



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Kjernekraft på fremtidige kampfartøy

– Muligheten for en bærekraftig fremdriftsløsning i Marinen –

av

Marius Haldorsen Oksnes

Sturle Håland

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Antall ord: 14 182

Innlevert: Desember 2023

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten(ene) har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Jeg (Vi) gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning.

Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

Dato: 03 – 12 – 2023

Marius J. Oksnes
Marius Haldorsen Oksnes

Sturle Håland
Sturle Håland

Forord

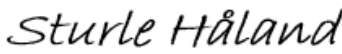
Denne oppgaven er skrevet av Marius Haldorsen Oksnes og Sturle Håland i perioden september 2023 til desember 2023. Den er skrevet som en del av studiene Bachelor i militære studier med fordypning i ledelse og marineingeniør maskin.

Oppgaven ser på muligheten til å anvende kjernekraft på nye fartøy i Marinen. Overfla-
tefartøy har tidligere vært forsøkt utrustet med atomdrevet fremdriftssystem, men droppet
grunnet for høye kostnader. Vi vil derfor se om ny kjernekraftteknologi kan fungere som
et bærekraftig fremdriftssystem på fremtidige kampfartøy.

En stor takk til våre hovedveileder Harald Totland og Linn-Kristine Glesnes Gaupholm
som har hjulpet oss med oppgavestrukturen, verdifulle innspill og diskusjoner. Vi vil også
rekke en takk til Gisle Strand, som har vært viktig sparringspartner under oppgaveskri-
vingen og supplementært med flere nyttige kilder.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 03-12-2023


Marius Haldorsen Oksnes


Sturle Håland

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven undersøker potensialet for bruk av atomkraft på marinens fremtidige kampfartøy, da særdeles bruken av SMR (små modulære reaktorer). Bakgrunnen for dette er en verden hvor global oppvarming og bærekraft i økende grad er i fokus, og Sjøforsvaret må se etter en løsning for å redusere sitt klimaavtrykk. Det er viktig at en slik omstilling ikke svekker sjøforsvarets evne til å forsvare landet, men heller forbedre den operative evnen til å forsvare Norge.

Oppgaven starter med å redegjøre for kjernekraft, kjernereaktorens oppbygning, historien til kjernekraft og forskjellige typer reaktorer. Dette for å bygge opp en forståelse for et komplisert tema, slik at leseren har det nødvendige utgangspunktet for å lese og forstå oppgaven. Kjernekraft er et tema hvor det spres mye feilinformasjon, og mange har sterke følelser i saken uten å kjenne til teorien bak det.

Oppgaven fokuserer på fremtidige SMR for å kunne drifte marinens kampfartøy. Kjernekraftteknologien har utviklet seg drastisk med årene, og snart er en helt ny generasjon av kjernereaktorer klar for å tas i bruk. Et eksempel på dette er saltsmeltereaktoren som oppgaven peker på er den beste typen reaktor å drifte marine kampfartøy, og er den typen reaktor oppgaven tar for seg i analyse og drøftings delen av oppgaven.

I oppgaven legger vi frem argumenter for hvorfor thorium kan være en bedre løsning enn uran. Vi fikk intervju Copenhagen Atomics som er en ledende utvikler av thoriumbasert saltsmeltereaktor, og basert på opplysningene oppgitt fra dem og litteratur drøfter oppgaven fordeler og ulemper med kjernekraft. Siden denne typen reaktor ikke er laget enda er det vanskelig å si hvor mye den vil koste både i innkjøp, og drift. Dette preger beregninger da det vil være vanskelig å sammenligne med fossil fremdrift rent økonomisk, men oppgaven legger frem hvor mye en reaktor kan koste for at det skal være forsvarlig. Kjernekraft byr på en rekke fordeler sammenlignet med fossilt brensel, som økt operativ evne, og redusert klimaavtrykk. Basert på tidligere bruk av kjernekraft på skip vil den initiale kostnaden være høy, men driftskostnadene kan gjøre opp for dette da kjernebrensel er mye billigere alternativ til fossilt drivstoff. Dersom prisene for kjernereaktorer går ned, er det mulig at kjernekraft vil være like billig som fossil fremdrift, og i et slikt tilfelle vil kjernekraft ha mange fordeler. Dersom kjernekraft viser seg å være dyrere, vil det avhenge av hvor stor rolle pris spiller i valg av nye kampfartøy kontra operativ evne, miljømessige forhold samt politisk og sosiokulturell aksept.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Figurer	6
Diagrammer / Grafer / Tabeller	7
Nomenklatur / Forkortelser / Symboler	8
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn.....	9
1.2 Mål	10
1.3 Problemstilling.....	10
1.4 Forutsetninger og avgrensninger.....	10
1.5 Struktur	11
2 Teori	13
2.1 Kjernekraft	13
2.1.1 Thorium og uran som brensel	16
2.2 Kraftproduksjon	17
2.2.1 Damp turbin	18
2.3 Sivil utvikling og anvendelse.....	20
2.4 Militær utvikling og anvendelse	22
2.5 Dagens og neste-generasjons reaktorer.....	24
2.5.1 PWR / BWR.....	25
2.5.2 MSR	25
3 Metode	27
4 Analyse og beregninger	28
4.1 Valg av reaktor.....	28
4.2 Stråling.....	29
4.2.1 Strålingsdose for besetning	30
4.3 Dimensjonering.....	30
4.3.1 Tekniske spesifikasjoner	31
4.3.2 Plassbehov.....	32
4.4 Sammenligning med konvensjonell fremdrift	33
4.4.1 Forbruk og driftskostnader.....	35

4.4.2	CO ₂ -utslipp	39
4.4.3	Energitetthet	40
4.5	Konsept for fremdriftssystem	42
5	Drøfting	45
5.1	Diskusjon av resultater og beregninger	45
5.1.1	Feilkilder.....	48
5.2	Sikkerhet.....	49
5.3	Pålitelighet.....	49
5.4	PESTEL-Analyse	50
5.4.1	Politiske faktorer	50
5.4.2	Økonomiske faktorer	51
5.4.3	Sosiokulturelle faktorer	52
5.4.4	Teknologiske faktorer.....	52
5.4.5	Miljømessige faktorer.....	53
5.4.6	Juridiske faktorer	54
6	Avslutning	55
7	Videre arbeid	56
	Referanseliste	57
	Vedlegg.....	62

Figurer

Figur 1: Kjedereaksjon	14
Figur 2: Generisk MSR kraftanlegg	20
Figur 3: Sammenligning av spesifikk energi for thorium, uran og MGO	42
Figur 4: Skjematisk diagram av MSR fremdriftssystem for en fregatt	43
Figur 5: Dekksprofil for MSR fremdriftssystem.....	44

Diagrammer / Grafer / Tabeller

Diagram 1: Spesifikk effekt for konvensjonell og atomdrift oppgitt i kW/tonn.	34
Diagram 2: Effekt per volumenhet for fremdriftssystemene	35
Diagram 3: Plassbehov for fremdriftssystemene	35
Diagram 4: CO ₂ -utslipp angitt i tonn for hvert hastighetsområde for en fregatt	40
Graf 1: Hastighet og ytelseskurve.....	36
Tabell 1: Bruksområde for ulike dampturbiner	19
Tabell 2: Sammenfatning av reaktorer anvendt i den amerikanske marinen.....	24
Tabell 3: Spesifikasjoner for fremdriftsmaskineri tilsvarende Nansen-klassen	31
Tabell 4: Spesifikasjoner Copenhagen Atomics MSR	32
Tabell 5: Volum for bunkers, gassturbin, dieselmotor og MSR med turbinarrangement	33
Tabell 6: Årlig MGO forbruk for en fregatt med 140 seilingsdøgn.	37

Nomenklatur / Forkortelser / Symboler

AEC: Atomic Energy Commission

BWR: Boiling water reactor (Kokvannsreaktor)

CODAG: Combined diesel and gas (Kombinert diesel og gassturbin)

DSA: Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet

GENSET: Generator-sett

GHG: Greenhouse gases (Klimagass)

IAEA: International Atomic Energy Agency

IMO: International Maritime Organization

LMFR: Liquid metal fast reactor (Flytende metall hurtigreaktor)

MCR: Maximum continuous rating (Maksimal kontinuerlig effekt)

MGO: Marin gassolje

MSR: Molten salt reactor (Saltsmeltereaktor)

MWe: Megawatt elektrisk

MWt: Megawatt termisk

NSSS: Nuclear steam supply system (Kjernekraft dampforsyningssystem)

PWR: Pressurized water reactor (Trykkvannsreaktor)

RPV: Reactor pressure vessel (Reaktor trykkbeholder)

SFC: Specific fuel consumption (Spesifikk drivstofforbruk)

SFR: Sodium fast reactor (Natriumhurtigreaktor)

SMR: Small modular reactor (Små modulære reaktor)

SOLAS: Safety of Life at Sea (Sikkerhet for menneskeliv til sjøs)

Δ : Deplasement

ρ : Massetetthet

1 Innledning

Kjernekraft til bruk på marine kampfartøy har vært et spennende konsept i lang tid. Løftet om tilsynelatende uendelig rekkevidde, samt høy ytelse, har lokket flere nasjoner til å anvende slike fremdriftssystemer på deres ubåter og krigsskip. Denne oppgaven vil utforske de tekniske, økonomiske, miljømessige og sikkerhetsmessige fordelene og ulemperne ved å anvende atomdrift i marine kampfartøy. Det vil bli lagt vekt på hvordan atomkraft kan bidra til økt rekkevidde og operasjonell kapasitet, samt reduksjon av klimagassutslipp. I tillegg vurderes hvordan slike systemer kan integreres basert på eksisterende fartøy.

1.1 Bakgrunn

I takt med en verden som i økende grad retter fokus mot miljømessige utfordringer knyttet til klimagassutslipp, står Sjøforsvaret overfor en kritisk overgangsperiode. Etter 2023 IMO GHG (greenhouse gas) Strategy er målet å nå netto-null klimagassutslipp for skipstransport innen 2050. Målet er å øke anvendelsen av alternative null- og nesten-nullutslippsbrensler innen 2030 (IMO, 2023). Den tradisjonelle avhengigheten av fossile brenslere i maritim sektor fører til betydelige CO₂-utslipp og representerer en økonomisk utfordring. Fossile brenslere er preget av stigende priser, variabel kvalitet, og ustabil tilgjengelighet. For maritime militæroperasjoner er kravet til økt utholdenhet og driftseffektivitet over lengre perioder særlig avgjørende.

Det er i denne konteksten muligheten for atomkraft på fremtidige kampfartøy presenteres som en høyst relevant problemstilling. I fremveksten av ny reaktorteknologi, særlig SMR (små modulære reaktorer), åpner det seg en mulighet for å redefinere energikilden til sjøs. Disse moderne reaktorteknologiene lover ikke bare betydelig lavere miljøpåvirkning, sammenlignet med fossilt brensel, men peker også mot en økonomisk bærekraftig løsning i det lange løp.

Søkelyset rettes mot moderne reaktorteknologier, som en løsning for en mer bærekraftig marine. Vi vil evaluere faktorer som miljøpåvirkning, økonomisk bærekraft, og forbedringer i utholdenhet for militære operasjoner. Dette blir vurdert på bakgrunn av den dynamiske naturen til global energipolitikk og økende miljøbevissthet. Målet er å fremlegge en bred analyse av atomkraftens rolle i fremtidens marine.

1.2 Mål

Denne bacheloroppgaven tar sikte på å utforske og evaluere anvendelsen av atomkraft på fremtidens kampfartøy i Marinen. Vi vil utforske fordeler og ulemper ved ny reaktorteknologi, samt diskutere kjernekraft opp mot konvensjonelle løsninger. Det skal videre fremlegges konsept for et atomfremdriftssystem, for å belyse plassbehovet sammenlignet med konvensjonelle løsninger. Sluttresultatet skal fortelle hvorvidt dette er en teknologi Sjøforsvaret bør se videre på.

1.3 Problemstilling

Hvordan kan ny kjernekraftteknologi, hovedsakelig små modulære reaktorer, muliggjøre fremstillingen av nye klasser kampfartøy med kjernefysisk fremdriftssystem? I hvilken grad vil et slikt fremdriftssystem bidra til å redusere CO₂-utslipp? Dette ses i sammenheng med en bærekraftig og fremtidsrettet marine. Oppgaven er en analyse av hvilke fordeler og ulemper en eventuell overgang til kjernekraft vil medføre. Atomfremdriftssystemet oppgaven undersøker skal sammenlignes med et lignende fremdriftssystem som er om bord på Nansen-klassen. Kjernereaktorsystemet må ha en ytelse på minimum 30 MW, og skroget er av fregattstørrelse på 5-6000 tonn deplasement.

1.4 Forutsetninger og avgrensninger

Fagområdet er stort, med mange reaktordesign som har ulike variabler og momenter. Samtidig er deler av teknologien som skal analyseres fortsatt i designfasen. På bakgrunn av dette følger det noen forutsetninger og avgrensninger som ligger til grunn for denne bacheloroppgaven. Først vil det defineres gjeldene forutsetninger, etterfulgt av avgrensninger.

Overordnet forutsettes det at leseren har generell kunnskap innenfor emnene omfattet av studieprogrammet for Marineingeniør maskin. Videre deles forutsetninger i to deler, direkte og indirekte. Av direkte forutsetninger antas det at utviklingen av ulike SMR-design, primært MSR fortsetter uten store hindringer. I tillegg tas det utgangspunkt i at produksjon og anvendelse av disse reaktorene vil følge nåværende tidslinjer. Dette gjøres grunnet vanskeligheten ved å anslå når denne teknologien er klar til bruk. Det tas forbehold om at data fremlagt fra fabrikanter og bedrifter er representative for reelle verdier.

Kjernefysisk teori avgrenses til grunnleggende prosesser, derav minimal tyngde på kvantefysikk. Oppgaven skal holdes ugradert og vil derfor ikke inkludere gradert informasjon om Nansen-klassen, til bruk i sammenlikning. Offentlig tilgjengelig informasjon og generiske verdier vil bli brukt i utregninger. Videre vil oppgaven primært forholde seg til den amerikanske marinens utvikling av kjernefysisk fremdrift. Denne avgrensningen gjøres på grunn av det store antallet land og aktører som har hatt egen utvikling parallelt. Samtidig har historikken til hensikt å danne en tidslinje for å kunne sammenligne utviklingen med ny teknologi. Ved sammenlikning av reaktortyper, vil oppgaven ikke ta for seg detaljert oppbygging av selve reaktoren, da denne informasjonen ikke er tilgjengelig. Det er et stort spenn av ulike reaktortyper som er under utvikling, vi har derfor sett oss nødt med oppgavens omfang å avgrense oss til maksimalt to løsninger. I sammenlikning av kjernefysisk og konvensjonell fremdrift brukes enkle konsepter for fremdriftssystem, som tar for seg vekt, volum og ytelse.

1.5 Struktur

Teoridelen vil ta for seg grunnleggende kjernefysisk teori og oppbygging av kjernefysiske reaktorer. Videre ser teoridelen på Rankine-syklusen i sammenheng med uthenting av elektrisk og mekanisk effekt. Deretter presenteres den historiske utviklingen innenfor kjernekraft sammen med anvendelsen av ulike design. Dette danner grunnlaget for reaktortypene som skal analyseres videre. Til slutt tar oppgaven utgangspunkt i nåværende og neste generasjons reaktortechnologi sett opp mot virkemåte, sikkerhet og ytelse.

Analysedelen definerer valg av reaktor, bakgrunn for valg diskuteres opp mot andre mulige løsninger. Videre tar den for seg sikkerhet sett i forhold til stråling fra reaktoren ut til omgivelsene. Tekniske spesifikasjoner for reaktor og konvensjonelt fremdriftssystem fremlegges for sammenlikning, samt driftskostnader, CO₂-utslipp og energitetthet av brensel. Avslutningsvis lages det et enkelt konsept for et kjernefysisk fremdriftssystem.

Drøftingsdelen diskuterer resultatene fra analysen og ser på fordeler og ulemper ved bruk av kjernekraft på fremtidige kampfartøy. Det legges ekstra vekt på å drøfte sikkerheten av den valgte reaktoren da dette er en bekymring når det kommer til kjernekraft. PESTEL-analyse brukes til å diskutere et utvalg av eksterne faktorer som vil være relevant ved anvendelse av kjernekraft.

Kapittel 6 er et oppsummerende kapittel, med avsluttende refleksjoner knyttet til om kjernekraft til bruk på fremtidige kampfartøy er en farbar vei. Til slutt presenteres forslag til videre arbeid som tar sikte på å videreutvikle denne løsningen.

2 Teori

Problemstillingen som denne oppgaven tar for seg, er omfattende og kompleks. Det er flere vinklinger som skal diskuteres og krever derfor et teoritunget grunnlag. Teoridelen tar for seg grunnleggende kjernefysikk, thorium og uran som brensel, kraftproduksjon, sivil og militær historie og til slutt dagens og neste generasjons reaktorer.

2.1 Kjernekraft

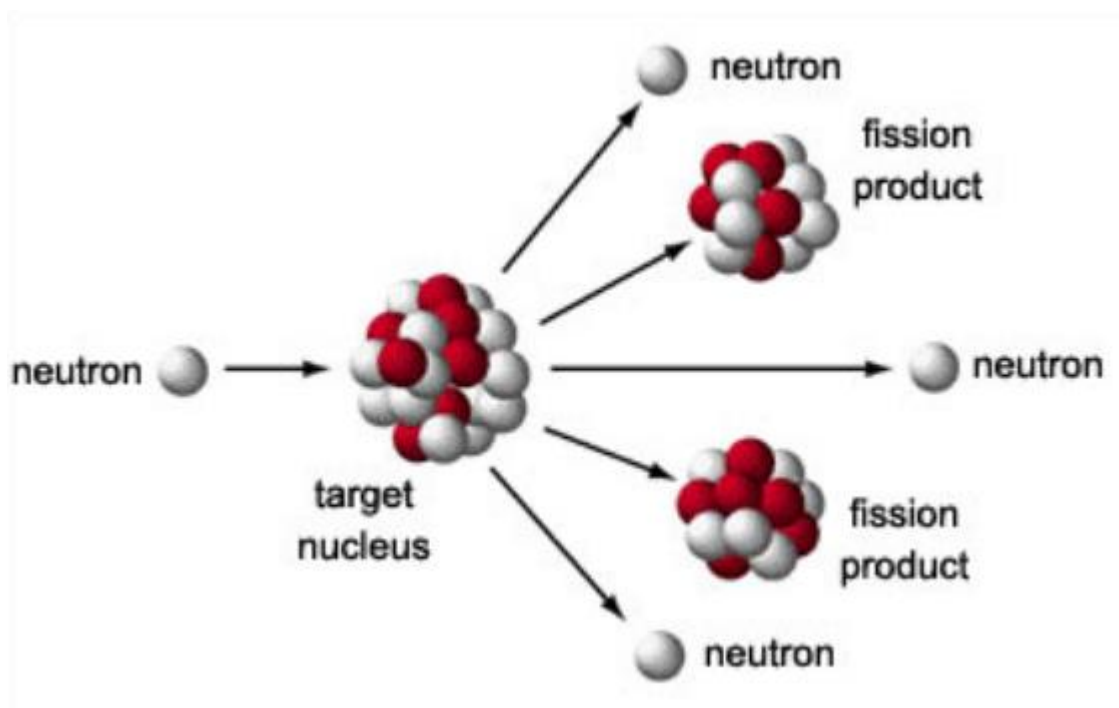
Redegjørelsen for teori av kjernekraft tar utgangspunkt i læreboken «Introductory Nuclear Physics» skrevet av Kenneth S. Krane og gir et innsyn i grunnleggende kjernefysikk. Teorien bak uran eller thorium som brensel er hentet fra Thoriumsrapporten av 2008

Atomer, som er grunnleggende byggesteiner for all materie, består av tre hovedkomponenter: protoner, elektroner og nøytroner. Protoner er positivt ladde partikler, som sammen med de nøytrale nøytronene utgjør kjernen av atomet. Dette gjør at kjernen er positivt ladd, og dermed tiltrekkes de negativt ladde elektronene som går i bane rundt kjernen. Antallet protoner i kjernen avgjør hvilket grunnstoff atomet er og kalles atomnummer, mens antallet nøytroner i kjernen bestemmer hvilket isotop atomet er. Protoner og nøytroner har samme masse, og massetall brukes for å bestemme hvilket isotop av grunnstoffet atomet er. For eksempel forekommer uran-235 og uran-238 naturlig. Siden uran har 92 protoner betyr det at uran-235 har 143 nøytroner og uran-238 har 146 nøytroner.

