

Einar Borge og Jonas Fure Lind

# Elektrisitetsproduksjon med ORC- teknologi ved fjernvarmedrift

Analyse og optimalisering av ORC-  
prosessbetingelser for drift av ny ORC-turbin hos  
Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik

Bacheloroppgave i Ingeniør, Fornybar Energi

Veileder: Shiplu Sarker

Mai 2023



Einar Borge og Jonas Fure Lind

# **Elektrisitetsproduksjon med ORC- teknologi ved fjernvarmedrift**

Analyse og optimalisering av ORC-prosessbetingelser  
for drift av ny ORC-turbin hos Eidsiva Bioenergi AS i  
Gjøvik

Bacheloroppgave i Ingeniør, Fornybar Energi  
Veileder: Shiplu Sarker  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kunnskap for en bedre verden





Oppgavens tittel: Elektrisitetsproduksjon med ORC- teknologi ved fjernvarmedrift	Dato: 21.05.23		
	Antall sider: 43		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave:	x
Navn: Jonas Fure Lind og Einar Borge			
Veileder: Shiplu Sarker			
Eksterne faglige kontakter/veiledere: Øyvind Hundseid (Eidsiva Bioenergi AS)			

## Stikkord:

Fjernvarme
Rankine syklus
ORC-teknologi
Aspentech HYSYS

# Sammendrag

Denne bacheloroppgaven undersøker bruk av ORC-teknologi som et bærekraftig og økonomisk bidrag for energiproduksjon, i lys av økte strømpriser og energiknapphet. Arbeidet er motivert av Eidsiva Bioenergi AS sitt vellykkede bruk av ORC-teknologi i Elverum og deres interesse for å utforske en lignende løsning i Gjøvik. Problemstillingen fokuserer på å identifisere, dokumentere og optimalisere prosessbetingelser for ORC-systemet. Gjennom dette vil prosjektet bidra til utvikling av bærekraftige praksiser innen ingeniørfaget, i tråd med FNs bærekraftsmål.

Datainnsamlingen er basert på informasjon levert av Eidsiva Bioenergi AS, og inkluderer temperatur, trykk, massestrøm og kjeleeffekt. Disse dataene ble levert i Excel-tabeller som ble bearbeidet med Matlab og til slutt benyttet i AspenTech HYSYS for simulering. I prosessen ble dataene delt inn i syv forskjellige scenarier for å reflektere årlige variasjoner i driftssituasjoner. Denne datainnsamlingsmetoden ga grunnlaget for simuleringer i HYSYS, og reflekterer anleggets ytelse under forskjellige årstidsavhengige driftsbetingelser.

Det er utviklet tre ulike caser som ble simulert for å evaluere og forbedre effektiviteten av ORC-systemet. Case 0 ble etablert som referansecase og brukes som grunnlag for sammenligning. Case 1 og Case 2 tar for seg henholdsvis en økning i kjeletemperatur og redusert returtemperatur. Hver av disse casene ble utformet for å teste og analysere effekten av spesifikke parameterendringer på ytelsen til det simulerte systemet.

Basert på simuleringsresultatene ble det gjort en økonomisk analyse for hver case. Det ble også undersøkt en alternativ investering i en større turbin. Resultatene viste at Case 1 hadde kortest tilbakebetalingstid, men sett over hele prosjektets livsløp hadde den alternative investeringen i en større turbin den høyeste nåverdien. Dette tyder på at til tross for høyere investeringskostnader, kan investering i en større 455 kW ORC-turbin være mer lønnsom på lang sikt.

# Abstract

This bachelor's thesis investigates the use of ORC-technology as a sustainable and economic contribution for energy production, in light of increased electricity prices and energy scarcity. The work is motivated by Eidsiva Bioenergi AS's successful use of ORC-technology in Elverum and their interest in exploring a similar solution in Gjøvik. The issue focuses on identifying, documenting and optimizing process conditions for the ORC system. Through this, the project will contribute to the development of sustainable practices within the engineering profession, in line with the UN's sustainability goals.

The data collection is based on information provided by Eidsiva Bioenergi AS, and includes temperature, pressure, mass flow and the boiler's power. This data was delivered in Excel tables which were processed with Matlab and finally used in AspenTech HYSYS for simulation. The data was divided into seven different scenarios to reflect annual variations in operating situations. This data collection method provided the basis for simulations in HYSYS, and reflects the plant's performance under different seasonal operating conditions.

Three different cases have been developed which were simulated to evaluate and improve the efficiency of the ORC system. Case 0 was established as a reference case and is used as a basis for comparison. Case 1 and case 2 respectively deal with an increase in boiler temperature and a reduced return temperature. Each of these cases were designed to test and analyze the effect of specific parameter changes on the performance of the simulated system.

Based on the simulation results, an economic analysis was made for each case. An alternative investment in a larger turbine was also investigated. The results showed that Case 1 had the shortest payback period. But viewed over the entire project's life cycle, the alternative investment in a larger turbine had the highest NPV. This suggests that despite higher investment costs, investing in a larger 455 kW ORC turbine may be more profitable in the long term.

# Forord

Arbeidet ved denne bacheloroppgaven ble utført i vårsemesteret 2023 og er vårt avsluttende arbeid ved studiet Bachelor ingeniørfag i fornybar energi ved NTNU i Gjøvik.

Opgaven er et resultat av samarbeid med Eidsiva bioenergi AS, som har bidratt med en yrkesrelevant, spennende og innovativ problemstilling. Vi ønsker å takke for godt samarbeid i forbindelse med datainnsamling og bedriftsbesøk på deres anlegg både i Gjøvik og Elverum. Vi ønsker å utrekke en stor takk til Øyvind Hundseid ved Eidsiva Bioenergi AS og Førsteamanuensis Shiplu Sarker ved NTNU for utmerket veiledning og oppfølging under denne lærerike perioden. I tillegg ønsker vi å takke driftsoperatør Morten Granberg ved Eidsiva Bioenergi AS for god hjelp i forbindelse med datainnhenting og prosessforståelse.

