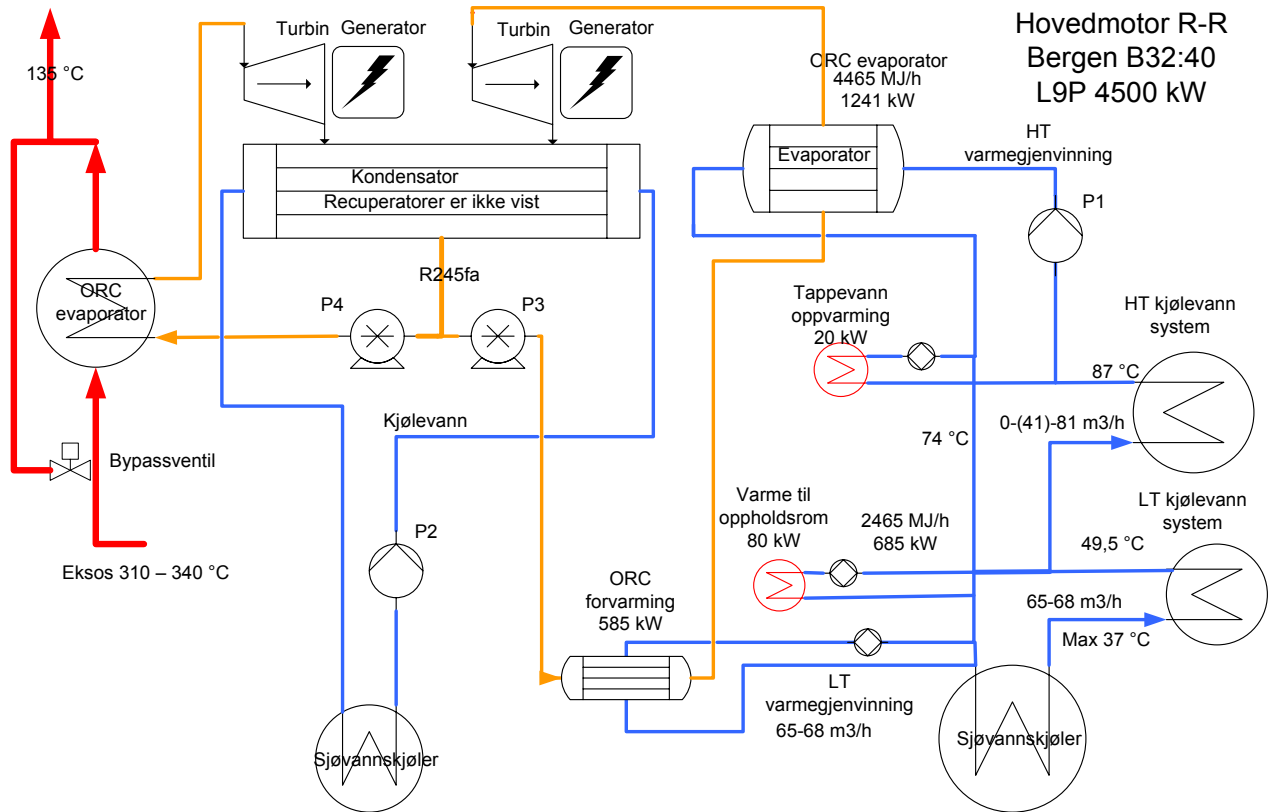
$$\eta_{is} = (463-437)/(463-233) = 0,113 \text{ (kjølevannsdrevet ORC)}$$

Dette er ideell virkningsgrader for de to ORC- prosessene uten noen former for tap. Tallene representerer hvor stor del av varmenegien hentet ut av eksos og kjølevann som maksimalt kan gjøres om til mekanisk arbeid i turbinen uten rekuperasjon.