Kjernekraft, også kjent som atomkraft, utnytter kjernereaksjoner i atomkjerner for å generere energi. Ved å manipulere kjernereaksjoner kan masse omdannes til energi som beskrevet av Einsteins formel $E = mc^2$ hvor E er energi, m er massen som omdannes til energi og c er lysets hastighet i vakuum. Dette skjer ved å splitte et stort atom i to mindre, eller å slå sammen to små atom til et større. Disse reaksjonene heter henholdsvis fisjon og fusjon. Denne oppgaven skal kun se på fisjonsreaksjoner da fusjonsreaktorer ikke er laget enda.

Fisjon er en reaksjon der et stort (høyt massetall) og ustabil atom, splittes i to mindre atomer som vist i figur 1. Denne prosessen kan forekomme naturlig eller bli induert i en reaktor ved å sende et nøytron i atomkjernen. Nøytronet gjør kjernen til atomet ustabil noe som forårsaker at atomet splitter seg, som sender ut nye nøytroner og gammastråling. Kinetisk energi i form av bevegelsen til fisjonsproduktene frigis også etter en fisjonsreaksjon, og det er denne energien kjernereaktorer tar i bruk. På grunn av friksjonen mellom

fisjonsproduktene og omgivelsene omdannes denne kinetiske energien til termisk energi. Nøytronene som blir frigjort når atomet splittes kan kolliderer med andre atomkjerner, noe som setter i gang en ny fisjonsreaksjon som igjen frigir nye nøytroner. Dette fenomenet kalles for en kjedereaksjon. Dersom hver fisjonsreaksjon forårsaker én ny fisjonsreaksjon, omtales kjedereaksjonen som kritisk. I tilfeller hvor det oppstår færre nye fisjonsreaksjoner er den underkritisk, og dersom det forekommer flere enn én fisjonsreaksjon per fisjon er den superkritisk (dette vil forekomme i atombomber). For at én reaktor skal kunne operere kontinuerlig ønskes det å opprettholde en kritisk kjedereaksjon slik at reaktoren ikke dør ut, eller smelter ned.



Figur 1: Kjedereaksjon (Thoriumsutvalget, 2008, s.109).

Nøytronene frigitt i en fisjonsreaksjon har som oftest svært høy energi og omtales som «raske nøytroner». Raske nøytroner gir liten sannsynlighet for å indusere nye fisjonsreaksjoner, og de fleste reaktorer bruker derfor en moderator for å bremse ned nøytronene slik at den kinetiske energien reduseres. Når nøytronene passerer gjennom en moderator kolliderer de med andre atomkjerner og overfører litt av den kinetiske energien til de andre atomene, helt til alle har samme kinetiske energi. Etter at de raske nøytronene er moderert med hjelp av for eksempel tungtvann, vil den kinetiske energien til nøytronene være lik den kinetiske energien til omgivelsene. Nøytronene kalles da termiske nøytroner.

Ikke alle grunnstoff gjennomgår en fisjonsreaksjon, heller ikke alle isotoper av de radioaktive stoffene er «fissile». Med et fissilt materiale menes det stoffer som har egenskapene til å opprettholde en nukleær kjedereaksjon. Antallet nøytroner spiller en viktig rolle for stabiliteten til et atom. Et fissilt materiale kan fisjonere ved både raske nøytroner og termiske nøytroner, mens et ikke-fissilt isotop kun kan fisjonere ved hjelp av et raskt nøytron med høy nok energi. På grunn av den lave sannsynligheten for fisjon av ikke-fissile stoffer bruker reaktorer fissile isotoper for å generere varme. Ikke-fissile isotoper kan derimot omgjøres til fissile isotoper i en prosess som heter transmutasjon.

I transmutasjon kan et grunnstoff endre antall protoner, og dermed forvandles stoffet til et annet grunnstoff. Når for eksempel thorium-232 (som er den eneste isotopen av thorium funnet i betydelige mengder i naturen) blir truffet av et nøytron, vil det gjennomgå en prosess som heter beta-henfall. Når thorium-232 absorberer et nøytron, blir det til den ustabile isotopen thorium-233. Et nøytron i kjernen gjøres om til et proton samtidig som et elektron sendes ut i form av betastråling. Betastråling er en form for radioaktiv stråling. Etter to beta-henfall er thorium-233 blitt til uran-233 som er et fissilt materiale. På grunn av dette blir thorium omtalt som et fertilt materiale, da det ikke er fissilt, men kan omdannes til et fissilt materiale.

Reaktorer som utnytter thorium som brensel, kan ikke starte kun med thorium da det ikke er fissilt, men trenger et fissilt materiale under oppstart for å sette i gang produksjonen av uran-233. Reaktorer som utnytter fertile materialer for å produsere fissile materialer heter formeringsreaktorer, og er avhengig av å kunne formere mer fissilt materiale enn den forbrenner for å kunne opprettholde kjedereaksjonen. Generelt vil reaktorer inkludere mange av de samme delene, men basert på forskjeller i sykluser vil også oppbyggingen variere mellom ulike typer reaktorer. Noen konsepter vil være felles i de fleste reaktortyper. Disse vil inkludere brensel, moderator, kontrollstaver og et kjølemedium.

Kjølemediet i en reaktor skal frakte varmen fra brenselet slik at den termiske energien kan utnyttes, samt kjøle ned brenselet for å forhindre at det overopphetes og smelter. En rekke forskjellige stoffer kan brukes som kjølemedium, men det mest vanlige i bruk i dag er vann. Vann brukes også som moderator i de fleste reaktorer. En moderator bør være laget av et stoff som ikke absorberer nøytroner slik at nøytronøkonomien blir dårlig i reaktoren, men bør være et stabilt stoff som effektivt kan bremse ned nøytronene. Tungtvann vil være en bedre moderator enn vanlig vann på grunn av det ekstra nøytronet i kjernen til hydrogenatomene, men er dyrere å anskaffe. Kontrollstaver brukes også for å

kontrollere kjedereaksjonen i en reaktor. De lages av et materiale som lett absorberer nøytroner, og kan derfor senkes ned i brenselet for å forhindre at kjedereaksjonen løper løpsk.

En reaktor er veldig kompleks, men dette vil være de fundamentale komponentene til en reaktor. Det finnes mange reaktordesign, og ikke alle designene bruker alle delene. Raske reaktorer får navnet sitt siden de bruker raske nøytroner i kjedereaksjonen, og dermed er det ikke behov for en moderator for å bremse nøytronene. De fleste av dagens operasjonelle reaktorer bruker det samme vannet som både kjølemedium og moderator.

2.1.1 Thorium og uran som brensel

Dagens reaktorer bruker uran som brensel, hovedsakelig i form av 3-5 % anrikt uran. Det vil si at 3-5 % av uranet er den fissile isotopen uran-235. Resten av uranet er uran-238 som er fertilt, dette isotopet vil transmutere til den fissile isotopen plutonium-239. Man kan også bruke thorium som brensel i en reaktor. Som tidligere nevnt vil thorium transmuteres til uran-233 for å drive fisjonsreaksjonen, og bruken av dette drivstoffet har en rekke fordeler. Thorium har vært mye i fokus i kjernekraftmiljøet basert på potensialet for billig grønn energi, og i 2008 så regjeringen på muligheten for thoriumreaktorer i Norge. Fra rapporten kommer det frem at Norge har en av de største thoriumforekomstene i verden, men data på dette er basert på gamle undersøkelser, og nye undersøkelser burde foretas før eventuell utvinning. Thorium er også et biprodukt under utvinning av sjeldne jordmetaller, og i 1970 nådde årsproduksjonen av thorium 1000 tonn (Thoriumsutvalget, 2008, s.1).

Thorium behøver heller ikke å anrikes når det skal brukes i en formeringsreaktor, da det kun forekommer thorium-232 i naturen. Tungtvannsmodererte trykkvannsreaktorer trenger ikke anrikt uran for å operere, men kan bruke naturlig uran som brensel. Disse reaktorene er derimot dyrere, mer kompliserte og større enn en vanlig trykkvannsreaktor, og vil dermed ikke ses videre på i denne oppgaven. Thoriumforekomsten er også betydelig mye større enn uran, og det er en mindre krevende prosess å utvinne thorium. Dosebelastningen fra utvinning, samt avfallet fra gruvedriften er betydelig mindre enn i utvinningen av uran. I en ren Th/U-syklus produseres det ikke plutonium eller andre transuroner, noe som fører til at avfallet produsert av en thoriumreaktor vil være betydelig mindre radiotoksisk, og må ikke lagres like lenge som avfallet produsert i en U/Pu-syklus.

Avfall som blir produsert vil også påvirkes av hvilket reaktordesign som tas i bruk. Ifølge Thoriumrapporten av 2008 trekkes det frem at “avfallet fra en brenselssyklus med thorium vil bli betydelig mindre enn for en standard U/Pu-syklus under samme forhold” (Thoriumsutvalget, 2008, s.73). Under samme forhold vil thorium som brensel produsere mindre avfall i volum, og avfallet har kortere halveringstid. “Burnup” er et begrep som blir brukt for å si noe om hvor mye av brenselet som blir oppbrukt. I en vanlig PWR (Pressurized Water Reactor) vil mesteparten av det originale drivstoffet fortsatt være i avfallet, og dermed har denne en lav “burnup”. En formeringsreaktor basert på thorium kan brenne tilnærmet alt brenselet.

Basert på forekomsten av thorium, særdeles i Norge, vil thorium som brensel ikke være en mangelvare. Uran-markedet er derimot mer etablert enn thorium-markedet, og langt mer testing og driftstimer har gått inn i uran. Dermed er uran mer kjent og lettere å anvende, selv om thorium også har vært testet i reaktorer. Thorium kan brukes i de fleste eksisterende reaktorer, men thorium trenger et fissilt materiale for å sette i gang formeringsprosessen. Dette kan for eksempel være plutonium hentet fra radioaktivt avfall produsert av U/Pu-syklusen, som kan redusere behovet for langtidslagring av radioaktivt avfall. På grunn av at Th/U-syklusen ikke produserer plutonium er det også vanskeligere å produsere atomvåpen ved hjelp av en thoriumreaktor.

Thoriumrapporten (2008) konkluderer med at det trengs mer forskning på thorium, og det er for tidlig å si om thorium kan være en løsning for kjernekraftverk. Rapporten er skrevet i 2008 og mye har skjedd innen kjernekraft siden den tid. Rapporten gir et godt innsyn i forskjellige reaktorer og thoriumsyklusen, men det er viktig å ta hensyn til nyere forskning også. Prinsipper i kjernekraft har ikke endret seg mye siden rapporten ble utgitt, og mange teoretiske design for nye typer reaktorer har eksistert lenge. Det er først i nyere tid enkelte design nærmer seg produksjon, og resultater av thorium i reaktorer vises.

2.2 Kraftproduksjon

Kjernekraftproduksjon bærer mange likhetstrekk med tradisjonelle fossildrevet varmekraftverk. På mange måter kan selve kraftproduksjonen anses som prinsipielt identiske. Varmekraftverk anvender hovedsakelig kull, olje og naturgass som brensel, og i korte trekk omgjøres termisk energi til elektrisk energi. Denne prosessen fremstilles som regel på en av to måter, enten ved bruk av gass- eller dampturbiner. Henholdsvis refereres disse

til som Brayton- og Rankine-syklus i termodynamisk sammenheng. Gassturbiner i kjernekraftproduksjon ses bort ifra, da denne konfigurasjonen normalt sett ikke anvendes. Ved strømproduksjon er turbinen koblet på en generator, men for skipsfremdrift kobles turbinen direkte på propellakslingen gjennom et reduksjonsgir. Termisk virkningsgrad for syklusen er ved $\eta_t = \frac{|\dot{W}_{net}|}{\dot{Q}_{inn}} = \frac{\dot{Q}_{23} - |\dot{Q}_{41}|}{\dot{Q}_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$ (Bailey, 2012, s. 394).

2.2.1 Damp turbin

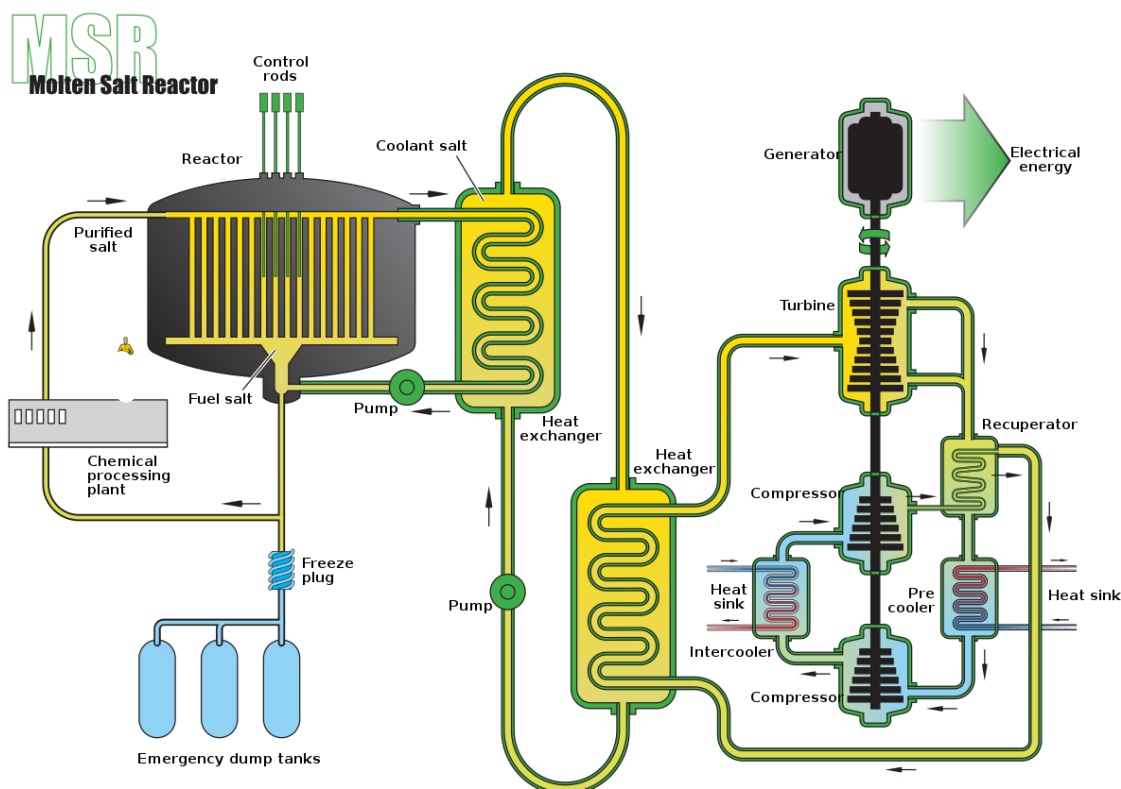
Varmekraftverk brenner kull og olje for å frigi termisk energi. Den termiske energien brukes til å koke vann som sirkulerer i rør gjennom dampkjelen, og dampen føres så inn i en turbin hvor den utfører arbeid. Videre kondenseres dampen tilbake til væske i kondensatoren, før den pumpes tilbake inn i kjelen. Kjernekraftverk fungerer i stor grad på samme måte, og forskjellen ligger i fremstilling av den termiske energien som overføres til arbeidsmediet. Reaktorinstallasjon har som regel en primær- og sekundærkjølekrets. Primærkjølekretsen overfører termisk energi fra kjernebrenselet til sekundærkjølekretsen i en dampgenerator. Dampgeneratoren utnytter den termiske energien for å produsere damp og trykk som den bruker for å drive turbinen.

Dampkvaliteten henger nøye sammen med virkningen til damp turbinen. Tabell 1 er hentet og oversatt fra *Compendium Marine Engineering* (Ackermann, 2009, s. 193). Den viser til ulike typer damp turbiner, dampparametere og tilhørende bruksområder. Det er verdt å merke seg at tabellen oppgir bruken av mettet damp for kjernekraftverk. Mettet damp er damp som ligger på kokepunktet for det gitte trykket. Overmettet damp, har i motsetning blitt varmet opp forbi kokepunktet for det gitte trykket. De to tilstandene har ulik entalpi, (mengde av varme i systemet). I praksis innebærer dette at mettet damp ikke har noe termisk energi å gi fra seg før det begynner å kondensere. En damp turbin drevet av mettet damp vil da oppleve å bli utsatt for «våt»-damp. Etter hvert som dampen utfører et arbeid, vil den begynne å kondensere i turbinen. Driftsmessig vil dette medføre erosjon på turbinbladene over tid. Denne løsningen anvendes uansett på kjernekraft og det brukes egne damp turbiner designet for mettet damp.

Type dampturbin	Dampparameter		Bruksområde
	Innløp	Utløp	
Kondenserende turbin	Overmettet damp	$p_{\text{Con}} < p_{\text{amc}}$	Kraftverk og skipsbyggingsindustri
Mottrykksturbin		$p_{\text{back}} > p_{\text{amc}}$	
Ekstraksjonskondensatorturbiner		$p_{\text{E}} > p_{\text{amc}}$ $p_{\text{Con}} < p_{\text{amc}}$	Kraftvarmeverk og industri
Mettet dampturbin	Mettet damp	$p_{\text{Con}} < p_{\text{amc}}$	Kjernekraft

Tabell 1: Bruksområde for ulike dampturbiner. Kondenserende, mottrykks- og ekstraksjonskondensatorturbiner bruker alle overmettet damp på innløpet, men har varierende trykkforhold på utløpet. Trykkforholdene er et resultat av ulike konstruktive design for å øke virkningsgraden til turbinen og gjøre at den er best egnet for sitt bruksområde. For kjernekraftverk brukes det vanligvis mettet dampturbin, som vil ha en lavere virkningsgrad enn de overnevnte turbinene. Dette gjøres hovedsakelig som et sikkerhetstiltak, grunnet lavere trykk og temperatur, men gir fordelene av en lettere konstruksjon.