Gjøvik 21. mai 2023  
Einar Borge og Jonas Fure Lind

# Figurer

1.1	FNs bærekraftmål [4] . . . . .	2
2.1	Skisse fjernvarmeanlegg [7] . . . . .	4
2.2	Energikilder til fjernvarme nasjonalt [8] . . . . .	5
2.3	Anlegget i Gjøvik under oppbygning [10] . . . . .	5
2.4	Energikilder Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik [11] . . . . .	6
2.5	Illustrasjon av anlegget i Gjøvik [10] . . . . .	6
2.6	Skisse ORC syklus . . . . .	8
2.7	TS-diagram . . . . .	9
3.1	Datagrunnlag temperatur . . . . .	14
3.2	Datagrunnlag massestrøm . . . . .	15
3.3	Datagrunnlag trykk . . . . .	16
3.4	Datagrunnlag kjeleeffekt . . . . .	17
3.5	Referansemodell HYSYS Simulasjon . . . . .	21
4.1	Referansemodell Vinter 1 . . . . .	24
4.2	Referansemodell Vår . . . . .	25
4.3	Referansemodell Forsommer . . . . .	26
4.4	Referansemodell Sommer . . . . .	27
4.5	Referansemodell Sensommer . . . . .	28
4.6	Referansemodell Høst . . . . .	29
4.7	Referansemodell Vinter 2 . . . . .	30
4.8	Estimert produksjon . . . . .	32

# Tabeller

3.1	Fordeling av scenarier . . . . .	18
3.2	Referansemodell . . . . .	18
3.3	Design-parametere HYSYS modell . . . . .	19
3.4	Kritiske verdier arbeidsmedium . . . . .	20
4.1	Resultater Vinter 1 . . . . .	25
4.2	Resultater Vår . . . . .	25
4.3	Resultater Forsommer . . . . .	26
4.4	Resultater Sommer . . . . .	27
4.5	Resultater Sensommer . . . . .	28
4.6	Resultater Høst . . . . .	29
4.7	Resultater Vinter 2 . . . . .	30
4.8	Resultater caser . . . . .	31
4.9	Turbineffekter . . . . .	31
4.10	Energiproduksjon . . . . .	32
4.11	Tilbakebetalingstid ORC . . . . .	33
4.12	Investeringsgrunnlag år 1 . . . . .	34
4.13	Resultat nåverdiberegning . . . . .	34

# Innhold

<b>Sammendrag</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Forord</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>Figurer</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>Tabeller</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>Innhold</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Ordforklaringer</b> . . . . .	<b>xii</b>
Forkortelser og symboler . . . . .	xii
<b>1 Innledning</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn og motivasjon . . . . .	1
1.1.1 Bærekraftig ingeniørfag . . . . .	2
1.2 Problemstilling . . . . .	3
1.3 Avgrensninger . . . . .	3
<b>2 Teori</b> . . . . .	<b>4</b>
2.1 Fjernvarme . . . . .	4
2.1.1 Eidsiva Bioenergi Gjøvik . . . . .	5
2.2 Organisk Rankine syklus . . . . .	8
2.2.1 Komponenter . . . . .	8
2.2.2 Prosesser . . . . .	9
2.3 Økonomi . . . . .	11
2.3.1 Netto nåverdi . . . . .	11
2.3.2 Tilbakebetalingstid . . . . .	11
<b>3 Metode</b> . . . . .	<b>12</b>
3.1 Datainnsamling . . . . .	12
3.1.1 Matlab . . . . .	12
3.1.2 Datagrunnlag . . . . .	12
3.2 Referansescenarier . . . . .	18
3.3 HYSYS-modellering . . . . .	19
3.3.1 Case 0: Design-parametere . . . . .	19
3.3.2 Arbeidsmedium . . . . .	20

3.3.3	Tilstandsligning . . . . .	20
3.3.4	Referansemodell . . . . .	20
3.4	Caser . . . . .	21
3.4.1	Case 1: Øke kjeletemperatur . . . . .	21
3.4.2	Case 2: Senke returtemperatur . . . . .	22
3.5	Økonomisk analyse . . . . .	22
3.5.1	Investeringsresultat år 1 . . . . .	22
3.5.2	Nåverdi . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Resultater . . . . .</b>	<b>24</b>
4.1	Scenarier . . . . .	24
4.2	Caser . . . . .	31
4.3	Energiproduksjon . . . . .	32
4.4	Økonomi . . . . .	33
4.4.1	Tilbakebetalingstid . . . . .	33
4.4.2	Investeringsresultat år 1 . . . . .	33
4.4.3	Nåverdi . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Diskusjon . . . . .</b>	<b>35</b>
5.1	Modellens begrensninger . . . . .	35
5.2	Scenarier . . . . .	35
5.3	Caser . . . . .	36
5.3.1	Samlet effekt og mulige ulemper . . . . .	37
5.4	Økonomi . . . . .	37
5.4.1	Økonomiske resultater . . . . .	37
5.5	Bærekraftperspektiver . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Konklusjon . . . . .</b>	<b>40</b>
	<b>Litteraturliste . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Matlab kode . . . . .</b>	<b>44</b>
A.1	Databehandling . . . . .	44





# Ordforklaringer

## Forkortelser

**MW** Megawatt

**kW** Kilowatt

**GWh** Gigawatt-time

**kWh** Kilowatt-time

**FN** Forente Nasjoner

**ORC** Organic Rankine Cycle

**NOK** Norske kroner

**NPV** Nåverdi (Net Present Value)

## Symboler

**$\dot{m}$**  Massestrømningshastighet (kg/s)

**$h$**  Entalpi (kJ/kgK)

**$Q$**  Varmestrøm (kW)

**$W$**  Arbeid (kW)

**$P$**  Energi (kWh)

**$T$**  Temperatur (°C)

**$p$**  Trykk (Pa)

**$\eta$**  Termisk virkningsgrad

**$\Delta T$**  Temperaturdifferanse

# Kapittel 1

## Innledning

Dette kapittelet sikter på å gi leser en oversikt over bakgrunnen og motivasjonen for valgt oppgave, videre introduseres oppgavens problemstilling og arbeidets avgrensninger.

### 1.1 Bakgrunn og motivasjon

I kjølvannet av koronapandemien i 2021 har det vært en tydelig økning i etterspørselen etter gass. Dette skyldes en kombinasjon av en lang og kald vinter med lav vindkraftproduksjon i Europa, høy etterspørsel etter gass i Asia og begrenset gassforsyning fra Russland. Økte gasspriser førte igjen til høyere strømpriser. I tillegg har ugunstige værforhold gjennom 2022 bidratt til å forsterke energikrisen [1]. Dagens energisituasjon og de høye strømprisene i Europa har tvunget mange energiaktører til å måtte tenke kreativt for å finne løsninger som kan møte behovene for elektrisitet på en bærekraftig måte. Samtidig har de høye strømprisene også skapt nye muligheter for lønnsomme investeringer som tidligere har blitt ansett som mindre lukrative.