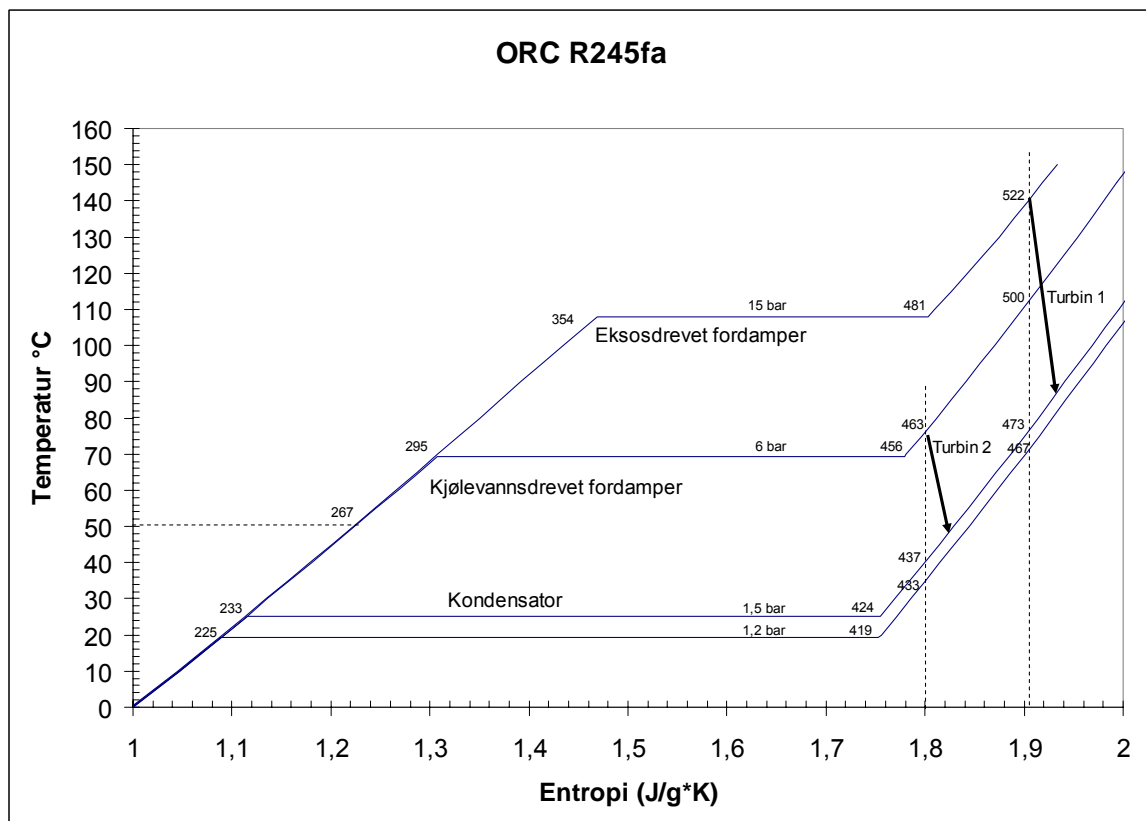
Rekuperasjon vil si varmeveksling mellom eksosgassen fra turbinen og kondensatet som vil tilføre prosessene mer varme fordi restvarmen inklusive tap i ekspansjonen tilføres arbeidsmediet etter kondensatoren. Forvarming ved bruk av restvarme fra kjølevann som vist i Figur 1 vil øke varmemengden ytterligere.

Isentropisk virkningsgrad for ekspansjonen i turbinen er satt til 0,85 for både eksos og kjølevann sirkelprosessene.

I beregningene i denne rapporten er det brukt totalvirkningsgrader på henholdsvis 0,118 og 0,205 i forhold til tilført varme for kjølevann og eksos. Parasittiske tap er holdt utenfor. UTRC har gjort lignende utregninger. For kjølevann er verdiene lik, for eksos ligger de over beregningene i denne rapporten.