Reaktortype og bruksområde har en del å si for utformingen av dampturbinarrangementet. Allikevel vil utformingen til kjernekraftanleggene være relativt like. Figur 2 er en skjematisk fremstilling av en MSR (Molten Salt Reactor), med tilhørende kraftproduksjonsanlegg. Disse reaktorene benevnes vanligvis som saltsmeltereaktorer på norsk.



Figur 2: Generisk MSR kraftanlegg (IAEA, 2022). Figur 2 viser en generisk saltsmelte-reaktor, og andre saltsmelte-reaktorer vil kunne være konfigurert ulikt. Purified salt/Fuel salt strømmer gjennom kjernen (reactor) i en loop gjennom «chemical processing plant» som fortløpende fjerner fisjonsprodukter fra «fuel salt» slik at reaksjonen ikke hindres. Nederst ser man «Emergency dump tanks» hvor saltet dumpes dersom reaktoren mister strøm og overheter. Saltet dumpes her dersom temperaturen til saltet blir for høy, noe som gjør at «Freeze plug» smelter. Brenselsaltet (fuel salt) går gjennom en varmeveksler (heat exchanger) hvor varmen overføres kjølesaltet (coolant salt), og dette går inn i en ny varmeveksler og varmen overføres til dampsystemet (alt til høyre for varmeveksleren).

2.3 Sivil utvikling og anvendelse

Anvendelse av kjernekraft er ikke et nytt konsept, ei heller forbeholdt militære bruksområder. Den sivile oppdagelsen, fremvekst og anvendelse av kjernekraft er basert på historiske hendelser nevnt i *THE HISTORY OF Nuclear Energy* (U.S. Department of Energy, 1995, s. 4-9). Kjernekraft har sitt opphav fra fysiker Enrico Fermi sine forsøk i 1934. Forsøkene innebar å bombardere uranatomer med nøytroner. Resultatet var nye grunnstoffer som var mye lettere enn uran, noe som var uventet. Ytterlige forsøk ble utført i 1938 av Otto Hahn og Fritz Strassmann. Igjen viste det seg at summen av atommassene

til de nye grunnstoffene var noe lettere enn det opprinnelige uranatomet. Noe av massen var borte. Resultatene ble videreformidlet til Lise Meitner, som kom frem til at uranatomet hadde fisjonert. Den resterende massen hadde blitt omgjort til energi i henhold til Einsteins teori.

Niels Bohr, kompanjongen til Meitner dro til USA i 1939 og presenterte funnet til Einstein. Under en konferanse om teoretisk fysikk kom han i kontakt med Enrico Fermi. Sammen diskuterte de muligheten for å skape en selvgående kjedereaksjon, som kunne avgi store mengder energi. Forskere verden rundt begynte å anse det som en reell mulighet. Allerede i 1941 hadde Fermi sammen med Leo Szilard laget et konsept for en uranreaktor. 2. desember 1942 ble teori til virkelighet under ledelsen av Fermi. Chicago Pile-1 oppnådde en selvgående kjedereaksjon.

Under andre verdenskrig var fokuset på kjernekraft rettet militært. Først i 1951, etter byggetillatelse fra AEC ble Experimental Breeder Reactor 1 den første reaktoren til å produsere elektrisk effekt. Tilkoblet reaktoranlegget var fire opplyste lyspærer som markerte starten av kjernefysisk energiproduksjon. Teknologien stammet fra utviklingen og anvendelsen av kjernefysiske våpen. Tre år senere begynte Obninsk kjernekraftverk å levere strøm på det sovjetiske strømmnett, 5 MWe (Megawatt elektrisk). Etterfulgt av England med Calder Hall kjernekraftverk i 1956, fire stykk 60 MWe. Drift av Shippingport Atomic Power Station i Pennsylvania startet i 1957, 60 MWe. Dette var verdens første kjernekraftverket bare for sivil kraftproduksjon.

Anvendelse av kjernekraft på sivile fartøy hang noen år etter utviklingen av landinstallasjonene. Sovjetunionen var svært frempå her, med den atomdrevne isbryteren *Lenin* i 1959. Det amerikanske NS *Savannah* ble det første sivile handelsfartøyet med nukleær fremdrift fra og med 1962. *Otto Hahn* og *Mutsu*, startet drift i 1968 og 1970 men ble i etterkant bygd om til dieselfremdrift. Fellesfaktoren var store driftskostnader. Sovjetunionen fortsatte derimot med produksjon av fartøy med nukleær fremdrift. Henholdsvis Arktika- og Teymyr-klassen, isbrytere, fra og med 1970- og 80-tallet. Av sivile fartøy med nukleær fremdrift per 2023, er Teymyr-klassen og handelsfartøyet *Sevmorput* de eneste som fortsatt er i drift. Sett bort i fra Sovjetunionens bidrag av isbrytere har sivil anvendelse av nukleær fremdrift vært relativt fraværende. Mye av årsaken er høye initial- og driftskostnader. Avhending av radioaktivt avfall medfører sine vanskeligheter i tillegg, både miljømessig og politisk.

2.4 Militær utvikling og anvendelse

Suksessen til Chicago Pile-1, den første selvgående kjernereaktoren, muliggjorde fremveksten av Manhattanprosjektet som varte frem til 1948. Utviklingen av kjernekraft fokuserte hovedsakelig på kjernefysiske våpen i kappløp mot Sovjetunionen. De store mengdene energi produsert av en kjedereaksjon førte etter hvert til at militæret begynte å forske på kjernefysiske reaktorer parallelt med atomvåpen. I konfigurasjon med dampturbin kunne en reaktor produsere nok kraft til å gi ubåter og andre marinefartøy tilsynelatende endeløs rekkevidde. Admiral Hyman G. Rickover, omtalt som «father of the nuclear Navy», bidro sterkt i utviklingen av nukleær fremdrift i den amerikanske marinen (Naval History and Heritage command, 2023). USS *Nautilus* var i 1955 verdens første ubåt drevet av kjernekraft. Ubåten var drevet av en letvannsmoderert PWR, med ytelse på 11,2 MW (World Nuclear Association, 2023). Etterfølgeren, USS *Seawolf*, anvendte en SFR (Sodium Fast Reaktor), men problematikk oppsto rundt å hindre natriumet i å stivne, og reaktoren måtte derfor konstant driftes. Reaktoren krevde videre kraftig skjerming på grunn av kjølemediet som ble svært radioaktivt. På grunn av problemer med «bypass»-mekanismen til overheteren fikk ikke natriumet overført nok varme til dampkretsen, noe som medførte at natriumet i reaktoren brant. Derav ble reaktoren erstattet med en PWR liknende den om bord USS *Nautilus* (Tsvetkov, 2011, s. 8). uk

Forskning på atomdrevne overflatefartøy ble igangsatt som et resultat av suksessen til USS *Nautilus*. I 1960 ble USS *Enterprise* sjøsatt, og var utrustet med åtte kjernereaktorer av typen A2W med en samlet effekt på 208,8 MW (Naval Technology, 2020). Enterprise-klassen skulle være en serie av seks hangarskip, men de resterende fem ble aldri bygget grunnet uforutsette store kostnader. Dette hindret ikke byggingen av nye atomdrevne fartøysklasser. USS *Long Beach* ble den første og eneste cruiseren USA bygde og var i drift fra 1961 til 1995 (Naval History and Heritage Command, 2015). Cruiseren var utrustet med to C1W-reaktorer på 30 MW hver, dermed enda høyere effekt per reaktor enn USS *Enterprise*. Innen 1962 hadde den amerikanske marinen 26 ubåter, med 30 nye planlagt. Den atomdrevne flåten var under hurtig utvikling, og etter Skate-klassen ble det utviklet en serie med standardiserte reaktordesign av Westinghouse og General Electric. Det ble videre bygget fire destroyer-klasser, seinere redesignet til cruiser, med to D2G-reaktorer. Bainbridge-, Truxtun-, California- og Virginia-klassen markerte slutten på «mindre»

atomdrevne overflatefartøy for den amerikanske marinen. Bygge-, drift- og vedlikeholds-kostnader var for høye og kapasiteten for økt hastighet gjorde at resten av flåten ikke kunne holde følge (Spears, 2014).

I samme tidsrom drev Sovjetunionen utvikling av egne atomdrevne ubåter. November-, Echo- og Hotel-klassen begynte drift i 1959, med to VM-A på 70 MWt (Megawatt termisk). *K-27*, i drift fra 1963 var den første ubåten med en eksperimentell LMFR (Liquid Metal Fast Reactor). De to reaktorene på 73 MWt var kjølt av eutektisk blanding av bly og vismut, med fordelen av mye mindre reaktordesign sammenlignet med tradisjonelle PWR. Etter bare noen få år i drift oppstod det en reaktorfeil som resulterte i at ni fra besetning ble utsatt for dødelige mengder stråling. Nye 155 MWt LMFR ble anvendt i Alfa-klassen, disse var plaget av driftsproblemer likende SFR på USS *Seawolf*. Reaktorene måtte konstant driftes for å holde høy nok temperatur på kjølemediet. Under sjøprøver av ubåten *K-377* (tilhørende Alfa-klassen) frøs kjølemediet og ubåten måtte demonteres. Igjen oppstod det feil på reaktorene, denne gangen på *K-123* hvor kjølemediet lakk inn i dampgeneratoren. Resultatet av dette var Sovjetunionen gikk over til PWR for alle nye fartøy (The Nonproliferation Review, 2002, s 166).

De ulike amerikanske marine reaktorene hadde en driftstid på 25 til 33 år mellom brenselbytte (World Nuclear Association, 2023). Effekten ut på propulsorene var mellom 1,9 MW til 104,4 MW, sett bort ifra S1B og A1B hvor ytelsen offentlig oppgitt, men antakeligvis høyere. Tabell 2 er en sammenstilling av alle reaktorene anvendt på amerikanske fartøy. Det er en videreutvikling av tabellen hentet fra *Nuclear power: Deployment, operation and sustainability* (Tsvetkov, 2011, s. 24).

Fartøystype	Benevning	Reaktortype	MWt	MW
Ubåt	S2W / S2Wa	PWR	60	11,2
	S2G	SFR	Ukjent	Ukjent
	S2C	PWR	13	1,9
	S3W	PWR	38	5,4
	S4G	PWR	78	25,4
	S4W	PWR	38	5,4
	S5G	PWR	90	12,7
	S5W	PWR	78	11,2
	S6G	PWR	148-165	52
	S6W	PWR	220	26,1
	S8G	PWR	220	26,1
	S9G	PWR	210	29,8
	S1B*	PWR	Ukjent	Ukjent
Hangarskip	A2W	PWR	165	26,1
	A4W / A1G	PWR	550	104,4
	A1B**	PWR	Ukjent	Ukjent
Cruiser	C1W	PWR	200	29,8
Destroyer	D2G	PWR	148	26,1

Tabell 2: Sammenfatning av reaktorer anvendt i den amerikanske marinen.

* Installeres på nye Colombia-klassen, effekt er enda ukjent.

** Installert på USS *Gerald R. Ford*, kilder tilsier 25% økning over A4W på 700 MWt. Nøyaktig spesifikasjoner for effekt var ikke mulig å oppspore og settes derfor til «ukjent».

2.5 Dagens og neste-generasjons reaktorer

Det eksiterer et enormt spekter av forskjellige reaktordesign, med enda flere under utvikling. Normalt har PWR og BWR blitt anvendt til kraftproduksjon, I tillegg har MSR vokst frem som mulig erstatter for disse. Punktet tar derfor for seg de eksisterende løsningen som PWR/BWR og neste-generasjons reaktor av typen MSR.

2.5.1 PWR / BWR

Dagens atomdrevne skip bruker hovedsakelig PWR for fremdrift. En PWR bruker anrikket uran som brensel i form av lange stenger satt sammen av mindre briketter. Kjølemediet er vanlig vann eller tungtvann og transporterer varmen fra kjernebrenselet til en sekundærsøyfe gjennom en varmeveksler hvor damp produseres. For å unngå at kjølevannet koker og skader rør og pumper må trykket vanligvis heves til rundt 140 bar. Dette øker koketemperaturen slik at utløpstemperaturen fra reaktoren kan være 280 °C, noe som øker den termiske virkningsgraden til reaktoren. Vannet fungerer også som moderator i en slik reaktor (Plumb, 1987, s. 65).

BWR er også en hyppig brukt reaktortype på land. Denne reaktortypen har kun én vannkrets, hvor vannet koker i kjernen av reaktoren med brenselet for å produsere damp. I essens er dette en enklere versjon av PWR, men blir ikke brukt i fremdrift av fartøy. Vannet i kjernen blir bestrålt av brenselet, noe som fører til at vannet blir radioaktivt. Dette skjer da nøytronene kan absorberes av vannet og skape radioaktive stoffer som tritium, noe som kontaminerer resten av kretsen som turbin og kondensator. Dermed er ikke dette ideelt å ta i bruk om bord på fartøy, da man må ha mye strålevern i dampkretsen og det ikke er mulig med fortløpende reparasjoner av disse delene.

2.5.2 MSR

En MSR er en type reaktor som bruker smeltet salt, ofte en blanding av fluorsalter som kjølemedium i stedet for vann. I en slik reaktor er også brenselet løst opp i saltet slik at også brenselet er flytende. Saltet pumpes gjennom kanaler hvor det er en moderator, ofte grafitt eller tungtvann, for å bremse de raske nøytronene. Saltet går i en krets gjennom en dampgenerator hvor varmen hentes ut og brukes til å drive en dampturbin. En MSR kan brukes med uran eller thorium som brensel, men er mest effektiv dersom den kjøres som en formeringsreaktor. I en slik konfigurasjon vil det være et brenselssalt i kjernen og et teppesalt utenfor kjernen. Teppesaltet vil sirkulere rundt kjernen og fanger nøytroner som slipper ut av kjernen. I teppesaltet er et fertilt materiale løst opp i saltet, og når ekstra nøytroner fra kjernen fanges opp transmutteres disse til et fissilt materiale og kan deretter brukes i brenselssaltet.

Siden brenselet er løst opp i salt, og brenselssaltet består av kun fissilt materiale vil oppbrenningsgraden av brenselet være stor. Det vil si at man ikke må bytte brensel siden alt blir oppbrukt, men at det heller må påfylles nytt brensel. En slik reaktor trenger derimot

svært god nøytronøkonomi og kontinuerlig fjerning av fisjonsprodukter slik at kjedereaksjonen ikke stopper. Fisjonsproduktene produsert av en thoriumdrevet saltsmeltereaktor har en kort halveringstid og trenger kun å oppbevares i 300 år. Til sammenligning estimerer Copenhagen Atomics at fisjonsproduktene for dagens på PWR på oppbevares i 100 000 år, på grunn av plutonium i avfallet.

Dersom saltsmeltereaktoren kjøres som en formeringsreaktor med trege nøytroner kreves det veldig god nøytronøkonomi, og det må ikke brukes stoffer som absorberer mye av nøytronene. Dermed er det foretrukket å ikke bruke kontrollstaver da disse vil absorbere mye av nøytronene. Siden brenselet er løst opp i saltet, og saltet utvider seg ved høyere temperaturer, medfører dette at reaksjonsgraden går ned. Dette vil fungere som en passiv sikring for å forhindre at reaktoren blir superkritisk. Sikkerhet er et eget punkt senere i oppgaven, og her vil passiv sikkerhet drøftes mer.

3 Metode

Denne bacheloroppgaven fremstilles som en litteraturstudie. I den sammenheng bygger analysen på omfattende litteratur og forskning innen problemområdet. Det er valgt en kvalitativ tilnærming for å overholde begrensninger satt av tiden til disposisjon. Overordnet har målet vært å sikre en mest mulig konsis sammenligning av atomfremdrift og konvensjonelle fremdriftsløsninger. Vi har brukt International Atomic Energy Agency sin database for vitenskapelige og tekniske publikasjoner. Søkeord som har blitt benyttet: «reactor types», «small modular reactor», «deployment small modular reactor», «molten salt reactor», «nuclear power plant safety». Supplerende databaser som har gjennomgått søk er JSTOR, ScienceDirect og U.S. Department of Energy. Disse har hovedsakelig blitt brukt til å støtte teoridelen, men også i analysen.

For å sikre troverdighet og gyldighet av informasjon som har blitt benyttet, har kildekritikk vært prioritert. Troverdighet og gyldighet er avgjørende faktorer for å opprettholde integriteten av analysen. Publikasjoner vi har valgt å inkludere i oppgaven, har blitt sjekket opp mot forfatterens kompetanse og bakgrunn for å sikre troverdighet til kilden. Fremstilling av tematikk som omhandler marint fremdriftsmaskineri og tilhørende systemer er hentet fra pensumbøker. Dette er videre tilført tekniske spesifikasjoner hentet fra General Electric og MTU. Tidsgyldighet har også vært vurdert knyttet til publikasjoner om reaktorutvikling; publikasjoner eldre enn 25 år anses foreldet grunnet utdatert teknologi og er derfor blitt valgt bort.

Det har blitt gjennomført et intervju med Copenhagen Atomics for å utvide vår kunnskap om en spesifikk reaktor. Vi fikk snakke med en representant fra selskapet, og intervjuet ble gjennomført digitalt gjennom Google Meet. Det ble utarbeidet en liste med spørsmål til intervjuet, disse er vedlagt som vedlegg 1. Spørsmålene var basert på teknisk spesifikasjoner om deres saltsmeltreaktor. Levetiden til reaktoren var blant annet noe en tematikk som ble diskutert i dette intervjuet. Selve intervjuet ble tatt opp i form av lydopptak, med tillatelse fra Copenhagen Atomics. Det har ikke blitt behandlet noen personopplysninger, og opptaket har blitt slettet etter at informasjonen ble behandlet.

4 Analyse og beregninger

Dette kapittelet vil presentere valg av reaktor og nærliggende temaer som stråling. Videre går den gjennom konfigurasjonen til de to tiltenkte fremdriftssystemene, med tilhørende tekniske spesifikasjoner. Det vil være beregninger for vekt, ytelse, plassbehov, driftskostnader, utslipp og energitetthet. Avslutningsvis fremlegges det et enkelt fremdriftskonsept for en atomdrevet fregatt, med et skjematisk diagram og plantegning for å vise plasseringen av de ulike komponentene i fartøyet.

4.1 Valg av reaktor

Det er flere typer reaktorer som egner seg til bruk på marinekampfartøy, men alle kommer med fordeler og ulemper. Alle tradisjonelle kjernereaktorer benytter vann som kjølemedium, noe som kan by på sikkerhetsbekymringer. Det forskes på mange nye reaktordesign som ikke bruker vann som kjølemedium, men heller gass, salt eller metall. Siden virkningsgraden til dampsyklusen blir bedre med økt temperatur, og trykksetting av vann fører til dyrere konstruksjon og økt eksplosjonsrisiko, forskes det på alternative kjølemedium.