Eidsiva Bioenergi AS har allerede etablert en ORC-turbin i deres fjernvarmeanlegg på Elverum, som har vist seg å være en svært lønnsom investering med tanke på dagens høye strømpriser. Selskapet har mottatt et tilbud om å installere et lignende system for fjernvarmeanlegget i Gjøvik. Imidlertid ønsker de å foreta et studie for å undersøke muligheter for optimalisering av integreringen av et slikt system, for å få et mer presist bilde av lønnsomheten under ulike driftsforhold og scenarier. Dette vil bidra til å danne grunnlaget for en beslutning om installasjon av en ORC-turbin i Gjøvik og muligens i andre fremtidige prosjekter.

### 1.1.1 Bærekraftig ingeniørfag

Bærekraft og bærekraftig utvikling er begreper som har blitt mer og mer sentrale, spesielt i lys av den stadig økende bevisstheten om klimaendringer og deres negative effekter på økosystemer, ressurser og velferd [2]. Det er mange ulike definisjoner på hva bærekraft og bærekraftig utvikling er, og i denne oppgaven tar vi utgangspunkt i den klassiske formuleringen fra FNs brunlandkommisjon 1987 «Meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs» [2]. Denne definisjonen er særlig relevant for ingeniørarbeid, ettersom det dreier seg om å utvikle teknologier og løsninger som både er effektive og miljømessig bærekraftige.

Ingeniørfaget spiller en nøkkelrolle i å fremme bærekraftig utvikling ved å utvikle teknologiske løsninger som imøtekommer FNs bærekraftsmål [3]. Dette innebærer å innføre bærekraftige praksiser på tvers av en rekke felt, inkludert energiproduksjon. ORC-teknologi, som er fokuset til denne oppgaven, har potensial til å spille en stor rolle.



Figur 1.1: FNs bærekraftsmål [4]

ORC-teknologi (Organic Rankine Cycle) er en teknologi som gjør det mulig å generere elektrisitet ved hjelp av og utnytte lavverdig varme, noe som gjør det til en bærekraftig energiløsning [5]. Denne teknologien samsvarer godt med flere av FNs bærekraftsmål, særlig Mål 7 (Ren energi for alle), Mål 9 (Industri, innovasjon og infrastruktur) og Mål 13 (Stoppe klimaendringene) [3].

Bærekraftig ingeniørfag innebærer ikke bare utvikling av teknologi til det grønne skiftet,

men også å vurdere de sosiale og økonomiske konsekvensene av teknologiske løsninger [6]. For eksempel kan implementering av ORC-teknologi gi tilgang til ren energi i avsidesliggende eller underutviklede områder, noe som bidrar til sosial bærekraft ved å forbedre livskvaliteten for disse samfunnene. Samtidig som det kan gi gode økonomiske gevinster.

## 1.2 Problemstilling

Problemstillingen definert i samspill med Eidsiva Bioenergi er å definere de optimale prosessbetingelsene for et ORC-system satt inn i det eksisterende fjernvarmenettet i Gjøvik, for at den skal kunne gi en mest mulig optimal investering på prosjektet.

Dette skal utføres i følgende steg:

- Dokumentere prosessbetingelser for varmesentralen og hvordan disse varierer gjennom året
- Modellere og simulere ORC-systemet for å definere driftsbetingelser
- Foreslå prosessendringer for optimal ORC-drift
- Undersøke lønnsomheten ved de forskjellige prosessbetingelsene

## 1.3 Avgrensninger

Det er viktig å avgrense oppgaven for å sikre at fokus blir på det som er relevant og mulig å gjennomføre innenfor rammene til en bacheloroppgave. Oppgaven har ikke som hensikt å gi en detaljert beskrivelse av drift av ORC, men heller belyse innvirkningen av endring på prosessbetingelser.

Videre vil oppgaven ikke inkludere hensyn til de innvirkningene ORC-systemet har på driften av fjernvarmeanlegget utenom de scenariene nevnt i seksjon 1.2. Ved modifikasjonene som utføres i prosessbetingelsene for optimaliseringen av ORC-driften, ser vi ikke på hvordan dette påvirker resten av fjernvarmeanlegget i sin helhet, og eventuelle utfordringer som kan oppstå for eksempel med utslipptall og trykk på nettet. Det er mest interessant å få maksimal utnyttelse av ORC-systemet for å få mest mulig energiproduksjon. Tilpasninger av funnene i oppgaven bør bli vurdert av ingeniørene hos Eidsiva ved eventuell implementering.

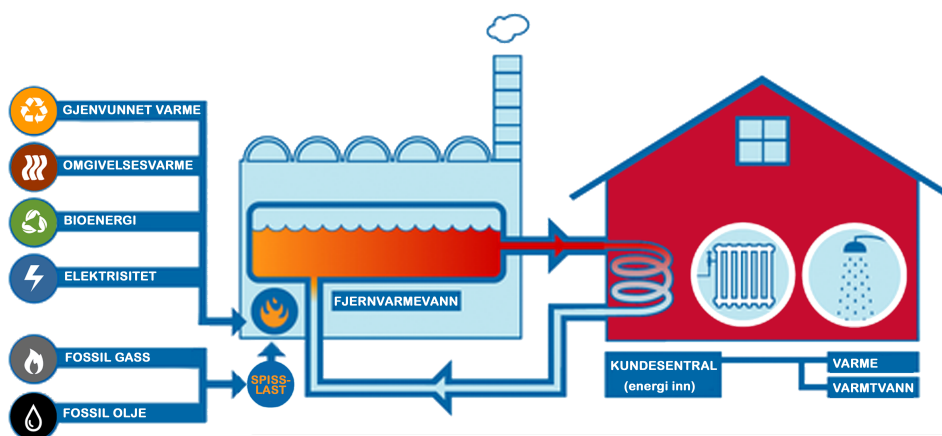
# Kapittel 2

## Teori

Dette kapittelet gir en teoretisk introduksjon av de mest aktuelle prosessene som ligger til grunn for å muliggjøre elektrisitetsproduksjon ved bruk av et ORC-system og dens virkemåte. Videre vil det bli gjennomgått de ulike komponenter som utgjør en ORC-turbin og deres funksjon. Avslutningsvis gjennomgås relevant teori for økonomisk analyse av investering i et ORC-system.