Figur 1 Gjenvinning av varme fra hovedmotor



Figur 2 TS diagram for 2 ORC prosesser eksosdrevet og kjølevannsdrevet

4 Driftsprofiler

En driftsprofil vil i denne sammenheng bety en tabell over antall timer per år et aktuelt fartøy har kjørt hoved- og hjelpemotor på gitte ytelser.

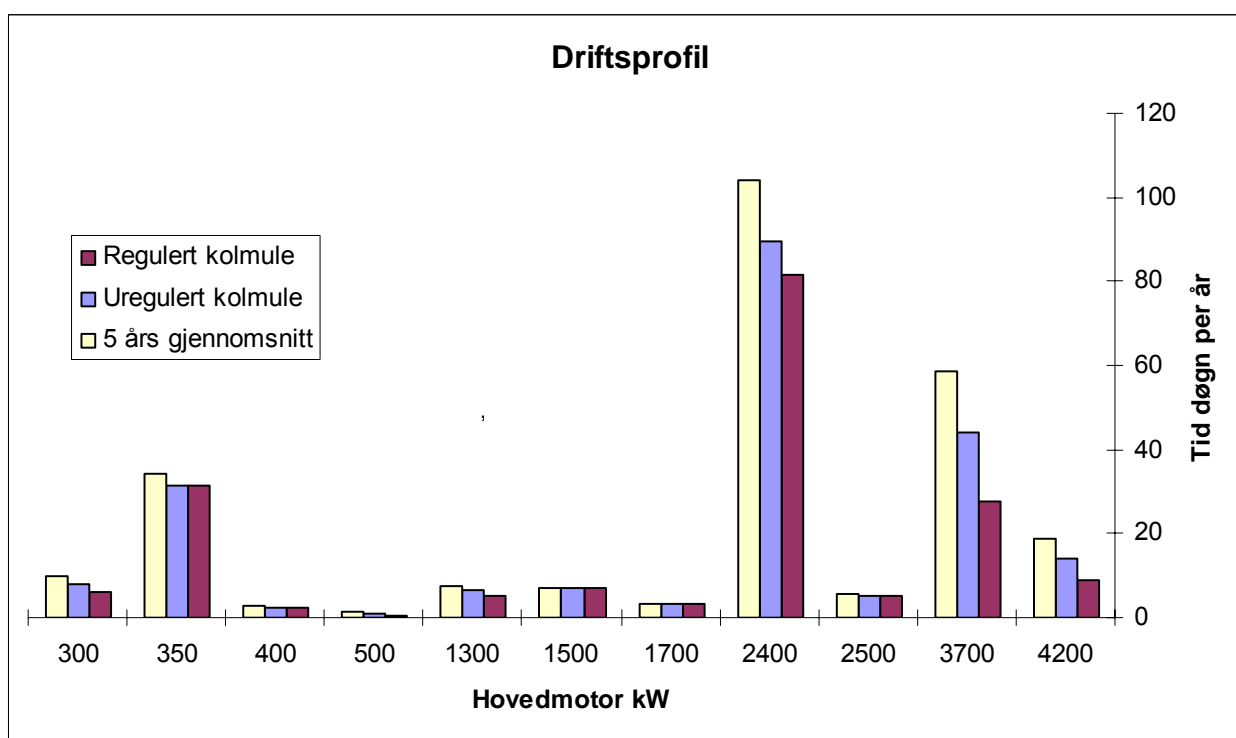
SINTEF har fått tilgang på driftsprofiler for et relevant fartøy og har aggregert verdiene for de enkelte sesongene over flere år.

Disse verdiene er så brukt til å beregne den mengde varme som er tilgjengelig fra henholdsvis eksos og kjølevann. Ut fra dette er det beregnet hvor mange kW elektrisk energi som kan produseres ved hver motorbelastning og hvor mange kWh dette vil utgjøre på årsbasis.