Varmekapasiteten til kjølemediet spiller også en stor rolle i hvor stor plass reaktoren tar i forhold til ytelse. Flytende bly- og natrium-reaktorer er populære ideer, men er vanskelige å få til, da det er noe vanskeligere å regulere kraftproduksjonen og de bruker raske nøytroner. Dersom noe skulle skje, som en eksplosjon eller vanninntrengning i kjølesløyfen, er natrium ekstremt reaktivt og kan føre til store skader på personell og materiell. Hverken bly- eller natrium-reaktorer har den samme passive sikkerhet som saltsmelteaktorene da disse kan bli superkritiske og trenger kontrollstaver dersom noe skulle skje. Både bly- og natriums-kjølte reaktorer har vært forsøkt som tidligere nevnt, ble ikke reaktorene videreført.

Det eksisterer en rekke andre reaktorer som eksempelvis gasskjølte reaktorer, men gass har en lav varmekapasitet så man vil ikke kunne hurtig regulere ytelsen til reaktorene, og dersom man skal få samme effekt fra en gass-kjølt reaktor, må den være større sammenlignet med andre reaktortyper.

I denne oppgaven har vi valgt å fokusere på reaktorer som bruker thorium som brensel fremfor uranreaktorer. Som diskutert er det store fordeler med thoriumsyklusen, og forekomsten i Norge er god. På bakgrunn av sikkerhetsaspekter, avfall, og evnen til å hurtig

regulere anses denne reaktoren som et godt utgangspunkt til bruk på et kampfartøy. Dermed vil oppgaven ta for seg en MSR som bruker thorium-syklusen for å se om dette er en farbar vei for Marinen.

Copenhagen Atomic:

For å få et innsyn i moderne saltsmeltreaktorer har vi vært i kontakt med et ledende selskap innenfor denne sektoren, Copenhagen Atomic. De forsker på en thorium-basert saltsmeltreaktor. Reaktoren er en formeringsreaktor som yter 100 MW termisk, og har størrelsen til en standard 40 fots kontainer. Reaktoren deres er moderert med tungtvann, som vil si at den opererer i det termiske spekteret med termiske nøytroner. Vi bruker deres reaktor kun som et konsept slik at vi kan få noe data på fremtidige saltsmeltreaktorer, og en eventuell anbefaling på saltsmelte-reaktor vil være basert på konseptet og ikke Copenhagen Atomic sin reaktor

4.2 Stråling

Strålingssikkerhet er en fundamental forutsetning for operasjonell integritet og besetnings velferd. Reaktorens strålingsnivå må kontinuerlig overvåkes og reguleres for å beskytte mannskap og miljø. Strålingsvern om bord på kampfartøy krever derfor et omhyggelig design av skjold og effektive overvåkningssystemer. Dette er en risiko som må adresseres ved konstruksjon av maritime reaktorer, slik at sikkerheten er tilstrekkelig. For å få et bedre innblikk i eksponering av stråling ved tjeneste på atomdrevne kampfartøy, hentes data fra det japanske Utenriksdepartementet (Ministry of Foreign Affairs of Japan, 2006). Skrivet er skrevet i samhandling med den amerikanske marinen og omfatter sikkerhet ved amerikanske atomdrevne kampfartøy. Punktet vil ta for seg strålingsdoser for besetning i tilknytning til atomreaktorer.

Relevant informasjon til sammenligning, bakgrunnsstrålingen i Norge er på 5-6 mSv/år. Fra doser på om lag 100 mSv og oppover forventes det en proporsjonal økning i DNA-skader (FHI, 2022). Den dødelige strålingsdosen ligger på mellom 4000-6000 mSv. Grenseverdier for ioniserende stråling er 20 mSv/år for arbeidstakere over 18 år (Forskrift om tiltaks- og grenseverdier, 2011, § 4-1).

4.2.1 Strålingsdose for besetning

Strålingsdosen for amerikansk personell i Nuclear Propulsion Program (NPW) har vært nøye loggført, og siden 1980 har alt personell vært monitorert for å stadfeste den gjennomsnittlige strålingsdosen. Det årlige gjennomsnittet fra 1980 frem til 2005 var 0,44 mSv/år. På grunn av bedre strålingsvern har trenden vært nedgående, og i 2004 var gjennomsnittet 0,38 mSv/år (Ministry of Foreign Affairs of Japan, 2006). En rapport fra 2018 viste til en enda kraftigere reduksjon for 2017 og 2018 med et gjennomsnitt på 0,09 mSv/år (Department of the Navy, 2018, s. 1). Dette tilsvarer omtrent et røntgenbilde av brystkassen på 0,1 mSv eller 0,9% av strålingen ved fullkroppss CT på 10 mSv (United States Nuclear Regulatory Commission, 2022).

Ved konfigurering av nye kampfartøy i Marinen, må strålingsvernet være av et slikt omfang at tilsvarende lave strålingsdoser kan oppnås. Landinstallasjoner som Copenhagen Atomics MSR er tiltenkt vil normalt sett har mindre strålingsvern enn en marin reaktor. Dette er fordi de ikke trenger å ta høyde for en besetning som både jobber og bor i nær tilknytning til reaktoren. En marin reaktor av dagens standard skal tåle å utsettes for svært mye før det oppstår fare for helse og miljø. Risikoen er imidlertid til stede, noe som gjør dette til en tematikk som krever oppmerksomhet. På et atomdrevet kampfartøy vil det være fire barrierer til stede: brenselet, den helsveiste og lukket primærkretsen, innkapslingen / reaktorrommet og skroget som en helhet. Skroget vil da ikke være en barriere som gir beskyttelse mellom reaktorkjernen og besetning, men vil være en barriere for eksterne trusler. Dette medfører at Copenhagen Atomics MSR som en konseptreaktor i oppgavens kontekst må påberegnes enda kraftigere strålingsvern for en maritim konfigurering.

4.3 Dimensjonering

Dette delkapittelet om dimensjonering tar for seg tekniske spesifikasjoner og data for maskineriet på en Nansen-tilsvarende fregatt, og en MSR med tilhørende turbinarrangement. Det er valgt å presentere et fremdriftssystem som er mest mulig likt det på Nansenklassen. Gassturbinen er lik og er av typen GE LM2500, Bazan Bravo-motorene er erstattet med MTU 12V 1163 TB93. Disse er omtrent like og er gjort for å holde oppgaven ugradert. Dieselgeneratorene er MTU 12V 396 TE54 og er lik de Nansen-klassen er ut-

rustet med. I sammenheng med reaktoren vil det fremlegges et passende turbinarrangement, med kondensator og reduksjonsgir. Plassbehov for bunkers vil bli beregnet for videre bruk i punkt 4.4 *Sammenligning med konvensjonell fremdrift*.

4.3.1 Tekniske spesifikasjoner

Til bruk i videre sammenligning er det sammenfattet to tabeller, tabell 3 og 4. Tabell 3 tar for de tekniske spesifikasjonene til GE LM2500 (General Electric, 2018, s. 9; General Electric, 2022, s. 3). I tillegg til spesifikasjoner for dieselmotorene til fremdrift og generatordrift (Redbook, 2016; Rolls Royce, 2019, s.27). Tabell 4 fremstiller spesifikasjoner til Copenhagen Atomics MSR (IAEA, 2022, s. 269). SFC (specific fuel consumption) er oppgitt for 100% MCR (maximum continuous rating).

	GE LM2500	MTU 12V 1163 TB93	MTU 12V 396 TE54
P_e [kW]	21500*	4440	1200
SFC [g/kWh]	240	211	215
n [o/min]	3600	1300	1800
Lengde [m]	8	3,77	2,54**
Bredde [m]	2,6	1,66	1,53**
Høyde [m]	2,4	2,99	1,7**
Tørrvekt [tonn]	22,0	15,9	4,9**

Tabell 3: Spesifikasjoner for fremdriftsmaskineri tilsvarende Nansen-klassen.

* Effekt er hentet fra Forsvarets fartøysdatabase, $28830 \text{ hk} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hk}} \approx 21500 \text{ kW}$

** Dimensjoner og vekt er gitt motor uten deksel og GENSET konfigurasjon.

	Copenhagen Atomics MSR
Reaktortype	Saltsmeltereaktor
Brenseltype	7LiF-ThF4-(TRU)F3
Kjøling / moderator	Saltbrensel / tungtvann
Reaktivitet kontroll	Nivåregulering av tungtvann
Termisk / elektrisk effekt [MWt / MWe]	100 / 40
NSSS trykk primær- / sekundærkrets [MPa]	0,05 – 0,25 / 0,1 – 0,25
Innløp / utløp kjølemediumtemperatur [°C]	600 / 650 - 700
Lengde [m]	12,2
Bredde [m]	2,4
Høyde [m]	2,6
Vekt [tonn]	40
Reactor pressure vessel (RPV) levetid [år]	5*
Design status	Første MSR demonstrasjon forventes gjennomført i 2025, kommersiell drift i løpet av 2028

Tabell 4: Spesifikasjoner Copenhagen Atomics MSR.

* RPV levetid er basert på estimat Copenhagen Atomics selv har kommet frem til. Under intervjuet ble det stilt spørsmål til dette, svaret var at levetiden er satt for å gi tilstrekkelige marginer når reaktorene enda er nye.

4.3.2 Plassbehov

Det er ofte begrenset med plass om bord et kampfartøy, og det er derfor fordelaktig med et fremdriftssystem som tar minst mulig plass uten at det går på bekostning av ytelse. Tabell 5 fremstiller volumet til de ulike enhetene basert på dimensjoner oppgitt i tabell 3 og 4. Det tiltenkes at både diesel- og atomfremdriftssystemene er utrustet med fire diesलगeneratorer. For å finne volumbehovet for MGO-tanker (marin gassolje) er det antatt at omtrent 10% av deplasementet brukes til bunkers. Dette er en konservativ tilnærming til generelle tall for vektfordelingen på et fregattskrog (Rawson & Tupper, 2001, s. 647).

MGO har en tetthet (ρ) på 860 kg/m^3 ved 15°C (NCE Maritime CleanTech, 2016, s. 11). Deplasementet (Δ) til fregattskroget er satt til 5200 tonn fullastet. Plassbehov for damp- turbin, kondensator og reduksjonsgir er basert på fartøystegninger av Fletcher-klassen (The Model Shipwright, 2014). To av disse dampturbinene produserte 45 MW ut på propellakslingene og dermed være av omtrent riktig størrelsesorden. Et punkt som ikke er tatt høyde for her er startlufttankene til gassturbin og dieselmotorene, samt fødevannstankene til reaktoren, disse vil bidra til et økt volum.

Utrekning av bunkersvolum:

$$m_{\text{Bunkers}} = \Delta \times 10\% = 5200 \text{ tonn} \cdot 0,10 = 520 \text{ tonn} \quad (1)$$

$$V_{\text{Bunkers}} = \frac{m_{\text{Bunkers}}}{\rho_{\text{MGO}}} = \frac{520 \text{ tonn}}{0,86 \text{ tonn/m}^3} = 604,65 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Komponent	Volum [m^3]
MGO bunkers	604,7
GE LM250	49,9
MTU 12V 1163 TB93	18,7
MTU 12V 396 TE54	6,6
Copenhagen Atomics MSR	76,1
Dampturbin, red. gir og kondensator	136,4

Tabell 5: Volum for bunkers, gassturbin, dieselmotor og MSR med turbinarrangement.

4.4 Sammenligning med konvensjonell fremdrift

Diagram 1 er et forsøk på å sammenligne ytelse og vekt til begge fremdriftssystemene. Det tiltenkes at vekten for konvensjonelle fremdriftssystemet består av to MTU 12V 1163 TB93, en GE LM2500 og tilhørende bunkers. For det atomdrevne fremdriftssystemet er vekten sammensatt av reaktorkonteineren og to dampturbiner med tilhørende kondensator og reduksjonsgir. For å finne vekten til dampturbinen, kondensator og reduksjonsgir har det blitt tatt utgangspunkt i De Laval PN 20 turbinarrangementet fra Oslo-klassen (Stal-Laval Turbin AB, u.å., s. 1). Denne er skalert lineært ned med en faktor på 0,78 for å

tilsvare en dampturbin på 20 MW. Komponenter som ikke er tatt høyde for er girsystemet til CODAG, startluft-tanker, dampgenerator og fødevannstankene til reaktoren samt rørsystem. Disse vil i realiteten påvirke totalvekten for begge systemene, men er vanskelig å beregne og finne tall på. Dermed er disse ikke inkludert. Felles for begge systemene er fire dieselgeneratorer og lik vekt for propell og propellaksling, dette vil ikke gi noe utslag i sammenligningen og av den grunn heller ikke inkludert. Således er diagrammet bare delvis representativt for de fullstendige systemene, men det gir et innblikk i hvordan ytelsen er i forhold til vekten.

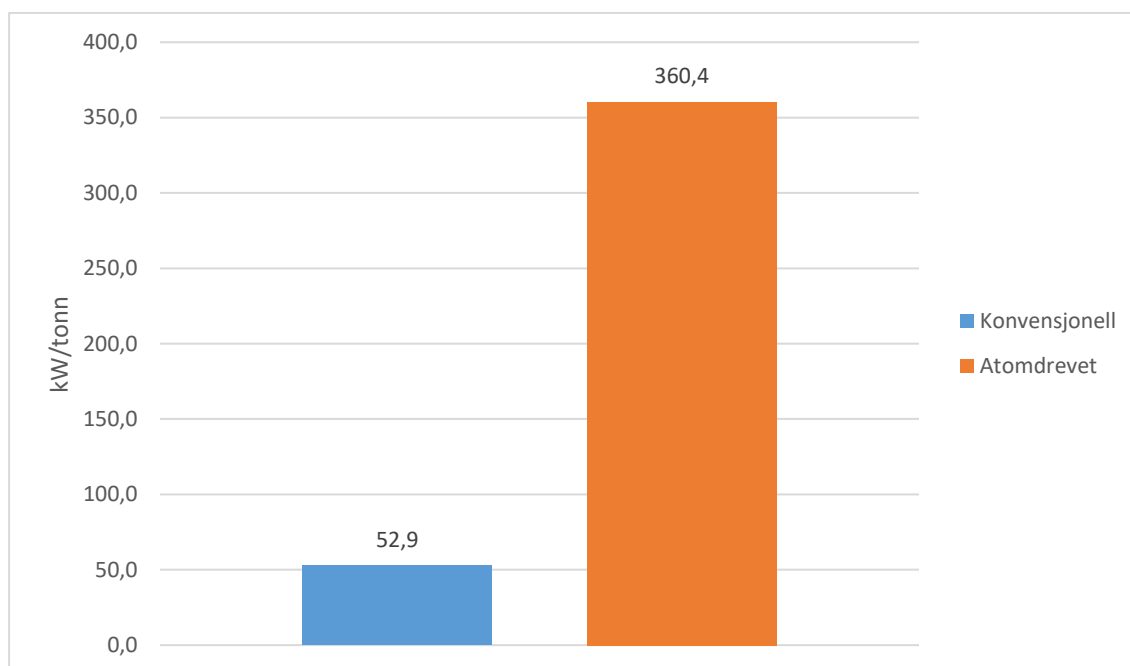


Diagram 1: Spesifikk effekt for konvensjonell og atomdrift oppgitt i kW/tonn.

Videre sammenlignes effekt per volumenhet for å gi forholdstall på effekttetthet i diagram 2. Denne er etterfulgt av diagram 3 som sammenligner plassbehovet for begge fremdriftssystemene. Disse bruker volumet til de ulike komponentene oppgitt i tabell 5. Det benyttes samme fordeling av komponenter som i diagram 1, i tillegg til fire dieselgeneratorer for begge konfigurasjonene i diagram 3 for å fremstille det totale volumet.

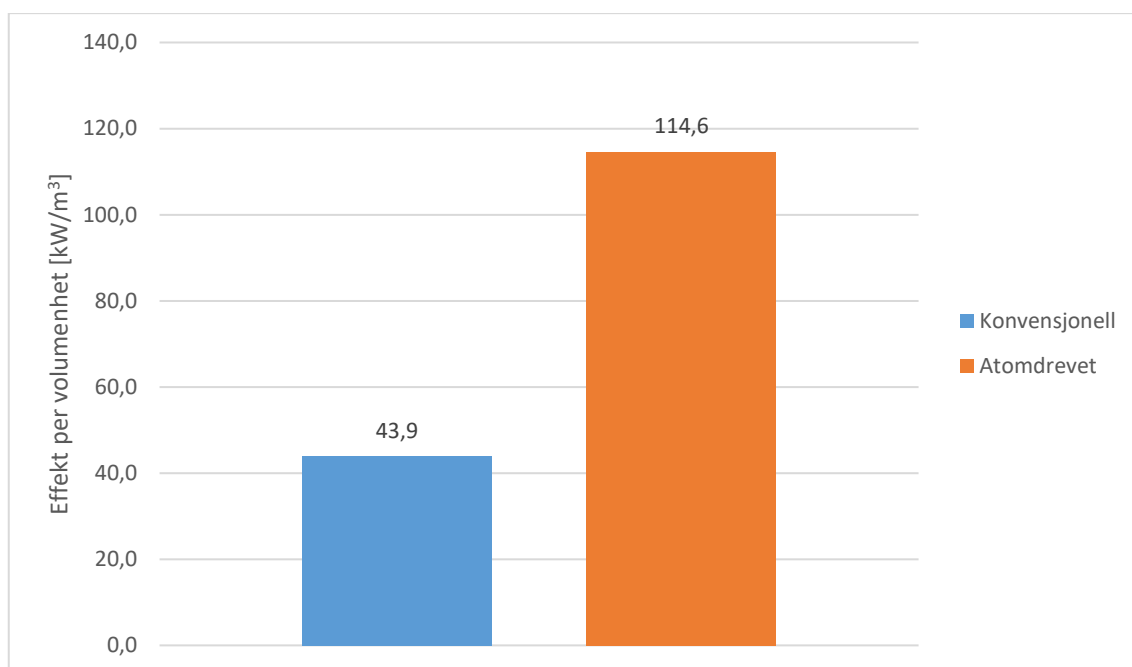


Diagram 2: Effekt per volumenhet for begge fremdriftssystemene.