### 2.1 Fjernvarme

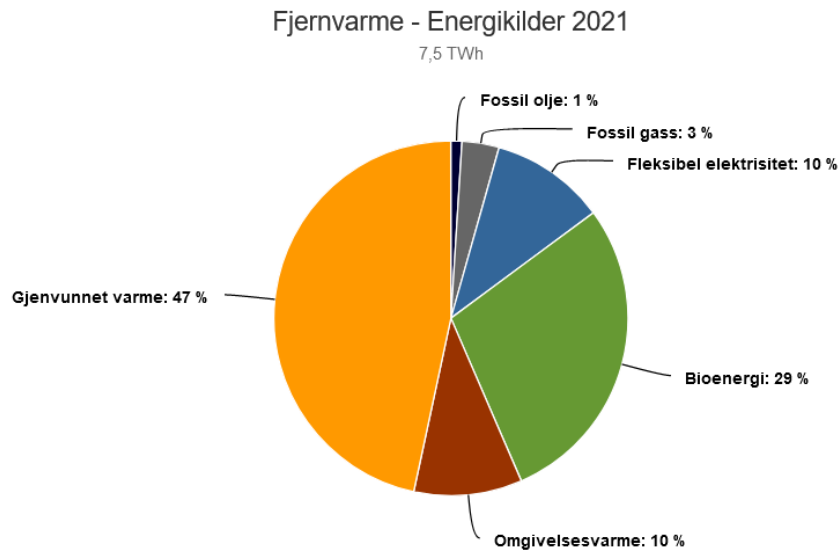
Fjernvarme er å benytte et sentralt fyringsanlegg for å tilføre varmeenergi til nærliggende husholdninger og industri. Prinsipielt fungerer et fjernvarmeanlegg som vist i figur 2.1 under. Det blir benyttet en kjele som ofte blir fyrt med biodrivstoff, da for eksempel returtre, til å varme opp vann. Dette vannet blir da transportert til kundefanleggene hvor varmeenergien blir hentet ut og benyttet til oppvarming og varmtvann, før det blir sendt i retur for gjenoppheating. [7]



Figur 2.1: Skisse fjernvarmeanlegg [7]

Oftest blir fjernvarmeanlegg kjørt med en grunnlast på en hovedkjele som skal ha kapasitet

til å drifte nettet, og har andre reservekjeler for fyring ved vedlikehold og ved spissing i de kaldeste periodene. Som sett fra figur 2.2 er den mest vanlige energikilden til fjernvarme i Norge gjenvunnet varme fra industri, tett etterfulgt av bioenergi. Elektrisitet og fossile kilder er mindre vanlige og er oftest brukt som spissing i de kaldeste periodene når det er nødvendig med mer tilgjengelig energi.



Figur 2.2: Energikilder til fjernvarme nasjonalt [8]

### 2.1.1 Eidsiva Bioenergi Gjøvik

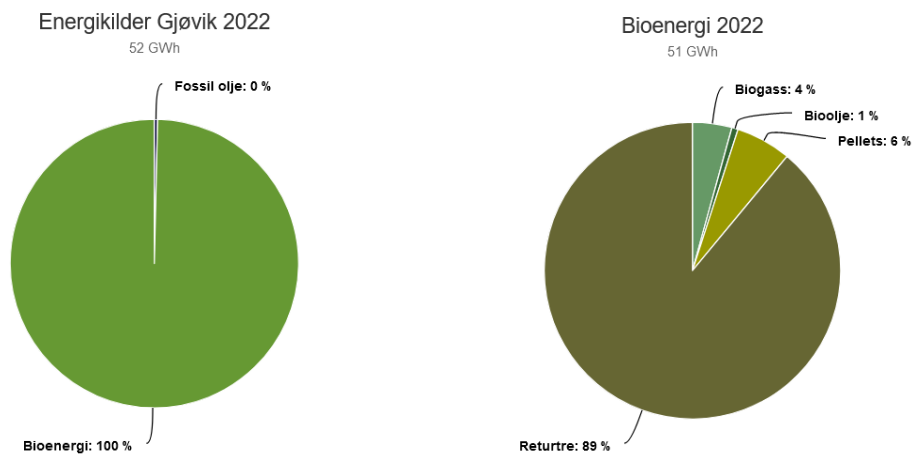
Fjernvarmeanlegget som er grunnlaget til bacheloroppgaven er anlegget til Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik. Teorigrunnlaget her er hentet fra nettsidene til Eidsiva Bioenergi AS [9] og fra flere samtaler med de ansatte ved anlegget i Gjøvik.



Figur 2.3: Anlegget i Gjøvik under oppbygning [10]

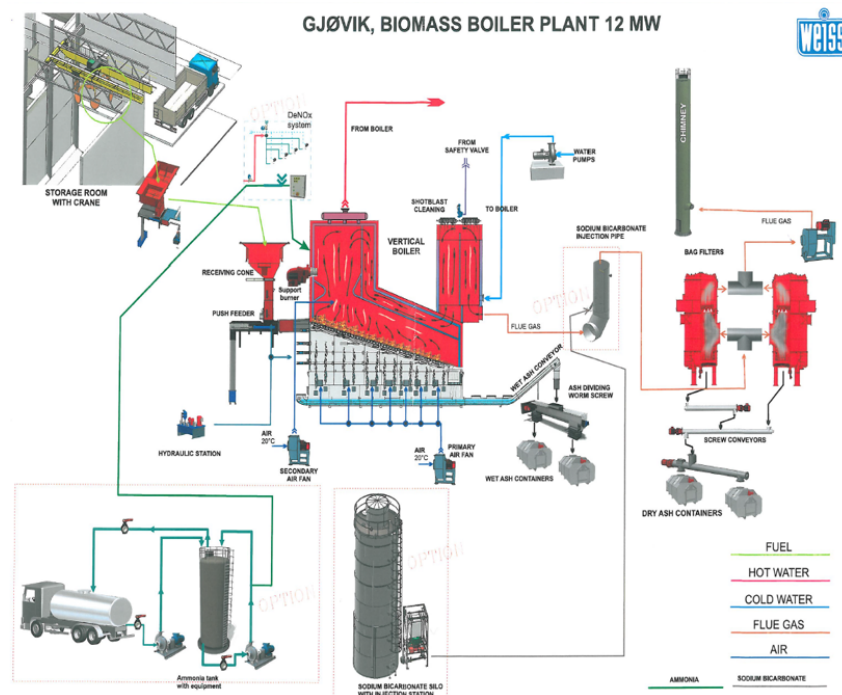
Anlegget i Gjøvik ble satt i drift i året 2015 og består av én returtre kjele med to pelletskjeler

og to oljekjeler som spissing. Anlegget leverer en samlet produsert energi over året på 57 GWh [9] fordelt over en kundemasse på rundt 160 kundesentraler i Gjøvik kommune.