I utgangspunktet har vi gått ut fra de verdiene for eksostemperaturen som er oppgitt i motorleverandørens datablader og forutsatt at temperaturen ikke skal senkes under 180 °C. Dette vil sikre at vi ikke får utfelling av svovelsyre i eksosrøret. Ved senkning av eksostemperaturen under 180 °C kan det oppstå fare for utskillelse av SO₃ og påfølgende dannelse av svovelsyre dersom konsentrasjonen av vanndamp er over 8 %. Andre faktorer teller også inn for eksempel svovelinnholdet i drivstoffet og oksygenoverskuddet i eksosen.

Vi ønsker å senke eksostemperaturen så lavt som mulig av hensyn til ORC utbyttet og vil derfor i samarbeid med UTRC og andre i prosjektgruppen søke å finne ut hvor langt ned i temperatur vi kan gå og hvordan vi kan hindre skader eller andre problemer.

Tabell 3 viser en driftsprofil for hovedmotor bruk og ORC ytelse beregnet for eksostemperatur 135 °C ved rammebetingelser der kolmulefiske er regulert. Forbruket er kraftig redusert som følge av omleggingen i driftsmønsteret men den relative ORC ytelsen er bibeholdt og utgjør omtrent 10 % av drivstoff-forbruket på årsbasis. Dette vil gi god inntjening på ORC- anlegget.



Figur 3 Driftsprofil for hovedmotor ved regulert og uregulert kolmulefiske og for en tenkt 5 års gjennomsnittsesong

5 Senkning av eksostemperatur

Vi ser fra Tabell 1 for eksostemperaturen senket til 135 °C at den prosentvise innsparingen ved ORC varierer lite mellom de tre ulike reguleringsregimene og driftsprofilene gjengitt i Figur 3.

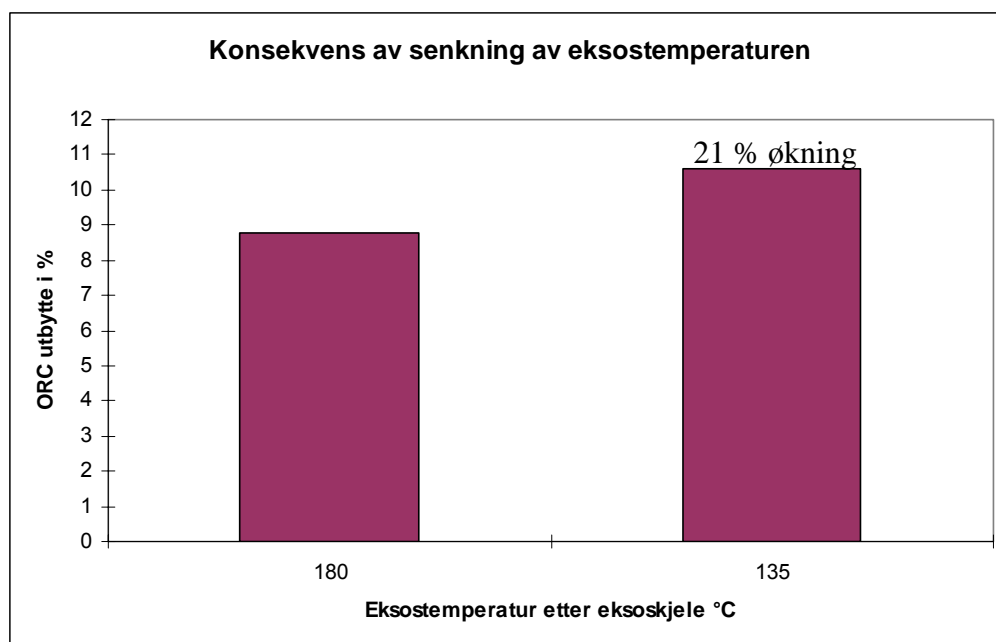
Tabell 2 viser det samme for en senkning av temperaturen i eksoskjelen til 180 °C. En senkning av eksostemperaturen fra 180 grader til 135 grader vil gi ca. 21 % høyere utbytte fra ORC anlegget.