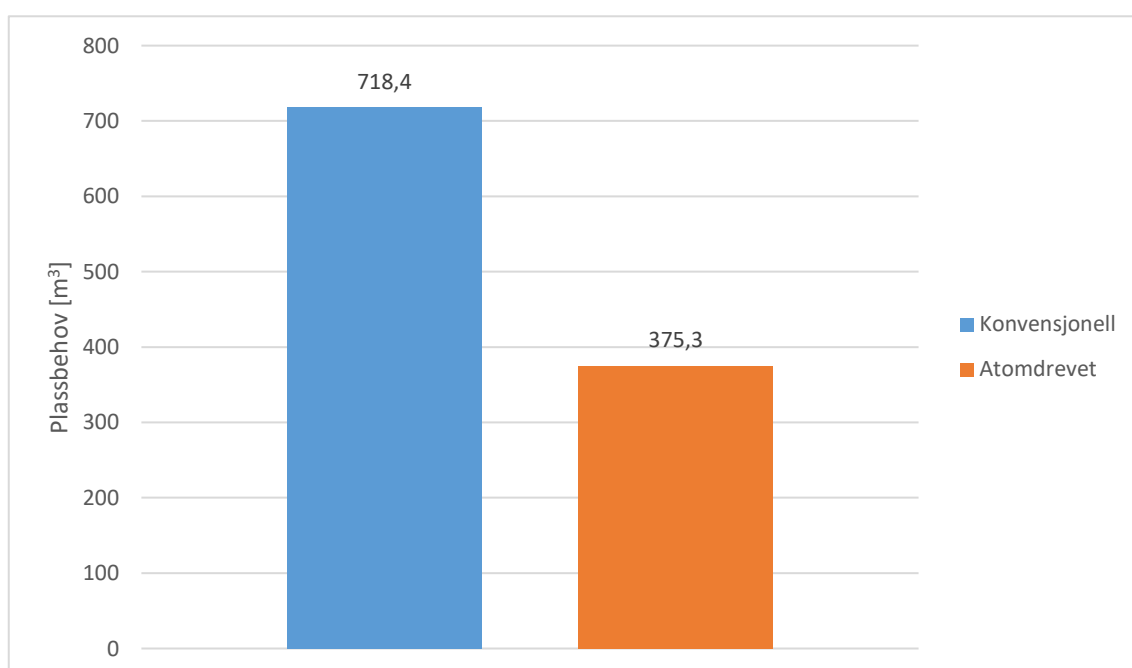


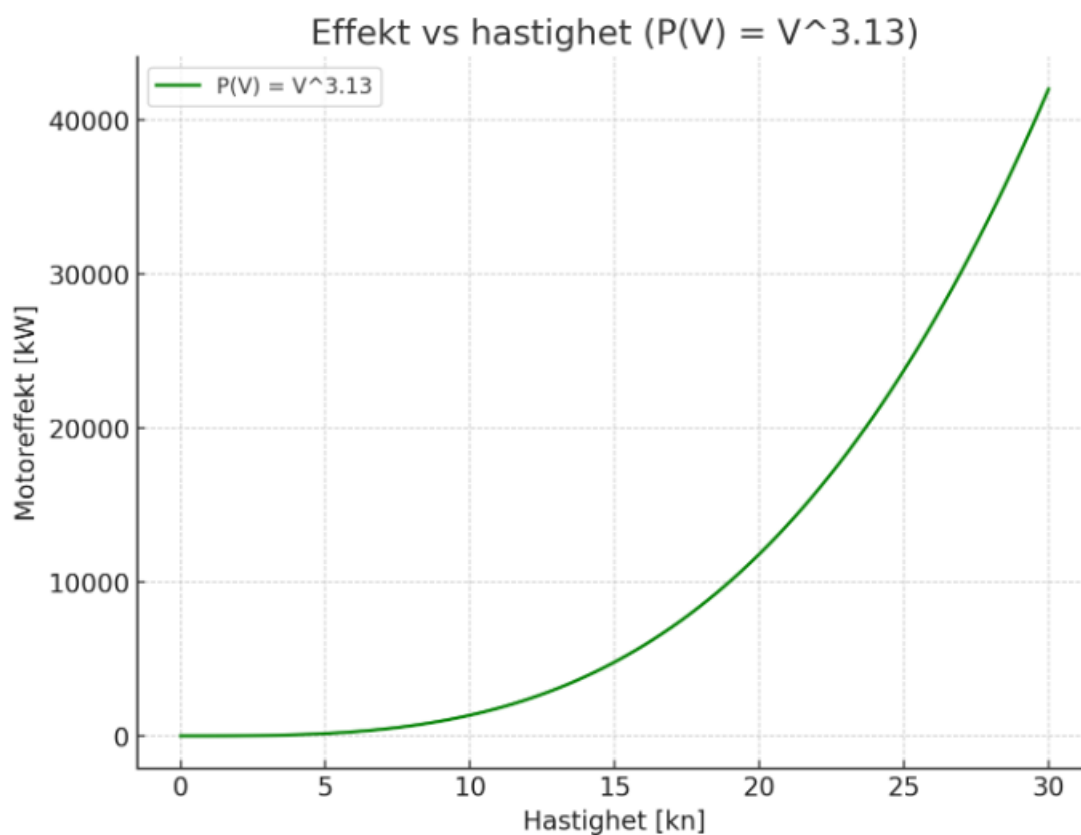
Diagram 3: Plassbehov for begge fremdriftssystemene.

4.4.1 Forbruk og driftskostnader

Dette punktet tar for seg MGO forbruk, utholdenhet og driftskostnadene ved drift av en fregatt tilsvarende Nansen-klassen. For å regne ut MGO forbruket til en fregatt er det utarbeidet en graf som viser motoreffekt og hastighet gjennom vannet, graf 1. Kurven er

basert på en tilnærming som sier at motoreffekten er en eksponentiell funksjon av hastigheten, $P(V) = V^x$ hvor x er større eller lik tre (Lagouvardou & Psaraftis, 2023, s. 2; Berthelsen & Nielsen, 2021, s. 3). I dette tilfellet er x satt til 3,13 og er en iterativ tilnærming for å få en hastighetskurve som var fornuftig for dette fartøyet.

Denne kurven blir brukt sammen med operasjonsprofilen til en Arleigh Bruke-klasse destroyer, for å kunne si noe om antall timer brukt i de ulike hastighetsområdene. Antall seilingsdøgn er satt til 140 døgn i året er basert på tall fra engelske fregatter (Allison, 2023). SFC for gassturbinen og dieselmotoren er hentet for ulike effektområder og MCR pådrag (Bonet & Pilidis, 2013, s. 78; Fenske, 2012). Operasjonsprofilen, SFC-kurven til GE LM2500 og tabellen med SFC til MTU 12V 1163 er vedlagt som vedlegg 3, 4 og 5. Alle disse verdiene er sammenstilt i tabell 6 og viser MGO forbruket som går til fremdrift i forhold til timer brukt i de ulike hastighetsområdene. Tabellen tar høyde for varierende SFC ved ulikt effektbehov, men dette er verdier oppgitt av fabrikantene og vil som regel være lavere enn i virkeligheten. Utrekningene gjort i tabellen er vedlagt som vedlegg 2.



Graf 1: Hastighet og ytelseskurve.

V_s [kn]	Tid [%]	Tid [timer]	P_e [kW]	SFC [kg/kWh]		Forbruk [tonn]
0	0,2	7,7	> 0	0,207		0,03*
2	1	38,4	9	0,207		0,1
4	2,3	88,3	77	0,207		1,2
6	3	115,2	273	0,207		5,7
8	4	153,6	671	0,207		18,7
10	6	230,4	1 349	0,207		56,3
12	6,5	249,6	2 387	0,204		106,3
14	9,5	364,8	3 867	0,207		255,5
16	12,5	480,0	5 873	0,204		503,2
18	14	537,6	8 492	0,211		842,9
20	15	576,0	11 809	0,270		1 607,0
22	12,5	480,0	15 914	0,250		1 671,0
24	7,5	288,0	20 896	0,240		1 263,8
26	4,5	172,8	26 845	0,205	0,240	945,9**
28+	1,5	57,6	33 854	0,211	0,240	396,5***
Årlig MGO forbruk (+1%)						7 750,8

Tabell 6: Årlig MGO forbruk for en fregatt med 140 seilingsdøgn. Fargene tilsvare ulike driftsmoduser hvor blå er en dieselmotor, oransje er 2 dieselmotorer, gul er gassturbin og grønn er CODAG. Denne oppdelingen er gjort for å ikke overbelaste motorene i tillegg til å minimere forbruket mest mulig. Det totale forbruket er tillagt en økning på en prosent for å ta høyde for optimistiske SFC tall fra fabrikantene.

* Når skipet er stillestående i vannet, tiltenkes det at en av dieselmotoren går på tomgang. Dette medfører et forbruk som er satt til 0,03 tonn årlig.

** Forbruk tar høyde for ulik SFC, gassturbin 100% MCR og dieselmotorene tar den resterende lasten.

*** Forbruk tar høyde for ulik SFC, dieselmotorene 100% MCR og gassturbinen tar den resterende lasten. For denne lasten vil det føre til at gassturbinen overstiger 100% MCR.

Det årlige forbruket av MGO utregnet i tabell 6 tar ikke høyde for generatordrift, og er dermed ikke en representativt for forbruket til en fregatt. Når en fregatt ikke ligger på landstrøm, må det påregnes et økt forbruk fra dieselgeneratorene. Disse er nødvendige for å produsere strøm til alle forbrukerne om bord. For enkelthetens skyld tiltenkes det generatoren bare driftes når fregatten seiler. Av de fire MTU 12V 396 TE54 med GEN-SET, tas det utgangspunkt i at to driftes på 75% MCR ved seiling. Dette leverer omtrent 1800 kW ut på skipsnettet og er i drift konstant for de 140 seilingsdøgnene. Videre er det gjort en utregning for å anslå rekkevidden til fregatten dersom den holder konstant 16 kn med to dieselmotorer og fulle har MGO-tanker.

$$\begin{aligned} \text{Forbruk}_{\text{generator}} &= 0,216 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \times 1800 \text{ kW} \times 3360 \text{ timer} \\ &= 1\,306,4 \text{ tonn MGO} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Forbruk}_{\text{total}} &= 7750,8 \text{ tonn MGO} + 1306,4 \text{ tonn MGO} \\ &= 9057,2 \text{ tonn MGO} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Rekkevidde} &= \left(\frac{520\,000 \text{ kg MGO}}{\left(0,204 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \times 5873 \text{ kW} + 0,216 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \times 1800 \text{ kW} \right)} \right) \\ &\times 16 \text{ kn} \cong 5\,243 \text{ nm} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Rekkevidde}_{\text{MSR}} &= (24 \text{ timer} \times 365 \text{ dager} \times 5 \text{ år}) \times 29,53 \text{ kn} \\ &= 1\,293\,543 \text{ nm} \end{aligned} \quad (6)$$

Kostnader ved innkjøp og drift av kjernekraft har vist seg problematisk å oppspore, spesielt for reaktorer som fortsatt er under utvikling. Av den grunn vil 10 års driftskostnader for til Nansen-klassen beregnes for å anslå hva reaktoren bør koste. Denne inkluderer kostnadene ved innkjøp av fremdriftsmaskineriet samt forbruket av MGO i den gitte perioden. For å estimere innkjøpskostnadene for en GE LM2500 og to MTU 12V 1163

TB93 brukes forholdstallene: \$500/kW og \$250/kW. Disse forholdstallene er oppgitt av emneansvarlig for Marine Turbomaskiner. Til utregning av driftskostnader for forbruket av MGO brukes en literpris på 8,9236 kr/l (Enova, 2023). Dette gir en årlig kostnad på nesten 94 millioner, og dekker bare drivstoffkostnadene for en fregatt.

$$\text{Pris}_{\text{MGO}} = \frac{9057,2 \text{ tonn}}{0,86 \text{ tonn/m}^3} \times 8,9236 \frac{\text{kr}}{\text{liter}} = 93\,980\,035 \text{ NOK} \quad (7)$$

Pris for konvensjonelt fremdriftssystem dersom kun innkjøpspris og drivstoffkostnader inkluderes i et tiårs perspektiv følger under. Konverteringen fra USD til NOK er gjort med kursen gjeldene for 30/11/2023.

GE LM2500:

$$\frac{\$500}{\text{kw}} \times 21\,500 \text{ kw} = \$10\,750\,000 = 115\,259\,350 \text{ NOK} \quad (8)$$

MTU 12V 1136 TB93:

$$\frac{\$250}{\text{kw}} \times 4\,500 \text{ kw} = \$1\,125\,000 = 12\,062\,025 \text{ NOK} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Driftskostnader}_{10 \text{ år}} &= 115\,259\,350 \text{ NOK} + 12\,062\,025 \text{ NOK} \\ &+ 93\,980\,035 \text{ NOK} \times 10 \text{ år} = 1\,067\,121\,725 \text{ NOK} \end{aligned} \quad (10)$$

4.4.2 CO₂-utslipp

I jakten på et bærekraftig fremdriftssystem, er utslipp av klimagasser høyt prioritert. Kjernekraft produserer ingen CO₂ under drift av anlegget. Dermed er det interessant å se hvor store utslippsreduksjonen vil være med overgang til kjernekraft. En *Nansen*-tilsvarende fregatt vi ha et utslipp på over 24 500 tonn CO₂ per år. Dette baseres på et utslipp av 3,17 kg CO₂ per kg forbrent MGO (Miljødirektoratet, 2020). Diagram 3 henter forbruksdata fra tabell 6 og viser CO₂-utslippet basert på de ulike hastighetsområdene.

CO₂-utslipp per år:

$$9057,2 \text{ tonn MGO} \times \frac{3,17 \text{ kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_{\text{MGO}}} = 28\,711 \text{ tonn CO}_2 \quad (11)$$

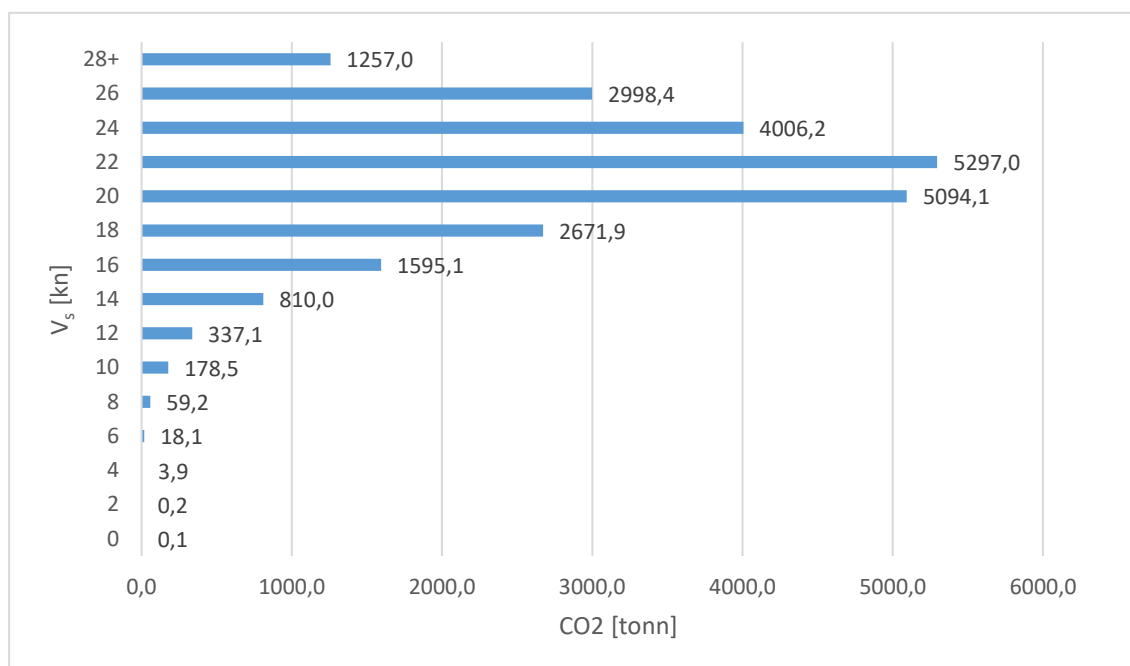
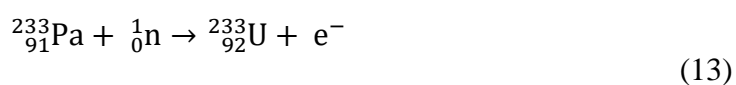
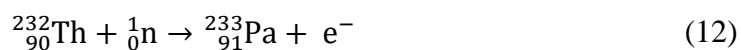


Diagram 4: CO₂-utslipp angitt i tonn for hvert hastighetsområde for en fregatt.

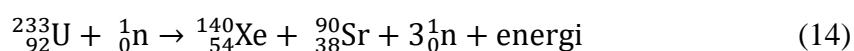
4.4.3 Energitetthet

For enkelthetens skyld vil beregningen for tetthet av kjernebrensel ta utgangspunkt i thorium, og at alt thoriumet omdannes til uran-233 og fisjoneres. Dette vil ikke være tilfelle i den virkelige verden, men er en ideell beregning som en saltsmeltereaktor vil være nærmest å oppnå. En PWR som bruker anriket uran har veldig mange faktorer som spiller inn i beregning av energitetthet, som for eksempel at det meste av brenselet ikke blir brent opp. Mengden av U-238 som transmutterer vil variere, hvor mye vektprosent U-235 som er i brenselet, type reaktor da det finnes flere PWR-design og så videre. Dermed er det veldig vanskelig å gi en energitetthet for brenselet i en slik reaktor, da kun 5-7 % av brenselets energi faktisk utnyttes (Touran, 2020). Beregningen under er tilnærmet en formeringsreaktor som bruker alt brensel slik en saltsmeltereaktor vil nærme seg.



e^- er et elektron som blir sendt ut under beta-henfall, det er en type radioaktiv stråling som heter beta-stråling. Betastråling er vanligvis ikke farlig for mennesker da den ikke klarer å penetrere et vanlig ark. Det er dermed lett å skjerme personell fra denne typen stråling. Betastråling er hovedsakelig farlig dersom en person får i seg et stoff som sender ut betastråling inn i kroppen.