Figur 2.4: Energikilder Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik [11]

Hovedkjelen har en installert effekt på 12 MW og er som vist i figur 2.4 hovedsaklig fyrt med returtré, men er også godkjent for fyring med skogflis. Ved full last brenner den rundt 100 tonn returtré om dagen, og over et år blir det fyrt 18000 tonn returtré. Figur 2.5 viser hele fyringsprosessen til hovedkjelen.



Figur 2.5: Illustrasjon av anlegget i Gjøvik [10]

Oljekjelene er begge på 10 MW, den ene driftes med bio-olje og den andre fossilt. Disse holdes varme i kjelekretsen så de alltid er klare til å bli lagt inn som nødlast om det er



nødvendig med mer kapasitet, men som regel er det et mål at de aldri skal være i drift. Den samlede merkeeffekten på 20 MW gjør og at de kan ta over hele driften til anlegget om det skulle skje noe med hovedkjelen som gjør at den må ut av drift over lengre periode.

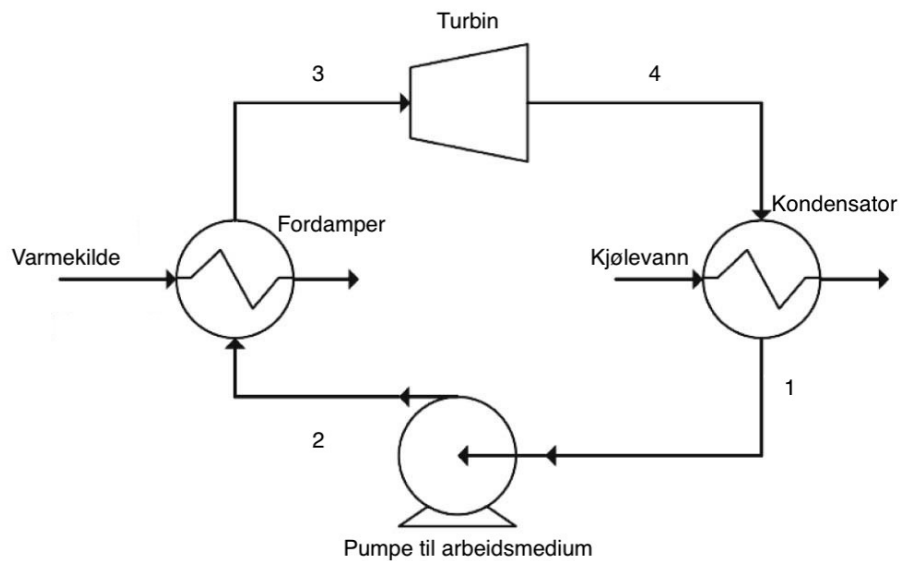
Pelletskjelene er på 2 MW, den ene står inne i anlegget mens den andre står ute i nettet. Disse kjelene står ikke varme og trenger omtrent en halv dag for å fyre med full effekt. De blir da heller brukt til planlagt spissing over lengre perioder når det er meldt veldig kaldt, og til å opprettholde nettet når det blir utført sommervedlikehold på hovedkjelen.

Ved normal drift av anlegget brukes kjelen til å balansere varmtvannsinholdet i en akkumulator, hvis denne blir full så blir det kjørt energi ut i et kjøletårn med en kapasitet på 2 MW, og hvis denne blir tom kjøres spissinga på oljekjelen. I sommermånedene er det et mål om å fylle denne akkumulatoren så sakte som mulig for å unngå å tappe energi ut i kjøletårnet, men dette er ikke alltid til å unngå da hovedkjelen må kjøres kontinuerlig og energien den produserer uten last er ofte høyere enn behovet i nettet [10].

## 2.2 Organisk Rankine syklus

Organisk Rankine syklus (ORC) systemer har blitt et stadig mer populært alternativ for å utvinne energi fra lavtemperatur kilder som fjernvarme, geotermisk varme, solvarme og biomasse. Disse systemene benytter seg av et organisk arbeidsmedium i stedet for vann, noe som gir en mer gunstige prosessbetingelser ved lave temperaturer. ORC-systemer har en rekke fordeler i forhold til konvensjonelle dampturbiner, som inkluderer høyere termisk effektivitet og mulighet for lavere driftstemperaturer [12].

ORC-teknologi er basert på Rankine syklusen, dette er en termodynamisk syklus som brukes for å konvertere varme til arbeid [13], syklusen er forenklet skissert i figur 2.6. ORC-systemet bruker som nevnt organiske arbeidsmedier til fordel for vann, eksempelvis R-245fa, R-123, R-134a, isobutan og butan, som har fordeler som lavt kokepunkt og høy damptrykk ved lav temperatur [14]. Denne teknologien gjør det mulig å utnytte tilgjengelig overskuddsvarme til å produsere strøm.



Figur 2.6: Skisse ORC syklus

### 2.2.1 Komponenter

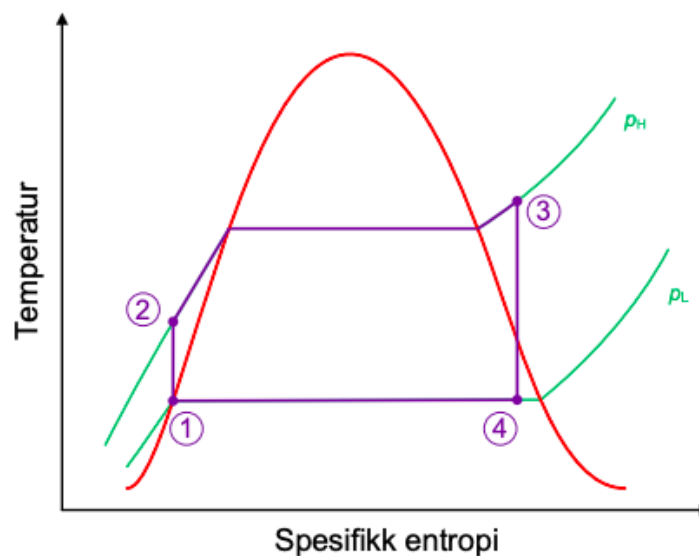
ORC-syklusen består som illustrert i figur 2.6 av flere ulike komponenter som alle har spesifikke funksjoner.