Tabell 1 Nøkkeltall forbruk og innsparing ved senkning av eksostemperaturen til 135 °C

Regulering	Per år	Forbruk kg	Hoved motor MWh/år	Eksos ORC MWh/år	Kjølevann ORC MWh/år	Innsparing Prosent %
	Døgn					
Regulert kolmule	179	1844630	9223	768	229	10,8
Uregulert kolmule	212	2345174	11726	960	294	10,7
5 års gjennomsnitt	254	2894209	14471	1177	364	10,6

Tabell 2 Nøkkeltall forbruk og innsparing ved senkning av eksostemperaturen til 180 °C

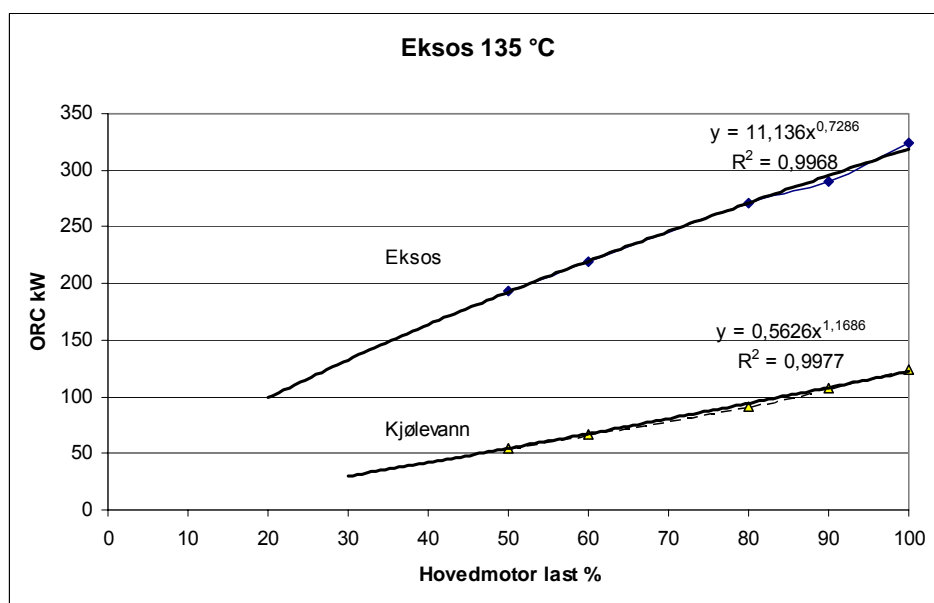
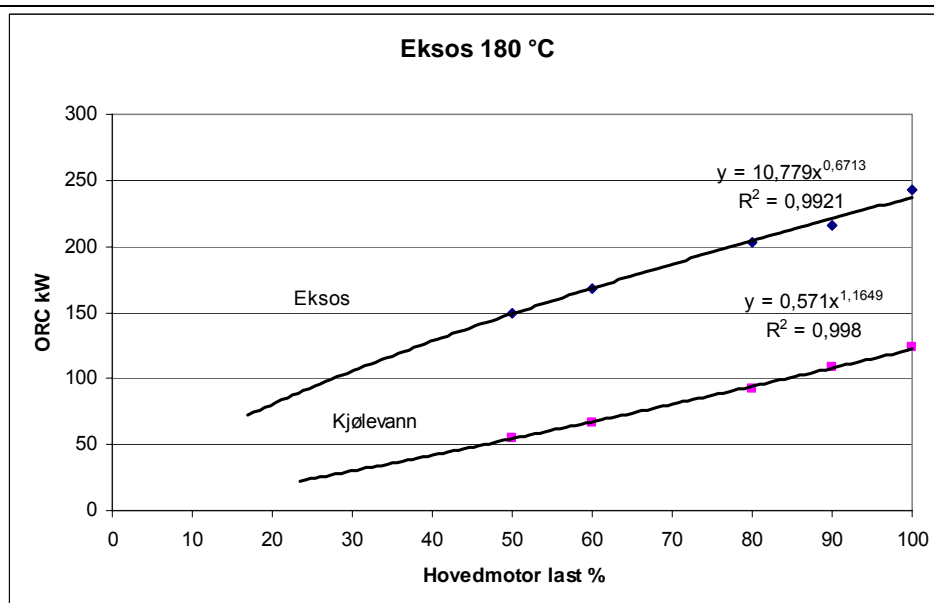
Regulering	Per år	Forbruk kg	Hoved motor MWh/år	Eksos ORC MWh/år	Kjølevann ORC MWh/år	Innsparing Prosent %
	Døgn					
Regulert kolmule	179	1844630	9223	592	229	8,9
Uregulert kolmule	212	2345174	11726	738	294	8,8
5 års gjennomsnitt	254	2894209	14471	903	364	8,8