Videre fra uran-233 er det flere mulige fisjonsreaksjoner som kan inntreffe, da ikke alle fisjonsreaksjoner er like. Fisjonsproduktene, antall nøytroner frigitt og energi frigitt vil også variere i de ulike fisjonsreaksjoner. I tilfellet for thorium-syklusen, kan et eksempel på en fisjonsreaksjon kan være:



En fisjonsreaksjon av uran-233 omdanner gjennomsnittlig 0,213 u masse om til energi som tilsvarer omtrent $3,56 \times 10^{-28}$ kg per fisjonsreaksjon. Energien per kilo blir dermed:

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= 3,56 \times 10^{-28} \text{kg} \times \left(299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \\ &= 3,204 \times 10^{-11} \frac{\text{J}}{\text{fisjon}} \end{aligned} \quad (15)$$

Antall mol per kg thorium-232 er:

$$\frac{1000 \text{ g}}{232 \text{ g/mol}} = 4,31 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \quad (16)$$

Dermed er antall atomer i 1 kg thorium bestemt av Avogadros konstant:

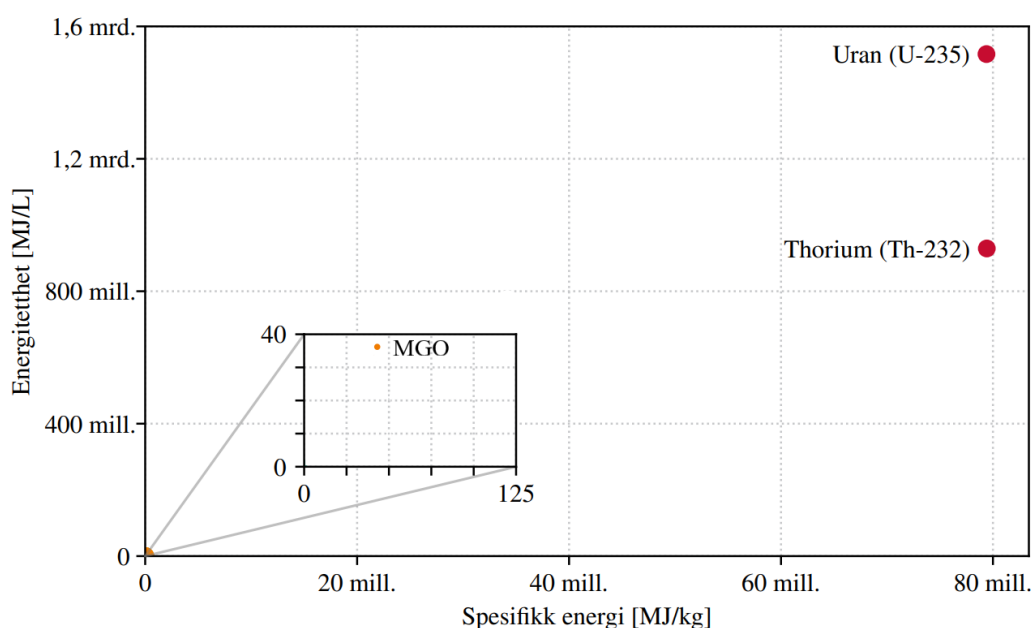
$$4,31 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \times 6,022 \times 10^{23} \frac{\text{atomer}}{\text{mol}} = 2,595 \times 10^{24} \frac{\text{atomer}}{\text{kg}} \quad (17)$$

Multipliserer dette med energien per fisjon for å få energitettheten:

$$2,595 \times 10^{24} \frac{\text{atomer}}{\text{kg}} \times 3,204 \times 10^{-11} \frac{\text{J}}{\text{fisjon}} = 8,31 \times 10^{13} \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (18)$$

For sammenlikning er energitettheten til MGO rundt $43,2 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Den termiske virkningsgraden til en dieselmotor er vanligvis større enn for en kjernereaktor, selv om en MSR har betydelig forbedret virkningsgrad i forhold til tidligere reaktorer. Copenhagen Atomics viser til energi i kWh per kg med forskjellige drivstoff. I denne sammenlikningen vil en dieselmotor produsere om lag 13 kWh/kg og deres MSR vil produsere 23 000 000 kWh/kg som er over 1,7 millioner ganger mer. Selv om thorium er løst opp i et salt kommer mesteparten av vekten fra thorium da de andre komponentene i saltet er lette atomer som for eksempel litium og fluor. For å illustrere de store forskjellene i energitetthet, er det hentet en grafisk sammenligning av den spesifikke energien til thorium, uran og MGO i figur 3. Denne er redigert for å vise MGO istedenfor diesel, samt fjernet andre brensler. Diesel og MGO har lik spesifikk energi 43,2 MJ/kg, $1 \text{ kWh/kg} \times 3,6 = 1 \text{ MJ/kg}$ (Miljødirektoratet, 2020). Den spesifikke energien til thorium og uran ligger henholdsvis på 79 420 000 og 79 390 000 MJ/kg (Touran, 2020). Dette innenfor en 5% margin av det vi regnet oss frem til, og dette kan attribueres til forskjell i fisjonsreaksjonene. Grafen oppgir spesifikk energi er oppgitt i millioner MJ/kg.

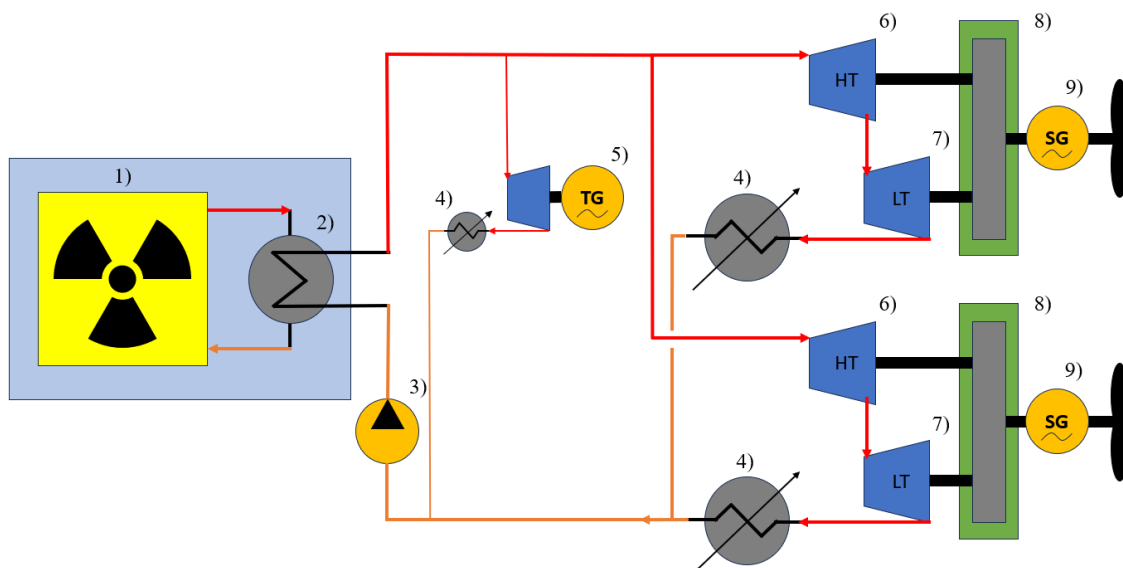


Figur 3: Sammenligning av spesifikk energi for thorium, uran og MGO (FFI, 2023, s. 39).

4.5 Konsept for fremdriftssystem

Figur 4 er en egenlaget skjematisk fremstilling av et atomfremdriftssystem, inspirert av NS Savannah sin reaktorkrets (Harrington, 1992, 296). Under figur 4 følger det en for-

klaring av de ulike komponentene. Sekundærkretsen er konfigurert slik at dampen produsert av MSR er fordelt på de to turbinene og turbogeneratoren. Dette gjør at den termiske effekten omgjøres til både mekanisk effekt til fremdrift og elektrisk effekt til skipsnettet. Reaktoren vil da aleine stå for all kraftproduksjon til alle fartøyets forbrukere. Ikke inkludert i det skjematisk diagrammet er fire dieselgeneratorene, disse er indirekte en del av fremdriftssystemet og står for redundans. Disse er av typen MTU 12V 396 TE54. Fremdriftssystemet tar høyde for havari/skader på reaktor, turbiner og gir. Ved reaktorfeil vil dieselgeneratorene kunne produsere strøm til det skipselektriske anlegget. Samtidig kan de drifte akselgeneratorene som elmotorer, dermed opprettholdes fremdrift og manøvreringsevne. I et tilfelle hvor det er feil på en av turbinene eller reduksjonsgiret, kan fartøyet driftes med en kun propellaksling. For å redusere mekaniske belastninger vil fartøyet være utrustet med vribare propellere (CPP).

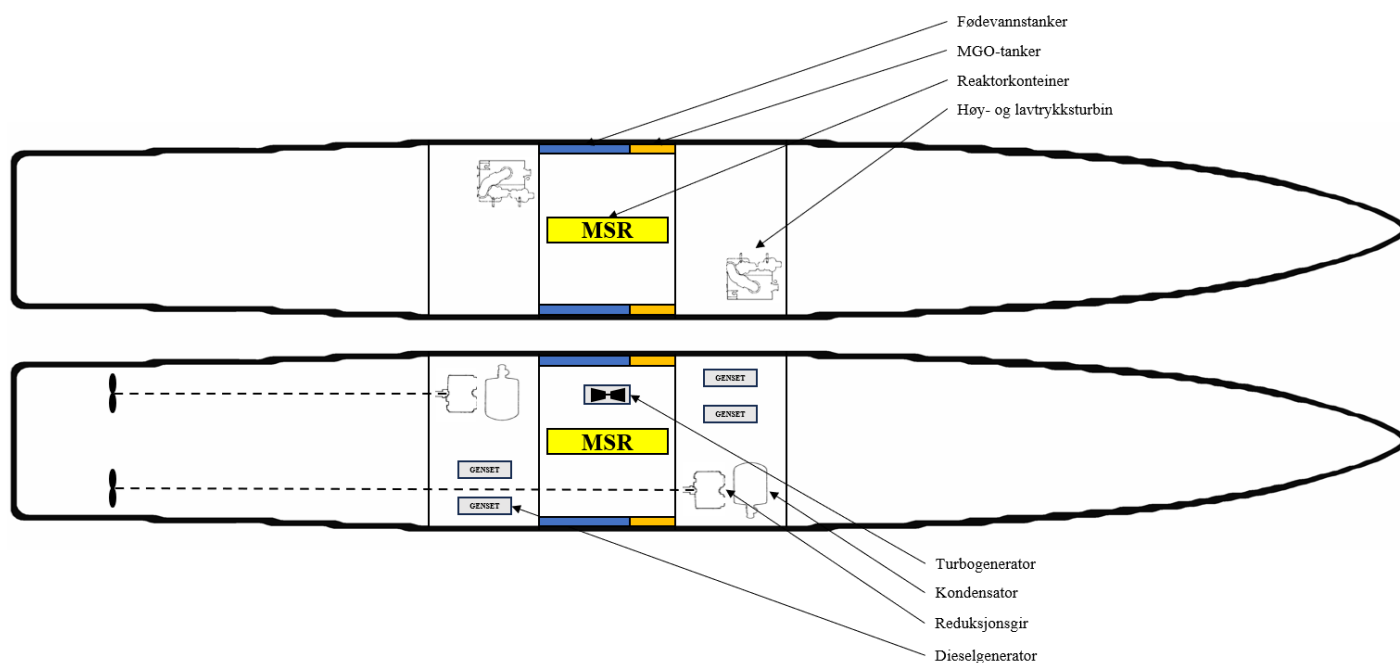


Figur 4: Sjematisk diagram av MSR fremdriftssystem for en fregatt.

- 1) Saltmelteaktor
- 2) Dampgenerator
- 3) Fødepumpe
- 4) Kondensator
- 5) Turbogenerator
- 6) Høytrykksturbin
- 7) Lavtrykksturbin
- 8) Reduksjonsgir
- 9) Akselgenerator

Den skjematiske illustrasjonen i figur 4 gir en grei forståelse av hvordan reaktorkretsen fungerer, men forteller lite om hvordan dette i praksis vil se ut på et fartøy. For å videreutvikle konseptet for atomfremdrift har det blitt utarbeidet en illustrasjon som viser plasseringen av de ulike komponentene. Figur 5 viser to dekkprofilen, med plassering av komponentene oppgitt i figur 4. I tillegg er det tegnet inn fire dieselgeneratorene som er en del av redundansen for fremdriftssystemet. Alle komponentene er skalert slik at størrelsen samsvarer med sånn det hadde sett ut dersom de hadde blitt plassert i en Nansen-klasse fregatt. Maskinrommene er delt i tre, adskilt med vanntetteskott: aktre turbinrom, reaktorrorom og forre turbinrom. Denne løsningen ved å adskille de to turbinene og er gjort for å øke overlevelsen evnen til fartøy dersom den skulle ta inn vann. I tillegg fordeler lasten langskips for å unngå høye spenningskonsentrasjoner på en plass. Av samme årsak er også de fire dieselgeneratorene fordelt på de to turbinrommene.

For å øke den termiske virkningsgraden til dampsyklusen bør dampgeneratoren utrustes med en overheter. Dette gjøres for å løfte temperaturen T_3 (damptemperaturen inn på turbinen), $\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$. Ved å øke damptemperaturen T_3 opp til overhettet damp for det gitte trykket oppnår man et høyere entalpifall over turbinen. Dette vil gi en økt termisk virkningsgrad (η_t) for fremdriftssystemet sammenlignet med å bruke mettet damp.



Figur 5: Dekkprofil for MSR fremdriftssystem. Komponentene er skalert slik at de illustrerer plassering og plassbehov i et skrog som tilsvarende Nansen-klasse. Den øverste profilen er ett dekk over den under, dekkoppdelingen er gjort for å vise komponenter som er plassert over hverandre.

5 Drøfting

Etter å ha beskrevet teorien bak kjernekraftverk, samt analysert og beregnet ytelsen til en reaktor, vil oppgaven drøfte om bruk av kjernekraft på en fregatt er hensiktsmessig. Vil fordelene være større enn ulempene med hensyn til Forsvarets prioriteringer? Mange faktorer påvirker en eventuell anbefaling, og dette skal drøftes.

5.1 Diskusjon av resultater og beregninger

Copenhagen Atomics sine reaktorer vil kun operere i fem år før reaktoren må byttes ut. Grunnen til dette er at materialet blir sprøtt som et resultat av nøytron-fluksen i anlegget. Fem år er den angitt levetiden på de første reaktorene som skal sikre at det ikke vil skje noen ulykker knyttet til materialer. Copenhagen Atomics vil monitorere materialene i reaktorene for å se om de tåler en lengre levetid, eventuelt finne materialer som egner seg bedre til å bli brukt i en slik reaktor. Dette er imidlertid ikke en kvalifisert teknologi når denne oppgaven skrives, og det kan dermed være nødvendig å bytte reaktoren ved visse tidsintervall, noe som kan føre til økte utgifter. Ifølge Copenhagen Atomics er salt og tungtvann de dyreste komponentene i reaktoren, men disse vil kunne gjenbrukes og levetiden forventes utvidet opp mot 10 år etter hvert som man opparbeider seg kunnskap om hvordan stråling fra brenselet påvirker materialene til reaktoren. Det er imidlertid slik at selv en levetid på 10 år er kort sammenlignet med tradisjonelle PWR og konvensjonelt fremdriftssystem. teknologien fortsatt er ny og under utvikling kan nye og uforutsette problemer oppstå under drift av reaktorene. , Det å ta i bruk en helt ny teknologi innebærer risiko og man bør avveie fordelene det gir mot risiko man tar.

Saltsmeltereaktor er en ny teknologi som bruker smeltet salt som kjølemedium i stedet for vann. Saltet er et fast stoff ved vanlig temperatur og må over 100 °C for å være flytende, avhengig av hvilket salt som benyttes. Derfor er det viktig å ha kontinuerlig drift av reaktoren for å unngå at saltet stivner ettersom dette kan ødelegge hele reaktoren. En viktig faktor som må tas med betraktning når man velger fremdriftssystem er at reaktoren ikke kan skrus helt av under vedlikehold av fartøyet, eller ved kailigge. Dette kan anses som en ulempe for MSR sammenlignet med en PWR som kan kjøres helt ned. Denne problematikken kan unngås ved å bruke reaktoren til egen strømproduksjon ved kailigge, da det alltid vil være et behov for levere strøm på skipsnettet. Fartøyet har ikke behov for land-strøm, men kan levere strøm dersom en havn eller operasjonsbase behøver dette.

I sammenligningen mellom konvensjonell og atomfremdrift i delkapittel 4.4 viser Diagram 1 at atomfremdrift er langt mer effektivt når det gjelder vekt og volum. Spesifikk effekt er på 360,4 kW/tonn sammenlignet med 52,9 kW/tonn for konvensjonell fremdrift. Dette betyr at atomfremdrift gir mer energi for mindre vekt, noe som er avgjørende i situasjoner der vekt er en begrensende faktor. Videre viser Diagram 2 at atomfremdrift også er mer effektiv per volumenhet (114,6 kW/m³ mot 43,9 kW/m³ for konvensjonell fremdrift). Denne effektiviteten i både vekt og volum er spesielt verdifull for den operative evnen til fartøyene. Diagram 3 sammenligner fremdriftssystemene, og plassbesparelsen med saltsmeltoreaktorsystemet er på 343,1 m³. Plassbesparelsen i form av redusert drivstoff bunkers kan brukes til å oppbevare mer våpen eller mat for å øke den operative evnen til fartøyet. Bruken av kjernebrensel fremfor MGO reduserer det logistiske behovet for å frakte drivstoff til disse fartøyene under operasjon.

Fra et operasjonelt ståsted vil kjernekraft by på noen fordeler. En fregatt tilsvarende Nansen-klassen vil ha en rekkevidde på 5 243 nautiske mil (5), ved konstant hastighet på 16 knop. Gitt en ytelse på 40 MW ut på propellakslingene for et MSR fremdriftssystem, vil fartøyet i teorien kunne holde en konstant fart på rett over 29 knop i fem år uten stans. Dette utgjør en distanse på 1 293 543 nautiske mil (6), eller 59,9 ganger rundt ekvator. Denne «uendelige» rekkevidden vil kunne øke den operative kapasiteten til fartøyene betydelig. Et annet element er at den lave prisen på atombrensel medfører at fartøyene kan operere ved høyere hastigheter oftere, over lengre tid og hurtigere kan transittere til operasjonsområder.

Saltsmeltoreaktoren er også veldig stillegående sammenlignet med fossil fremdrift, da en slik reaktor kun transporterer varme. Fartøyet vil fremdeles lage lyd, men uten eksplosjonene i en dieselmotor vil akslingene og propellene være det som produserer mest støy i anlegget, ifølge Copenhagen Atomics. Dette vil minske den akustiske signaturen til fartøyet vesentlig, noe som gir en operativ fordel samtidig som det har en positiv effekt på arbeidsmiljøet om bord.

Anskaffelse og driftskostnader er viktig å vurdere ved sammenligningen av to fremdriftssystemer. Både det konvensjonelle og atomdrevne fremdriftssystemet vil ha forbruk av brensel ved normal drift. Konvensjonelle fremdriftssystem vil normalt sett ha lavere innkjøpskostnader sammenlignet med driftskostnadene i form av drivstofforbruk. For et kjernefysisk fremdriftssystem vil dette være motsatt med høyere initielle kostnader, men muligheten for besparelser utover levetiden. Fra Copenhagen Atomics fikk vi vite at deres

reaktor forventes å bruke om lag 32 kg thorium ved 100% ytelse i ett år, og dette tilsvarer en kostnad på 19 200 NOK per 2023. Dette er såpass lavt at det kan neglisjeres i forhold til innkjøpskostnadene av en reaktorer.

Kostnader ved anskaffelse av en reaktor er vanskelig anslå, dermed ble forbruket og driftskostnadene ved konvensjonelt fremdriftssystem brukt til å gi et forholdstall på hva reaktoren burde koste. Ved å regne på det årlige forbruket til en fregatt med et fremdriftsmaskineri som er mest mulig likt det på Nansen-klassen, kan man finne et forholdstall for pris per installert kW for en kjernereaktor. Basert på graf 1, Arleigh Burke sin operasjonsprofil og 140 seilingsdøgn var det mulig å regne ut det årlige MGO-forbruket. Det årlige forbruket lå på 9 057,2 tonn MGO da generatordrift ble inkludert. Gitt seilingsmønsteret utregningen er basert på utgjør dette en årlig utgift på 93 980 035 NOK (7) for drivstoffkostnader per fregatt. Ved innkjøp av en gassturbin og to high-speed dieselmotorer, samt drift av fartøyet i 10 år ender kostnadene på 1 067 121 725 NOK. Denne summen gjelder bare for innkjøp av fremdriftsmaskineriet og MGO-forbruket i løpet av 10 år. Forholdstallet ender opp på 26 678 NOK per kW installert og vil være et greit utgangspunkt for å vurdere kostnader ved anskaffelse av kjernekraft.