- Turbin: Leverer arbeid fra syklusen ved å konvertere termisk energi fra arbeidsmediet til mekanisk energi.
- Kondensator: Overfører termisk energi fra arbeidsmediet til kjøleelementet.
- Pumpe: Har som funksjon å øke trykket på arbeidsmediet i syklusen.

- Fordamperen: Overføre termisk energi fra varmekilden til arbeidsmediet.
- Arbeidsmedium: Organisk stoff som transporterer energi rundt i syklusen.

### 2.2.2 Prosesser

Den ideelle syklusen består av fire prosesser [15], her presenteres de fire ligningene som brukes til å analysere ORC-modellens termodynamikk. Hver ligning representerer en komponent i syklusen, med tilhørende varmeoverføringer eller arbeid som utføres. Ligningene viser forholdet mellom entalpier og massetilstrømning for hver prosess illustrert i Figur 2.7, og gir en matematisk beskrivelse av systemets energiflyt.



Figur 2.7: TS-diagram

- 3-4: Turbin: Isentropisk ekspansjon

I denne prosessen ekspanderer arbeidsmedium fra fordampningen, og utfører arbeid ved turbinen. Denne prosessen skjer ved konstant entropi, og temperaturen og trykket synker.

$$W_{turbin} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (2.1)$$

- 4-1: Kondensator: Isobar kjøling

Etter ekspansjonen vil dampen gå inn i kondensatoren der den blir avkjølt og kondenserer tilbake til væskeform. Denne prosessen skjer ved konstant trykk, mens entropien og temperaturen synker.

$$Q_{ut} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (2.2)$$

- 1-2: Pumpe: Isentropisk kompresjon

Væsken fra kondensatoren pumpes tilbake til fordamperen for å øke trykket på væsken

og starte syklusen på nytt. Denne prosessen skjer ved konstant entropi, og trykket og temperaturen øker når arbeidsmediet pumpes.

$$W_{pumpe} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

- 2-3: Fordamper: Isobar oppvarming

I denne prosessen overføres energi fra varmekilden til arbeidsmediet, som fordamper. Denne prosessen skjer ved konstant trykk, mens temperaturen og entropien øker.

$$Q_{inn} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2.4)$$

### Ytelsesparametre

Termisk virkningsgrad er en viktig parameter for å vurdere effektiviteten til ORC-systemer, og kan brukes til å sammenligne forskjellige systemkonfigurasjoner og optimalisere systemdesignet [15]. Den termiske virkningsgrad er definert som forholdet mellom energien tilført arbeidsmediet og arbeidet som kan hentes ut, den kan skrives som:

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbin} - W_{pumpe}}{Q_{inn}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (2.5)$$

For å maksimere termisk virkningsgrad i et ORC-system, er det viktig å ha høy temperaturdifferanse mellom varmekilden og arbeidsmediet i fordampingsprosessen og mellom arbeidsmediet og kjølevannet i kondensatoren.

### Potensiell energiproduksjon

For å estimere hvor mye elektrisitet som kan produseres, ser man på den tilgjengelige energien i syklusen. Denne produksjonen er avhengig av netto effekt, som kan uttrykkes som en differanse mellom turbin- og pumpearbeid. Dette kan matematisk beskrives som følger:

$$W_{netto} = W_{turbin} - W_{pumpe} \quad (2.6)$$

Videre kan den produserte energien beregnes ved å multiplisere nettoeffekten med driftstid, gitt i denne oppgaven ved antall timer og dager sett ved konstant drift av anlegget. Dette gir oss følgende ligning:

$$P_{el} = W_{netto} \cdot t \cdot d \quad (2.7)$$

Her representerer  $P_{el}$  den produserte energien,  $t$  antall timer og  $d$  antall dager. Ligningene 2.6 og 2.7 danner grunnlaget for våre beregninger av potensiell elektrisitetsproduksjon.

## 2.3 Økonomi

Dette kapittelet presenter teorien bak de økonomiske beregningene som brukes for å vurdere lønnsomheten av investeringen i ORC-systemet. Det finnes flere ulike metoder for å vurdere lønnsomheten av et prosjekt, og dette kapittelet vil fokusere på to av de mest brukte metodene, netto-nåverdi og tilbakebetalingstid, og forklare hvordan de kan brukes for å vurdere lønnsomheten av investeringen i et ORC-system.

### 2.3.1 Netto nåverdi

Netto nåverdi (NPV) er et mål på prosjektets totale nåverdi og tar hensyn til både investeringskostnadene og kontantstrømmen som genereres av prosjektet [16]. Beregningen av NPV krever en antagelse om diskonteringsrenten, som representerer avkastningen som kan oppnås ved å investere pengene andre steder [16]. For å beregne NPV trekkes nåverdien av investeringskostnadene fra nåverdien av kontantstrømmen. Hvis NPV er positiv, kan vi anta at prosjektet er lønnsomt. Matematisk kan NPV beregnes som følger:

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (2.8)$$

der  $C_0$  er investeringskostnadene,  $CF_t$  er kontantstrømmen i år  $t$ ,  $r$  er diskonteringsrenten og  $T$  er prosjektets levetid.

### 2.3.2 Tilbakebetalingstid

Tilbakebetalingstiden er den tiden det tar å få tilbake investeringen gjennom besparelser eller inntekter [17]. Formelen tar hensyn til investeringskostnaden og årlig nettoinntjening.

$$Payback = \frac{\text{Investeringskostnad}}{\text{Årlignettoinntjening}} \quad (2.9)$$

Hvis tilbakebetalingstiden for en investering er mindre enn eller lik levetiden til investeringen, er investeringen lønnsom [17]. Hvis tilbakebetalingstiden er lengre enn levetiden til investeringen, vil investeringen ikke være lønnsom. Disse beregningene kan gi verdifulle innsikter i lønnsomheten av et prosjekt, og kan brukes til å sammenligne forskjellige alternativer og ta informerte beslutninger.