Figur 4 ORC utbytte i % varierer med temperaturen etter eksoskjelen.

Tabell 3 Hovedmotor bruk og ORC ytelser ved rammebetingelser der kolmulefisket er regulert, beregnet for eksostemperatur 135 °C

Last %	EFFEKT kW	Tid dager	Brennolje Forbruk kg	Eksos ORC kW	Hoved motor MWh/år	Kjølevann kW	Eksos ORC MWh/år	Kjølevann ORC MWh/år
93	4200	8,8	177408	303	887	113	64	24
82	3700	27,5	488400	277	2442	97	183	64
56	2500	4,96	59520	208	298	62	25	7
53	2400	81,72	941414	202	4707	59	396	115
38	1700	3,3	26928	157	135	39	12	3
33	1500	6,96	50112	143	251	34	24	6
29	1300	5,37	33509	129	168	29	17	4
11	500	0,55	1320	64	7	9	1	0
9	400	2,4	4608	55	23	7	3	0
8	350	31,24	52483	50	262	6	37	5
7	300	6,2	8928	44	45	5	7	1
SUM		179	1844630		9223		768	229



Figur 5 Trendkurver for ORC ytelser ved varierende motorbelastning og eksostemperatur

6 Styring av ORC anlegget

ORC anlegget utstyres med styresystem som automatisk kan sette det i gang når tilgangen på varme er slik at anlegget kan startes, og stanses når tilgangen på varme ikke lenger er tilstrekkelig. Start og stopp må skje på en sikker måte, og inn og utfasing av generatorer må skje automatisk mot hovednettet der frekvensen styres av en hovedgenerator.

Hovedgeneratoren kan være en akselgenerator med variabelt turtall med nominelt variasjonsområde mellom 50 og 60 Hz.

Styresystemet har som oppgave å sikre at ORC anlegget leverer optimalt inn på dette nettet i henhold til en nærmere angitt spesifisering.

Styresystemet er beskrevet i patentsøknader:

(Cogswell et al. Nov. 2005 Patent 1) og relaterte US patentsøknad (Cogswell et al. Nov. 2005 Patent 2). Patentene tilhører United Technologies Corporation, Hartford, CT.

Patentene beskriver luftkjølte kondensatorer med elektrisk drevne vifter der turtallet kan varieres for å kontrollere kondensasjonstemperaturen. I vårt ORC anlegg har vi vannkjølte kondensatorer så her må mengden kjølevann styres på tilsvarende måte ved å variere turtallet for kjølevannspumpen P2 i Figur 1.

For å sikre pålitelig funksjon av turbinen må styresystemet sikre at

- 1 trykket på arbeidsmediet ikke overstiger maksimumsverdien
- 2 temperaturen på arbeidsmediet ikke overstiger maksimumsverdien
- 3 overhetning av arbeidsmediet ikke nærmer seg null

I det følgende er styresystemet beskrevet med referanse til Figur 1 som viser både et kjølevannsdrevet ORC anlegg og et eksosdrevet der turbinene er montert på samme kondensator.