Dette tallet viser prisen kjernereaktoren burde koste dersom prisen for kjernereaktoren og konvensjonelt fremdriftssystem skal være lik. Fartøyene har en lengre levetid enn 10 år, og kjernedrift byr på en rekke fordeler. Dermed kan prisen per installert kW overskride 26 678 NOK/kW basert på hvilke prioriteringer Sjøforsvaret har.

I punkt 4.4.2 ble det beregnet et utslipp på nærmere 29 000 tonn CO₂ per fartøy, gitt forutsetningene utregningene er basert på. Ved drift av fire atomdrevne fregatter i et år, kontra MGO vil Marinen kunne redusere sitt klimafotavtrykk med rett over 114 800 tonn CO₂. Til sammenligning utgjør dette 3,1 % av det totale CO₂-utslippet for innenriks sjøfart og fiske, som var på 3,7 millioner tonn CO₂ i 2022 (SSB, 2023). Utover CO₂-utslipp vil det også være utslipp av andre klimagasser som NO_x og SO_x, denne andelen er ikke tatt høyde for. Dette er klimagasser som danner sure forbindelser som svovel- og salpetersyre når det reagerer med vann og oksygen i luften. Dermed vil anvendelse av atomdrevne kampfartøy gi et vesentlig bidrag til reduksjon av klimagassutslipp i forsvarssektoren. Dette gir kjernekraft en overlegen fordel når man vurderer miljøavtrykk knyttet til klimagassutslipp.

5.1.1 Feilkilder

Det er gjort omfattende arbeid for å sikre nøyaktighet og færrest mulige feilkilder i denne oppgaven. Beregningene som er utført i 4.3 og 4.4 er mest utsatt for feilkilder spesielt for når verdiene brukes videre til andre utregninger. Her har søkt å oppnå høyst mulig presisjon og derfor valgt å begrense bruk av avrundinger i utregningene, og de fleste tallene er oppgitt med en til to desimaler. I tabell 6 er det benyttet Excel for å kunne sette inn formler og sikre at alle verdier er regnet likt. All utregning har videre blitt dobbeltsjekket for å kunne korrigere feil knyttet til både formler og verdier. Til tross for dette, kan det imidlertid fortsatt ikke utelukkes at det kan være feil i beregningene. Utover dette er det en del momenter som kan være kilder for feil og unøyaktigheter. Årsaken til disse er valget om å holde oppgaven ugradert, dermed har vi utelukket muligheten til å bruke reelle driftstall for Nansen-klassen. Dette har blant annet medført at fremdriftsmotorene ikke er helt like, i tillegg er hastighet og ytelse-kurven en tilnærming og ikke erfaringstall. Operasjonsprofilen til Arleigh Burke vil heller ikke være 100% representativ for hvordan fregattene faktisk opererer i løpet av et år og dette gir utslag på forbruk, driftskostnader og CO₂-utslipp. Disse tallene samsvarer derfor ikke helt med fregattene til marinen, men de relative størrelsene gir et godt sammenligningsgrunnlag. .

Når det kommer til sammenligning av ytelse, vekt og volum, er det noen momenter som ikke er tatt høyde for. Dette gjelder primært CODAG-girsettet, fødevannstankene til reaktoren, men dette avviket er vurdert som neglisjerbart og ikke nok til påvirke det helhetlige bildet. På de relevante punktene poengteres det for eksempel at motor dimensjoner ikke tar høyde for tilkoblet utstyr, som GENSET. Dette gir utslag med hensyn til reell vekt og volum, men vi har gjort et valg om å se bortfra dette. Det gir ikke nevneverdig utslag i sammenligningen ettersom generatorer vil være en del av begge konfigurasjoner. Reelle dimensjoner vil derfor være noe ulikt, men av samme størrelsesorden. Dermed vurderes dimensjoner som tilstrekkelig til bruk i sammenligning.

Imidlertid er det viktig å påpeke at tekniske spesifikasjoner om MSR er hentet fra et spesifikt selskap, Copenhagen Atomics. I tillegg er tekniske spesifikasjoner hentet fra General Electric og MTU. Disse selskapene markedsfører eget produkt og det er da en risiko for at informasjonen kan være skjevt presentert for å vise reaktoren i best mulig lys og spesielt reaktorytelse er vanskelig å verifisere og utsatt for bias. På grunnlag av dette brukes Copenhagen Atomics bare som et utgangspunkt for en tiltenkt marin MSR, og tilnærmingen til oppgitt teknisk data har vært gjort med en kritisk holdning.

5.2 Sikkerhet

Alle kjernereaktorer er bygget slik at ingen stråling skal slippe ut av kjernen og skade personell. Siden MSR ikke opererer med høyt overtrykk (kun 0,25 Mpa), vil trykk eksplosjoner i kjernen ikke være en bekymring. Som tidligere nevnt har saltet som benyttes en negativ reaksjonsgrad ved høyere temperaturer. Effekten av dette er at , fisjonsreaksjoner blir vanskeligere jo høyere temperaturen er og det blir dermed lite sannsynlig at reaksjonen forblir superkritisk og fører til nedsmelting. Dersom reaksjonen i en gitt situasjon skulle bli superkritisk er det mulig å ha dump-tanker hvor utformingen og materialet fanger opp alle nøytroner og kjedereaksjonen stoppes. Copenhagen Atomics har en pumpe som konstant pumper saltet rundt i systemer og dersom kjedereaksjonen blir superkritisk eller reaktoren mister strøm vil saltet dumpes ned i dump-tankene hvor fisjon ikke kan skje. Et annet design kan være propper laget av et metall med smeltepunkt over driftstemperatur som smelter dersom reaksjonen er superkritisk og saltet renner ned i dump-tankene. Fordelen med Copenhagen Atomics sin måte er at dersom man klarer å få strømmen tilbake kan pumpen pumpe ut saltet og reaktoren kan fortsette å operere.

Å kun drifte reaktoren er ansett som trygt, og en ulykke fra drift er ekstremt usannsynlig. Marinefartøy kan derimot bli utsatt for angrep og eksplosiver, noe som kan føre til store skader på reaktoren. Dersom reaktoren lekker brenselssalt vil det størkne til saltkrystaller som kan hjelpe med å inneslutte kjernebrenselet. Reaktoren produserer kontinuerlig fisjonsprodukter som er stoffene laget av fisjonsreaksjonene. Disse stoffene hindrer fisjon og må derfor fjernes kontinuerlig fra reaktoren. Fisjonsproduktene er farlige og må derfor lagres et sted hvor de ikke kan komme i kontakt med personell, selv om fartøyet er under angrep. Stoffene har en kort halveringstid, som betyr at de relativt fort mister radioaktiviteten sin (halveringstid på rundt 30 år, trygge etter 300 år).

5.3 Pålitelighet

Med et fremdriftssystem kun bestående av en MSR som eneste kraftkilde vil fartøyet ha for lav redundans. Selv om en reaktor fra Copenhagen Atomics kan yte rundt 40MW på akslingene, samt produsere strøm, hjelper dette lite dersom reaktoren skulle slutte å virke. I et uforutsett tilfelle der reaktoren slutter å produsere kraft, må fartøyet kunne forsynes

med strøm og fremdrift. Dette er tatt høyde for i delkapittel 4.5 *Konseptet for fremdriftssystem* og viser i figur 5 hvordan fartøyet er utrustet med fire diesel generatorer. Disse er av samme typen som Nansen-klassen bruker og er fordelt på to maskinrom. I seg selv vil ikke disse kunne gjøre noe annet enn å bidra til strømproduksjon, dermed er montert en akselgenerator på begge propellakslingene som vist på figur 4. Ved en «død» reaktor har fartøyet en kapasitet på nesten 4,8 MWe når alle fire generatorene ligger på 100% MCR. Den elektriske effekten som ikke går til navigasjon- og våpensystemer, kan brukes til å drive akselgeneratorene som elmotorer. Dermed opprettholdes også fartøyets evne til fremdrift og til å manøvrere

Redundansen til fartøyet ligger også i løsningen med to uavhengige turbinarrangementer, som er fordelt på to maskinrom. Fartøyet kan få fullstendig havari på den ene turbinen, reduksjonsgiret eller damp-kretsen og likevel opprettholde fremdriftsevnen. For et kampfartøy er redundans helt essensielt og fremdrifts konseptet presentert i oppgaven søker å tilfredsstillere dette. Av redundans-økende tiltak kan følgende oppsummeres: to nærmest uavhengige fremdriftslinjer sett bort ifra samme kraftkilde, fire dieselgeneratorer, akselgeneratorer som kan driftes som elmotorer på propellakslingene og tre maskinrom adskilt av vanntette skott. Dersom det skulle oppstå vanninntrenging i en av maskinrommene vil fortsatt fartøyet kunne opprettholde kraftproduksjon.

5.4 PESTEL-Analyse

PESTEL-analyse (Political Economic Sociocultural Technological Environmental Legal) anvendes i denne oppgaven som et drøftings verktøy for å belyse og diskutere eksterne faktorer. Dermed faller dette punktet under drøfting og ikke analyse. Under informasjonsinnhenting om kjernekraft, SMR og MSR, ble det oppdaget flere faktorer som ikke direkte kunne vinkles for diskusjon.

5.4.1 Politiske faktorer

Aftenposten skrev i april 2023 at «Kjernekraft blir stadig mer populært blant norske politikere» (Aas, 2023). Dagens regjering har per dags dato ikke vist støtte til bruk av kjernekraft. Selv om aksepten og populariteten til kjernekraft øker, vil ikke regjeringen gi åpen støtte til bruk av kjernekraft og fremmer at Norge ikke har nok kompetanse på dette fagfeltet. Frp og Høyre fremmet et forslag om å utrede kjernekraft i Norge, men et flertall

bestående av SV, Sp og Ap sa nei til forslaget. Rødt, Venstre, MDG og KrF var enige med forslaget om å utrede kjernekraft i Norge, for å se hvilke forutsetninger Norge har for å bygge ut kjernekraft og hvilke behov som kan dekkes. . Videre har «Høyre, Frp, KrF og Rødt støttet forslag om at Norge bør ta en aktiv rolle i forskningen om ny kjernekraft-teknologi, for eksempel thorium» (Aas, 2023).

Støtten om forslag om å utrede dette videre viser en økende aksept blant politikere for kjernekraft, noe som er essensielt for å realisere bruken av kjernekraft om bord på militære fartøy. Politikere i små kommuner åpner også for kjernekraft, og NRK skriver at 40 kommuner har vist interesse for utbygging av kjernekraft i Norge. I 2023 signerte kommunene Narvik, Aure, Heim og Vardø en avtale med Norsk Kjernekraft AS, et norsk selskap som vil bygge ut kjernekraft i Norge ledet av Trond Mohn. Denne avtalen ser på mulighetene for å bygge ut kjernekraft i kommunene, men er ikke en avtale om utbygging av kjernekraft. (Skjelvik & Nijjer, 2023).

5.4.2 Økonomiske faktorer

Selv med en forventet prisreduksjon på kjernekraft teknologi - så er de initielle kostnadene svært høye. Når man inkluderer driftskostnader gjennom levetiden, kan imidlertid billig brensel kompensere for dette. Copenhagen Atomics mener det ikke er behov for mye kompetanse rundt kjernereaktoren deres om bord skipet, da den regulerer seg selv, og det eneste mannskapet kan gjøre med reaktoren er å regulere pådraget.

En kompliserende faktor er at innkjøp og drift kan være ulike budsjett med ulike beslutningskriterier. Så selv om et atomdrevet marinefartøy og et konvensjonelt fartøy kan ha samme kostnad når man ser på hele livsløpet så , er det ikke sikkert at innkjøpsbudsjettet tar høyde for reduserte fremtidige driftsutgifter. Et slikt prosjekt krever et langsiktig syn på kostnader som inkluderer både initiell investering og fremtidige kostnader. Copenhagen Atomics mener at deres reaktorer kan konkurrere med, og til og med slå fossile alternativer på pris i et slikt regnestykke. Selskapet ønsker som sagt ikke å oppgi pris på reaktoren deres, men dette utsagnet kan tyde på at kjernekraft på skip på sikt kan være rimeligere enn konvensjonelle løsninger.

5.4.3 Sosiokulturelle faktorer

Kjernekraft har fått et dårlig rykte på grunn av de store konsekvensene en ulykke kan forårsake. I kjølvannet av Tsjernobyl-, Fukushima- og Three-Mile Island ulykkene har det oppstått en sterk skepsis blant verdens befolkning rundt kjernekraft. Ofte forbinder befolkningen kjernekraft med giftig avfall og store tårn som spyr ut røyk. I nyere tid har derimot kjernekraft vært oppe for debatt, og mer informasjon om kjernekraft er tilgjengelig. Undervisningsvideoer på nett, nyhetsartikler og lignende publikasjoner har hjulpet å spre informasjon om kjernekraft.

Opinion Norge gjennomførte en undersøkelse i januar 2023 for å kartlegge nordmenns tanker om eller holdninger til kjernekraft. Undersøkelsen fant at 51 % av befolkningen var for utbygging av kjernekraft i Norge, kun 37 % var uenig i utbyggingen av kjernekraft og resten visste ikke. Basert på deres undersøkelsesgruppe er det et betydelig flertall som er for kjernekraft i Norge. Videre viste det seg at den yngre gruppen under 30 år var mer positiv til kjernekraft, med hele 56 % for. Når det gjaldt gruppen over 60 år, var det like mange positive som negative (45 % for og 44 % mot). Dermed er det nå totalt sett et flertall for kjernekraft i Norge og dersom trenden fortsetter så vil dette øke i årene fremover når den yngre generasjonen blir eldre, samt informasjon rundt kjernekraft blir mer tilgjengelig og utbredt (Clausen, 2023).

Det er ikke mulig å si med sikkerhet om dette vil samstemme med utbygging av kjerneaktorer på Marinenes kampfartøy, men det vil være en indikasjon på muligheten for aksept blant befolkningen for et slikt prosjekt.

5.4.4 Teknologiske faktorer

Teknologien innen kjernekraft har utviklet seg betydelig gjennom årene, og betegnelsene generasjon I, II, III og IV brukes for å skille nye teknologier fra eldre. Generasjon I-III omfattet hovedsakelig lettvannsreaktorer og forbedrede versjoner av disse, mens generasjon IV omfatter en revolusjonerende endring i design av reaktorene som endrer virkemåten helt. Alle tidligere reaktorer bruker vann til nedkjøling, mens generasjon IV bruker andre kjølemedier for å øke sikkerheten, ytelsen og effektiviteten til reaktorene. Her kommer reaktorene som saltsmeltereaktorer, natrium-kjølte reaktorer, bly-kjølte reaktorer, osv. Generasjon IV lover høyere ytelse, bedre termisk virkningsgrad, høyere sikkerhet og oftere lavere kostnader.

Det finnes et stort antall nye reaktor design som nå testes og forskes på. Selv om ikke alle ideene er nye, men har eksistert siden 60 tallet, var ikke teknologien god nok til å bygge ut disse reaktorene. Et eksempel på dette er saltsmeltereaktoren som oppgaven tar for seg. Den første saltsmeltereaktoren ble operativ i 1961 ved Oak Ridge National Laboratory, men støtte på store problemer knyttet til korrosjon fra saltet.

Både natrium- og bly-kjølte reaktorer har blitt laget, men disse fortsatte ikke på grunn av tekniske utfordringer. Nye løsninger på slike reaktorer er også under forskning og utvikling. Med utvikling av ny teknologi kan flere reaktortyper komme på markedet og vurderes.

5.4.5 Miljømessige faktorer

Avfall produsert av kjernekraftverk er ofte den største ulempen. For fossile brensel er det klimagasser, mens for kjernekraft er det radioaktivt avfall. Avfall fra kjernekraft blir ofte brukt som argument mot kjernekraft, både fordi det er skadelig og fordi det er vanskelig å håndtere. Fordelen med atomavfall fremfor avfallet til fossilt brensel er at avfallet fra atomdrevne fartøy kan samles og lagres trygt. Fossilt brensel på den andre siden slipper ut CO₂ og NO_x gasser i atmosfæren, noe som stadig reguleres strengere og strengere. I tillegg er fangst og lagring av CO₂ vanskelig og dyrt.

Kjernekraft slipper ikke ut noen klimagasser når det produserer kraft, men produserer heller radioaktivt avfall som må lagres. Copenhagen Atomics fremhever at deres reaktorer er «wasteburners» noe som betyr at de kan bruke radioaktivt avfall fra en PWR. Thorium behøver et fissilt materiale for å sette i gang formeringsprosessen i reaktoren, og brukt brensel fra en PWR har fissilt plutonium i seg. Dette er det farligste radioaktive avfallet produsert i kjernereaktorer, og blir brukt i atomvåpen. Plutoniumet fra det brukte brenselet må lagres i 100 000 år før det er trygt, og dette krever store ressurser. Dermed kan en MSR bidra med håndtering av radioaktivt avfall fra tidligere reaktorer, og det som tidligere var hodebry kan nå bli verdifullt materiale.

Avfall fra reaktorer er fortsatt viktig å ta hensyn til, og sikker lagring av dette er viktig. Selv om en thoriumbasert MSR vil produsere svært lite avfall som kun trengs å lagres i 300 år, er det viktig å ha en god og sikker plan for håndtering av dette avfallet. Dersom dette lagres på en god måte vil ikke avfallet være en helseskade, og dersom man bruker kjernekraft vil miljøet spares for utslipp av klimagasser i atmosfæren.

5.4.6 Juridiske faktorer

Anvendelse av kjernekraft er regulert av atomenergiloven, denne loven gir det juridiske rammeverk for lisensiering av bygging og drift av kjerneenergi installasjoner. «Uten konsesjon av Kongen kan ingen oppføre, eie eller drive atomanlegg. Konsesjonen skal gjelde for et bestemt driftssted» (Atomenergiloven, 1972, § 4). Videre står det i samme paragraf at «konsesjon til bygging av atomkraftverk bør ikke gis før Stortinget har gitt sitt samtykke». En eventuell prosess for å anskaffe atomdrevne kampfartøy, krever dermed konsesjon fra Kongen. Konsesjon fra Kongen betyr i praksis at den må gis av regjeringen. Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) oppgir at konsesjon også kreves for å gjennomføre anløp av atomdrevne fartøy i indre norsk farvann og havner. Dette gjelder hovedsakelig militære fartøy og i den konteksten innehar Forsvarsdepartementet myndigheten til å gi konsesjon. Når det gjelder sikkerhetsspørsmål etter atomenergiloven er DSA det øverste faglige organ. Av den grunn er DSA derfor innstillende og rådgivende fagmyndighet (DSA, 2023).

Per dags dato er det kun to anløpshavner som har tillatelse til å ta imot atomdrevne fartøy, henholdsvis Haakonsværn orlogsstasjon og Grøtsund/Tromsø industrihavn. I denne sammenheng har DSA utarbeidet en veileder, som beskriver kravene i forbindelse med forhåndsgodkjenning-konsesjoner (DSA, 2023). Før en anskaffelsesprosess starter for atomdrevne kampfartøy burde atomenergiloven endres for å åpne flere anløpshavner og gjøre prosessen for anløp og skipsfart i indre norske farvann lettere.