# Kapittel 3

## Metode

Dette kapitlet presenter de forskjellige arbeidsprosessene og fremgangsmåtene som er benyttet i oppgaven. Det inkluderer en beskrivelse av verktøyene som er brukt og antakelsene som er gjort, for å modellere og simulere en organisk Rankine-syklus (ORC) som drives av fjernvarme. Det blir presentert en beskrivelse av modellen som er benyttet for å oppnå de simulerte resultatene. Til slutt presenteres metoden for den økonomiske analysen.

### 3.1 Datainnsamling

Datainnsamlingen baserer seg hovedsaklig på fjernvarmeanlegget til Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik, men det er og blitt benyttet informasjon fra det eksisterende ORC-systemet til Eidsiva Bioenergi AS på Elverum som bakgrunn for simulasjoner og antagelser for driftsbetingelser.

#### 3.1.1 Matlab

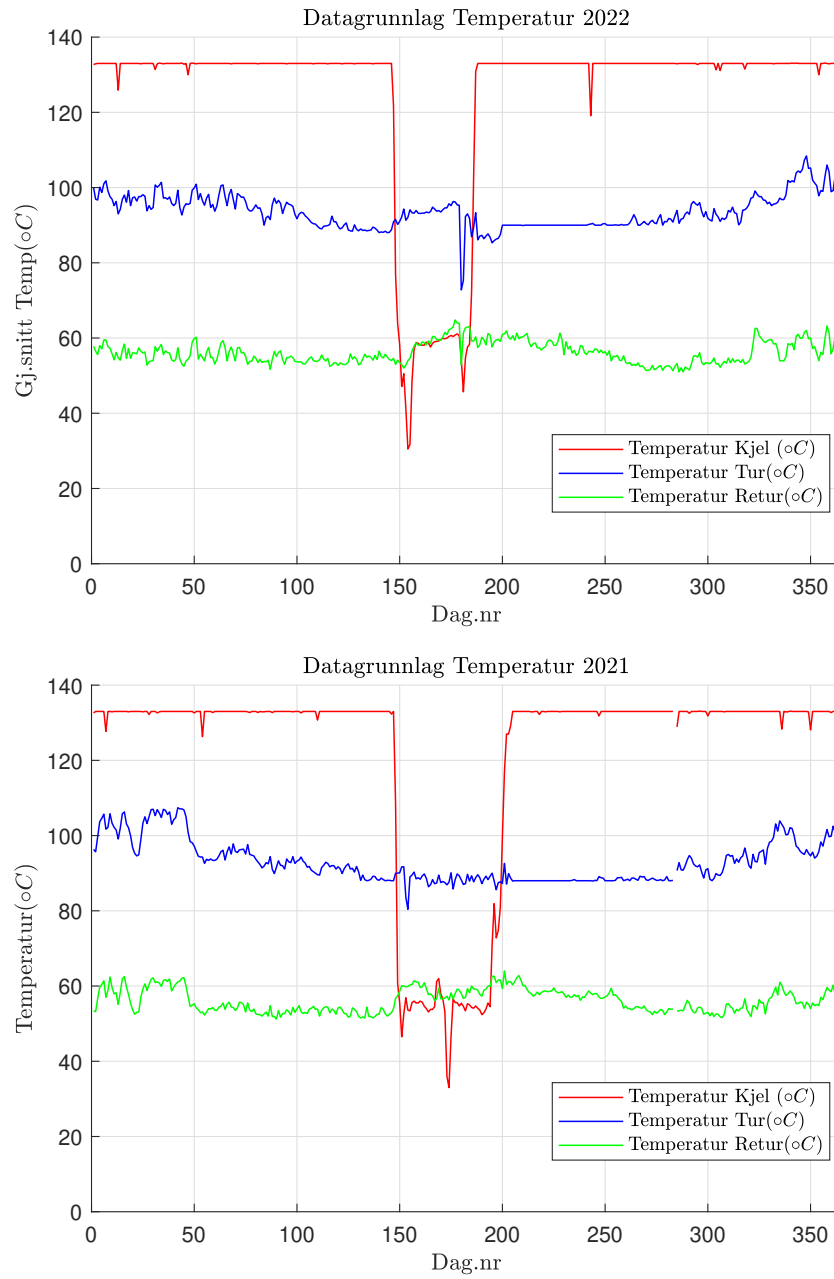
For å behandle og analysere de omfattende datamengdene som ble levert av Eidsiva Bioenergi, ble programvaren Matlab benyttet. Matlab er et velkjent verktøy for numerisk matematikk og kan brukes til å løse en rekke matematiske problemer, inkludert lineære likninger, differensiallikninger, polynomer og integrasjon [18]. Det er også mulig å lage egendefinerte funksjoner for å løse spesifikke oppgaver og forenkle problemløsningen. I denne oppgaven er Matlab hovedsakelig brukt for databehandling, matriseberegninger og plotting av grafiske illustrasjoner.

#### 3.1.2 Datagrunnlag

Datagrunnlaget brukt til simulering er hentet direkte fra systemene til Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik. Datasettene inkluderer temperatur, trykk og massestrøm i fjernvarmenettet og kjelekretsen rundt hovedkjelen, samt effekt i hovedkjelen. Dataen ble levert i Excel-tabeller,

og deretter ble Matlab brukt som et verktøy for å trekke ut relevante vektorer og forbrede dem for bruk i Aspentech HYSYS. Den utleverte dataen er presentert i figurene 3.1, 3.2, 3.3 og 3.4 under, grafene er utformet i Matlab.