6.1 Trykkstyresystem

Trykket på arbeidsmediet i evaporatoren bibeholdes av sentrifugalpumper P3 og P4 i Figur 1 plassert under kondensatoren. Pumpene er koblet til en tank under kondensatoren der kondensert kjølemedium samles opp. Trykket reguleres ved å regulere turtallet på pumpene. Ved konstant turtall leverer pumpene et tilnærmet konstant trykk. Pumpene vil derfor kunne levere svært forskjellige mengder ved et gitt trykk så lenge turtallet holdes konstant. Er systemtrykket høyere vil pumpegjennomstrømningen stanse opp eller reversere, og er trykket lavere vil pumpegjennomstrømningen nå et maksimum og bli ufølsom for systemtrykket.

6.2 Temperaturstyresystem

Temperaturen i evaporatoren kan kontrolleres ved å styre tilførselen av varme. I eksoskjelen gjøres dette ved å la temperaturen via styresystemet åpne bypassventilen vist i Figur 1 og slippe en del av eksosen gjennom bypassrøret slik at fordampere tilføres mindre eksosgass.

Bypassventilen må derfor styres av kontrollsystemet beskrevet i Patent 2.

For den kjølevannsdrevne evaporatoren reguleres temperaturen ved å styre turtallet på sirkulasjonspumpen (P1) for ORC evaporatoren vist i Figur 1. Alternativt kan dette gjøres ved å sette på et bypassrør og en ventil styrt av temperaturstyresystemet som slipper en del av kjølevannet forbi evaporatoren.

6.3 Overheting styresystem

Det er nødvendig å hindre at ”våt” damp tilføres turbinen. Det vil si at dampen må være overhettet, og derfor må det være et styresystem som regulerer overhetingen av drivmediet. Systemet har sensorer for måling av trykk og temperatur i fordamperen. Overheting er definert som antall grader celsius over fordampningstemperaturen. Det er ønskelig å ha mist 15 °C overheting. I kontrollsystemet legges inn en funksjon som definerer metningstrykk og temperatur og beregner minste temperatur for ønsket overheting ved gjeldende trykk. Kontrolleren vil styre turtallet på kondensatpumpen (P3 og P4) slik at nok overheting sikres.

Dersom overhetingen av drivmediet blir for liten stanses ikke turbinen men drivmediet går i bypass d.v.s. ledes forbi turbinen og tilbake til kondensatoren. Når systemet gjenvinner nødvendig overheting innenfor et en nærmere spesifisert tid gjenopptas normal turbindrift.

6.4 Inn og utfasing av ORC anlegget

Under normal drift er ORC anlegget koblet til båtens hovedgenerator som oftest er drevet av hovedmotor. Turtallet for ORC generatorene vil da være bestemt av frekvensen i hovednettet og må følge denne så lenge de er innkoblet. Generatorene i samme nett er låst til hverandres turtall som om de var koblet sammen ved hjelp av tannhjul.

Før de kobles sammen må generatorene fases inn det vil si at en generator som skal kobles til nettet må synkroniseres med nettet før den kan kobles til. Patent 1 beskriver en metode for automatisk innfasing av en ORC generator til et generatornettverk. Systemet slik det er beskrevet er ment å operere sammen med et kontrollsystem som beskrevet i Patent 2. Metoden som er beskrevet går ut på å benytte en sensor som avføler ORC generatorens rotasjonshastighet. Sensoren registrerer variasjonene i restmagnetisme og dermed generatorens rotasjonshastighet. Generatorens hastighet kjøres opp på tomgang ved å gradvis øke turtallet på sirkulasjonspumpen for ORC evaporatoren. Når rotasjonshastigheten samsvarer med nettets frekvens fases ORC generatoren inn. Utfasing foregår i motsatt rekkefølge. Inn og utfasing styres automatisk av en prosessor, sensorer og et styreprogram slik at innfasing skjer når tilgangen på spillvarme er tilstrekkelig og utfasing skjer når tilgangen ikke lenger er tilstrekkelig.