SOLAS-konvensjonen kapittel VIII regulerer drift av atomdrevne fartøy på internasjonal basis. Under dette kapittelet er det fremlagt åtte regler som gjelder for atomdrevne fartøy. Etter regel 1 om anvendelse står det følgende: «this chapter applies to all nuclear ships except ships of war» (IMO, 2023). Dermed er atomdrevne kampfartøy unntatt reglene som står i SOLAS kapittel VIII. Det bør likevel gjøres en vurdering på hvorvidt Forsvaret skal følge reglene i kapittel VIII, da de gir gode forutsetninger for å kunne drifte et atomdrevet fartøy mest mulig sikkert.

6 Avslutning

Oppgaven har tatt for seg bruk av kjernereaktorer om bord på Marinens kampfartøy for å se om dette er en mulighet for fremtidens krigsskip. Etter å ha redegjort for teori, analysere, beregne og drøfte er det mange faktorer som kommer inn ved en anbefaling. Bruk av kjernereaktorer på fartøy har både fordeler og ulemper, og bruken vil være avhengig av prioriteringene til det norske forsvaret. Oppgaven har tatt for seg en reaktor som ikke enda er i produksjon, og som dermed ikke er på markedet. Sammenligningen er dermed preget av usikkerhet på nøyaktige tall på pris og funksjonalitet. Anbefalingen avhenger av operative og miljømessige fordeler, sett opp mot økonomiske ulemper.

På grunn av manglende informasjon på pris av en eventuell reaktor, vil det være vanskelig å ta et bestemt valg med absolutt sikkerhet. Meningen med oppgaven er å belyse et tema slik at det kan vurderes når nye fartøy skal konstrueres, og teknologien vi har beskrevet er klar til å tas i bruk. Copenhagen Atomics sin reaktor er ikke planlagt å være på markedet før 2028, og det er uten forsinkelser i planene deres. Det vil si at generasjon IV til bruk på marine kampfartøy ikke er et relevant tema per dags dato, men er et fremtidsrettet prosjekt. Oppgaven forsøker å understreke fordelene med bruk av kjernekraft på fartøy, for å kunne se om det vil være forsvarlig for de relativt små fartøyene på 5-6000 tonns deplasement.

På bakgrunn av informasjonen vi sitter på nå vil vi konkludere med at kjernekraft til bruk i marine kampfartøy er en ide som burde videreføres og tas i betraktning. For fremtidens fartøy mener vi kjernekraft byr på store fordeler innenfor den operative evnen til fartøyene, samt miljømessige hensyn, sammenlignet med dagens fossile løsninger. Selv om kjernekraft er dyrt, er det mye som tyder på at det vil få betydelig nedgang i pris i fremtiden og kan derfor lønne seg fremfor fossilt brensel på lang sikt. Anbefalingen antar en utvikling i samråd med antakelser i oppgaven, og at utviklingen av nye kjernereaktorer fortsetter. Dersom dette er tilfellet mener vi at kjernekraft til bruk på marine kampfartøy er en farbar vei for Marinen.

7 Videre arbeid

Det har blitt oppdaget flere temaer og momenter, som på grunn av omfang og tidsbegrensninger baner grunnlag for videre arbeid. Først og fremst er ikke reaktoren som diskuteres i denne oppgaven ikke i drift enda, ei heller tilsvarende saltsmeltereaktorer fra andre bedrifter. I så måte vil det være hensiktsmessig å ta denne tematikken opp igjen på nytt nærmere 2030 og sammenligne med reelle tall når slike foreligger. Utover dette oppfordres det til å se på batteriløsninger i sammenheng med atomfremdrift for passiv ubåtjakt. En annen mulig problemstilling dersom denne teknologien skulle bli mer aktuell, er behovet for nye utdanningslinjer og hvilke roller som må dekkes om bord. Til slutt drar også atomfremdrift tematikken om logistikk inn i bilde, og byr på både muligheter og utfordringer. I lys av dette kan det være hensiktsmessig se på den totale utholdenheten og eventuelle begrensende faktorer.

Referanseliste

Bøker:

- Ackermann, G., Behrens, R., Bernhardt, F., Boy, P., Claußen, S., Diederichs, H. O., Erles, N. G., Hahne, J., Hockhaus, K., Kehm, P., Krüger, S., Lehmann, E., Ludwig, P., Meier-Peter, H., Planitz, W., Rachow, M., Sauer, H., Scharfetter, C., Steinbock, H., ... Wild, Y. (2009). *Compendium marine engineering: Operation, monitoring, maintenance*. Seehafen Verlag.
- Harrington, R. L. (1992). *Marine engineering*. Society of Naval Architects & Marine Engineers.
- Krane, K. S. (1991). *Introductory nuclear physics*. John Wiley & Sons.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B. (2012). *PRINCIPLES OF ENGINEERING THERMODYNAMICS* (7. utg.). John Wiley & Sons.
- Plumb, C. M. (1987). *Warship propulsion system selection*. Marine Management (Holdings) Ltd.
- Rawson, K. J. & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship theory, volume 1* (5. utg.). Butterworth-Heinemann.
- Rawson, K. J. & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship theory, volume 2* (5. utg.). Butterworth-Heinemann.
- Tsvetkov, P. (2011). *Nuclear power: Deployment, operation and sustainability*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/books/177>

Digitale publikasjoner:

- Aas, O. I. (2023, 28. April). Kjernekraft blir stadig mer populært blant norske politikere. *Aftenposten*. [Kjernekraft blir stadig mer populært blant norske politikere \(aftenposten.no\)](https://www.aftenposten.no/kjernekraft-blir-stadig-mer-populart-blant-norske-politikere)
- Allison, G. (2023, 1. juni). *Data Reveals Number of Days Warships Spent at Sea Last Year*. UK Defence Journal. <https://ukdefencejournal.org.uk/data-reveals-number-of-days-warships-spent-at-sea-last-year/>
- Arnfinnsson, B., & Tønsberg, E. K. (2023). *Nullutslippsforsvaret – en mulighetsstudie av klimavennlig teknologi for Forsvaret* (23/01418). Forsvarets Forskningsinstitutt (FFI). <https://ffi-publikasjoner.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/20.500.12242/3208/23-01418.pdf>

-
- Berthelsen, F. H., & Nielsen, U. D. (2021, oktober). *Prediction of Ships' Speed-Power Relationship at Speed Intervals Below the Design Speed*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921002947>
 - Bonet, M. U., & Pilidis, P. (2013). *Comparative assessment of two thermodynamic cycles of an aero-derivative marine gas turbine*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 6(3), 76-81. <https://doi.org/10.9790/1684-637681>
 - Clausen, N. (2023, 21. November) *Flertall for atomkraft i Norge*. Opinion. <https://www.opinion.no/innlegg/flertall-for-atomkraft-i-norge>
 - Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA). (2023, 16. oktober). *Anløp av reaktordrevne ubåter*. <https://dsa.no/atomsikkerheit-og-kjernekraft/anlop-av-reaktordrevne-ubater>
 - Enova. (2023, 2. november). *Prisforutsetninger for søknader*. <https://www.enova.no/om-enova/drift/prisforutsetninger-for-soknader/>
 - Folkehelseinstituttet (FHI). (2022, 31. mars). *Helseeffekter av ioniserende stråling*. <https://www.fhi.no/kl/straling/mer-om-straling/helseeffekter-av-ioniserende-straling/>
 - General Electric Aerospace. (2018, mars). *GE Marine Gas Turbines for Frigates*. [Brosjyre]. <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/2022-01/GE-Marine-Gas-Turbines-for-Frigates-2018-March.pdf>
 - General Electric Aerospace. (2020). *LM2500 Datasheet*. [Brosjyre]. <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/2022-01/LM2500-Datasheet.pdf>
 - International Atomic Energy Agency. (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
 - Lagouvardou, S., & Psaraftis, H. (2023, juni). *Ship speed vs power or fuel consumption: Are laws of physics still valid? Regression analysis pitfalls and misguided policy implications*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390923000203>
 - Liou, J. (2022, 23. februar). *IAEA Technical Safety Review Service Expands to Cover Conceptual SMR and Other Innovative Reactor Designs*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-technical-safety-review-service-expands-to-cover-conceptual-smr-and-other-innovative-reactor-designs>

-
- Maritime CleanTech. (2016). *Report - Liquid Hydrogen*. <https://maritimecleantech.no/wp-content/uploads/2016/11/Report-liquid-hydrogen.pdf>
 - Ministry of Foreign Affairs of Japan. (2006). *Fact Sheet on U.S. Nuclear Powered Warship (NPW) Safety*. <https://www.mofa.go.jp/region/n-america/us/security/fact0604.pdf>
 - Moskowitz, P. D., Shelenkova, L. N., & Rawool-Sullivan, M. (2002). *Technical and Proliferation-Related Aspects of the Dismantlement of Russian Alfa-Class Nuclear Submarines*. James Martin Center for Nonproliferation Studies (CNS). <https://www.nonproliferation.org/wp-content/uploads/npr/91mosk.pdf>
 - MTU Solutions. (2019). *Marine Sales Program*. [Brosjyre]. https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/download/applications/yacht/16120032_marine_salesprogram.pdf/jcr_content/renditions/original./16120032_marine_salesprogram.pdf
 - Naval History and Heritage Command. (2023, 26. januar). *Rickover Hyman G*. <https://www.history.navy.mil/research/library/research-guides/modern-biographical-files-ndl/modern-bios-r/rickover-hyman-g.html>
 - Naval History and Heritage Command. (2015, 29. juli). *Long Beach III (CG (N)-9)*. <https://www.history.navy.mil/research/histories/ship-histories/danfs/l/long-beach-iii.html>
 - Naval Technology. (2020, 12. oktober). *USS Enterprise (CVN-65) Aircraft Carrier*. <https://www.naval-technology.com/projects/uss-enterprise/?cf-view>
 - Skjelvik, s. & Nijjer, H. K. Lanserer seg selv som «kjernekraftordfører»:- vil vurdere ulike lokasjoner. *NRK Nordland*. https://www.nrk.no/nordland/kjerne-kraftkommuner_-rune-edwardsen-vil-etablere-interesseorganisasjon-for-kjerne-kraftkommuner-1.16513688
 - Spears, W. (2014, august). *Revisiting the Nuclear Option*. United States Naval Institute. <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2014/august/revisiting-nuclear-option>
 - Stal-Laval Turbin AB. (u.å.). *Instruction Book 1: De Laval Marine Steam Turbine Installation*.
 - Statistisk sentralbyrå (SSB). (2023, 3. november). *Utslipp til luft*. <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/forurensning-og-klima/statistikk/utslipp-til-luft>

-
- The Model Shipwright. (2014, 23. juni). *Fletcher Class Destroyer U.S.S. Capps (Later Spanish Destroyer Lepanto)*. <https://www.themodelshipwright.com/high-resolution-ship-plans/cargo-ships/fletcher-class-destroyer-u-s-s-capps-later-spanish-destroyer-lepanto/>
 - Thoriums utvalget (2008). *THORIUM SOM ENERGIKILDE – Muligheter for Norge*. (Thoriumrapporten av 2008). https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/pdf_filer/horinger/horing-thoriumutvalgets-rapport/thoriumrapporten-norsk-versjon.pdf
 - Touran, N. (2020, 30. oktober). *Computing the Energy Density of Nuclear Fuel*. What is Nuclear. <https://whatisnuclear.com/energy-density.html>
 - U.S. Department of Energy. (1995). *History of Nuclear Energy*. <https://www.energy.gov/ne/articles/history-nuclear-energy>
 - U.S. Department of Energy. (2019). *Occupational Radiation Exposure From U.S. Naval Nuclear Plants and Their Support Facilities (NT-19-2)*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f66/NT-19-2.pdf>
 - U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2022, 26. april). *Radiation Doses in Our Daily Lives*. <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/doses-daily-lives.html>
 - World Nuclear Association. (2023, oktober). *Nuclear Powered Ships*. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>
 - Fenske, C. (2012). *MTU Series 1163 M04*. Friedrichshafen: MTU Friedrichshafen GmbH.
 - Dimou, I., Menard, P., E.Sarris, & Urrutia, R. (2010). *PROJECTS IN NAVAL SHIP CONVERSION DESIGN. DDG-51 FLIGHT IIA MODIFIED REPEAT PROJECT AREA AIR DEFENCE DESTROYER*.

Lover, forskrifter og regler:

- Atomenergiloven. (1972). *Lov om atomenergivirksomhet*. (LOV-2022-06-17-59). Lovdata. <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1972-05-12-28>
- Forskrift om tiltaks- og grenseverdier. (2011). *Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisiko-grupper for biologiske faktorer*. (FOR-2023-03-24-412). Lovdata. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2011-12-06-1358>
- International Maritime Organization. (1974). *Chapter VII: Nuclear ships*. In *SOLAS: International Convention for the Safety of Life at Sea*. https://www.imorules.com/SOLAS_CHVIII.html

Vedlegg

Vedlegg 1: Spørsmål til intervju (Se eget dokument)

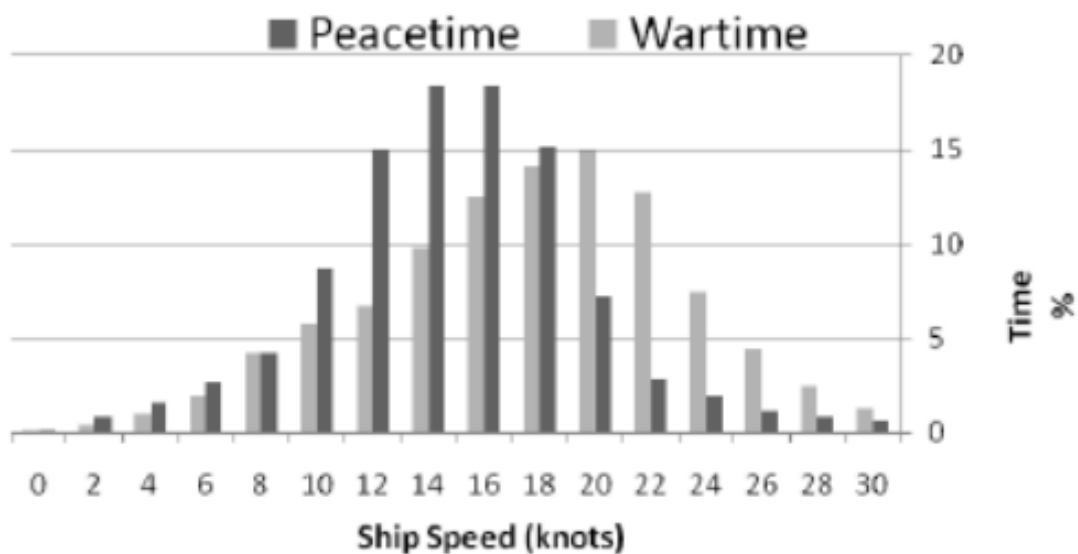
Vedlegg 2: Utregninger for tabell 6 (Se eget dokument)

Vedlegg 3: Operasjonsprofil Arleigh Burke

Vedlegg 4: SFC GE LM2500

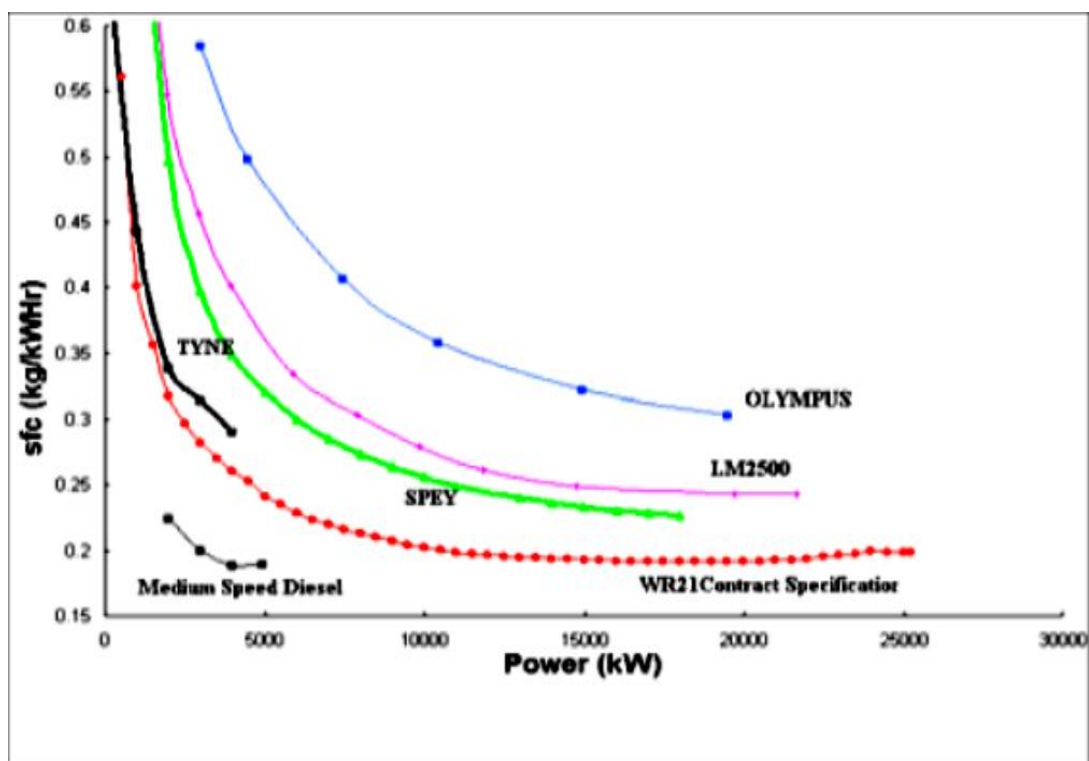
Vedlegg 5: SFC MTU 12V 1163

Vedlegg 3: Operasjonsprofil Arleigh Bruke



Kilde: Dimou, Menard, E.Sarris, & Urrutia, 2010, s. 31

Vedlegg 4: SFC GE LM2500



Kilde: Bonet & Pildiss, 2013, s. 78

Vedlegg 5: SFC MTU 12V 1163

Feature	Series 1163 TB03	Series 1163 M04
Start of Delivery (year)	1987	2013
Emission compliance	IMO Tier 1	IMO Tier 2
MCR per Cylinder	370 kW	370 kW
Power per Swept volume	32 kW per ltr	32 kW per ltr
Weight-to-power ratio	3.1 kg / kW	3.3 kg / kW
Total weight 20V (dry)	23,000 kg	24,500 kg
Mean Effective Pressure	28.3 bar	28.3 bar
SFOC at nom. load (100% MCR)*	226 g/kWh	211 g/kWh
SFOC at part load 75% MCR*	218 g/kWh	205 g/kWh
SFOC at part load 50% MCR*	215 g/kWh	204 g/kWh
SFOC at part load 25% MCR*	228 g/kWh	207 g/kWh

Kilde: Fenske, 2012