7 ORC Medier

De 2 ORC medier som er aktuelle å bruke er R245fa som har kjemisk formel $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$, har molekylvekt 134 og kokepunkt +15,3 °C. Mediet er ikke brennbart og ikke giftig. Det andre er R134a som har molekylvekt 102 og kokepunkt -26,5 °C. Dette medium er heller ikke brennbart eller giftig. R134a brukt som drivmedium for den kjølevannsdrevne ORC kretsen vil gi marginalt høyere virkningsgrad enn R245fa.

R134a har en global oppvarmingsfaktor på 1300, og R245fa har en global oppvarmingsfaktor på 950. I forhold til den mengde CO₂ utslipp som spares ved ORC gjennom levetiden på anlegget er dette forsvinnende lite dersom noe skulle lekke ut.

R245fa er i denne rapport forutsatt brukt både for eksosdrevet ORC og for kjølevannsdrevet ORC og vil da gi de virkningsgrader og de ytelser som er angitt her. Bruk av samme medium for begge ORC anleggene gir fordeler. En fordel er at det blir mulig å bruke felles kondensator som kan redusere både vekt og volum.

Sikkerhetsdata for begge gassene er innhentet hentet fra (BOC Gases).

8 Økonomi og miljø

Fra Tabell 1 kan vi se at vi kan spare 10,8 % ved bruk av ORC anlegget over året i form av elektrisk energi produsert ved ORC. Forbruket av drivstoff har vært 1 844 630 kg som tilsvarer ca 2 222 000 liter som med en pris på kr 3,50 per liter tilsvarer kr 7 777 000. Innsparingen i oljeforbruk ligger derfor på ca 240 000 liter til en samlet pris på **NOK 840 000 per år**.

Ser vi på gjenvinning av varme som er satt til 20 kW for tappevann og 80 kW for oppvarming av oppholdsrom representerer dette 100 kW spart elektrisk effekt. Over årets 179 driftsdøgn med en driftsfaktor på 50 % representerer dette 215 000 kWh som en minst ville bruke 52 000 liter olje for å produsere. Dette tilsvarer en årlig innsparing på **NOK 182 000**.

Spart brennoljeforbruk for de tiltak som er foreslått er derfor er 292 000 liter brennolje per år. Med en oljepris på NOK 3,50 per liter tilsvarer det en verdi på **NOK 1 020 000** i tillegg kommer smørolje og andre drifts og vedlikeholdskostnader.

Miljøgevinst over 20 års brukstid:

I løpet av 20 år vil ORC anlegget ha produsert elektrisk energi tilsvarende **20 GWh** som har ført til en reduksjon av utslipp til atmosfæren på **12 000 tonn CO₂ og 200 tonn NO_x**.

Varmegjenvinning til tappevann og oppvarming av oppholdsrom ved bruk av spillvarme har erstattet elektrisk energi tilsvarende 4,3 GWh som har ført til en reduksjon av utslipp til atmosfæren på **2600 tonn CO₂ og 43 tonn NO_x**.

9 Referanser

Bjørshol, N.H. 2005	<i>ORC forprosjekt</i> Fortrolig SINTEF rapport
Bjørshol, N.H. 2006	<i>ORC Pilotprosjekt Oppstart</i> Fortrolig SINTEF rapport
Cogswell et al. Nov.2005	<i>US 2005/0247059 A1 METHOD FOR SYNCHRONIZING AN INDUCTIONGENERATOR OF AN ORC PLANT TO A GRID</i> , Patent Application Publication
Cogswell et al. Nov.2005	<i>US 2005/0247056 A1 STARUP AND CONTROL METHODS FOR AN ORC BOTTOMING PLANT</i> , Patent Application Publication
BOC Gases 19.05.2005	Safety Data Sheet 1,1,1,3,3- Pentafluoropropane, HFC-245fa
BOC Gases 05.05.2003	Safety Data Sheet 1,1,1,2- Tetrafluoroethane, R134a