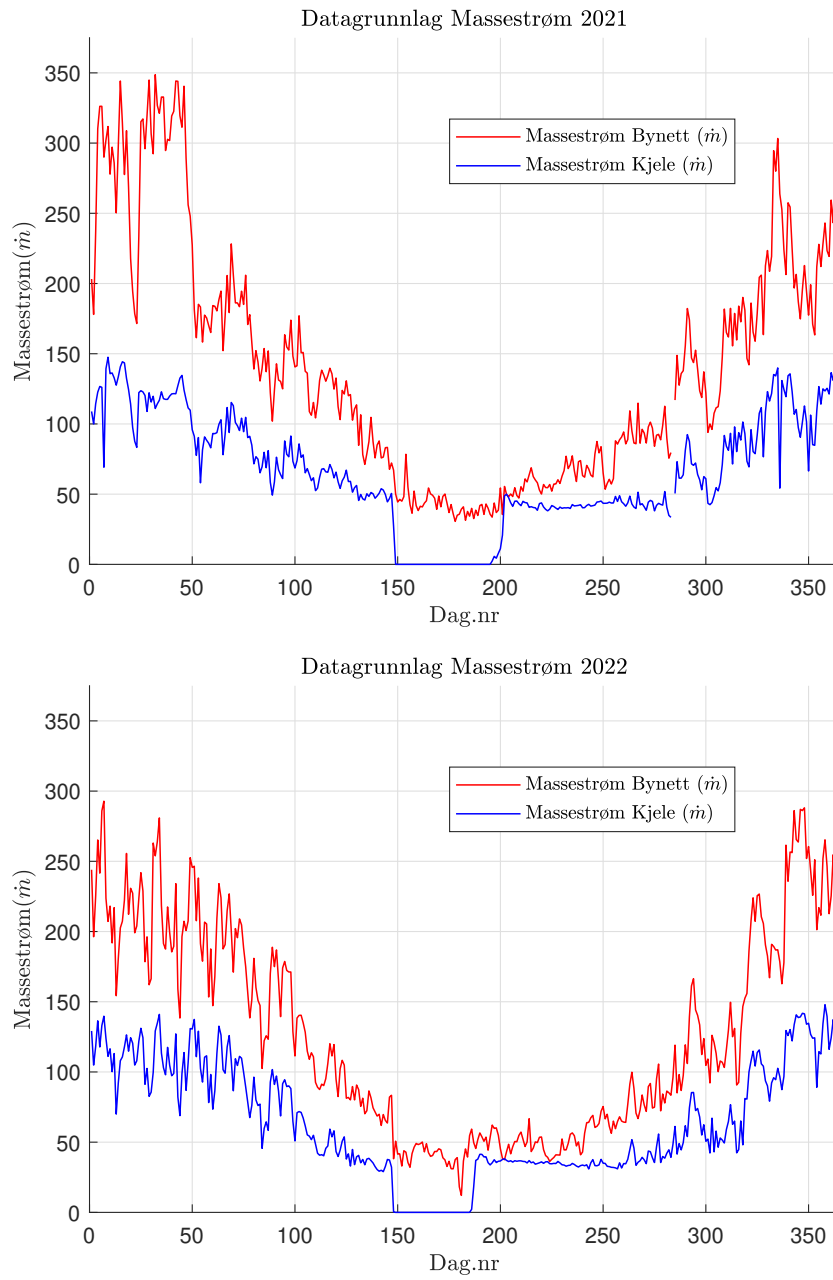
## Datagrunnlag temperatur



Figur 3.1: Datagrunnlag temperatur

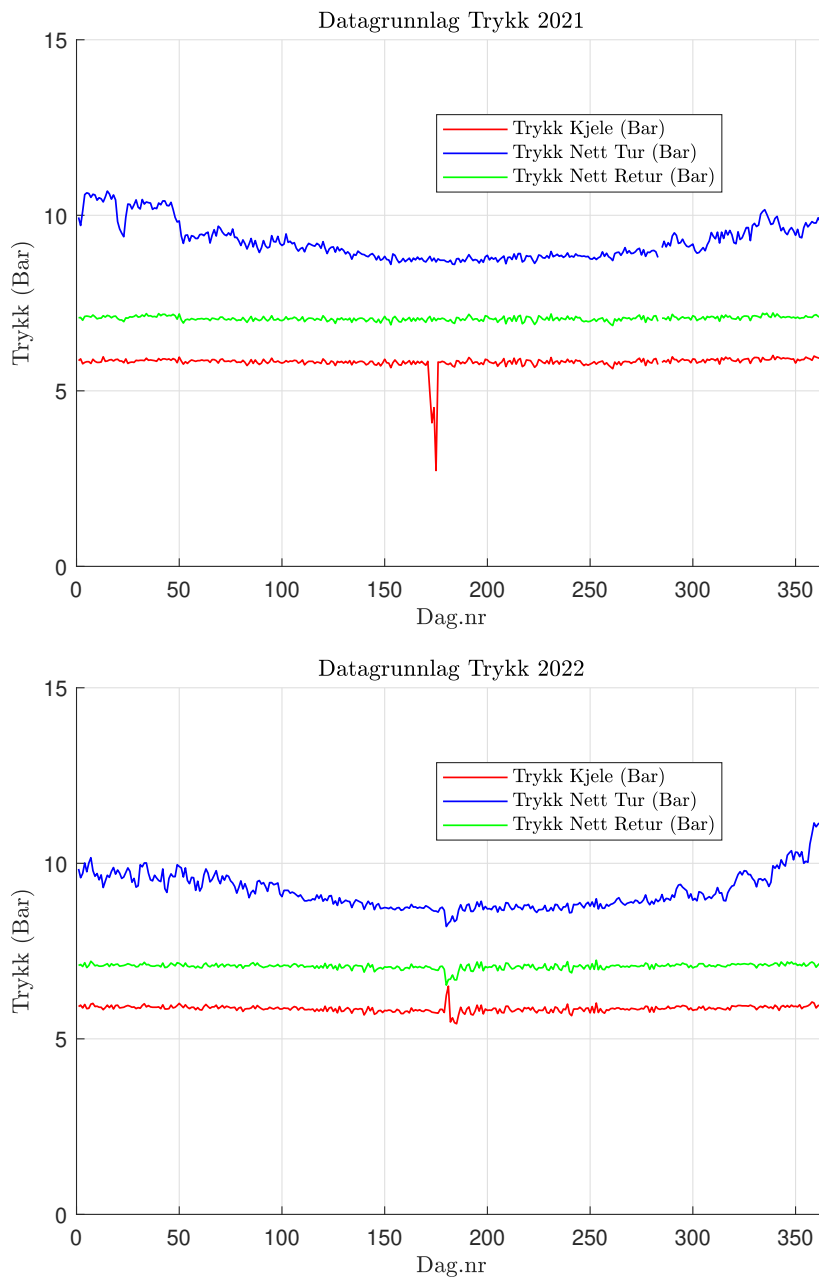


**Datagrunnlag massestrøm**



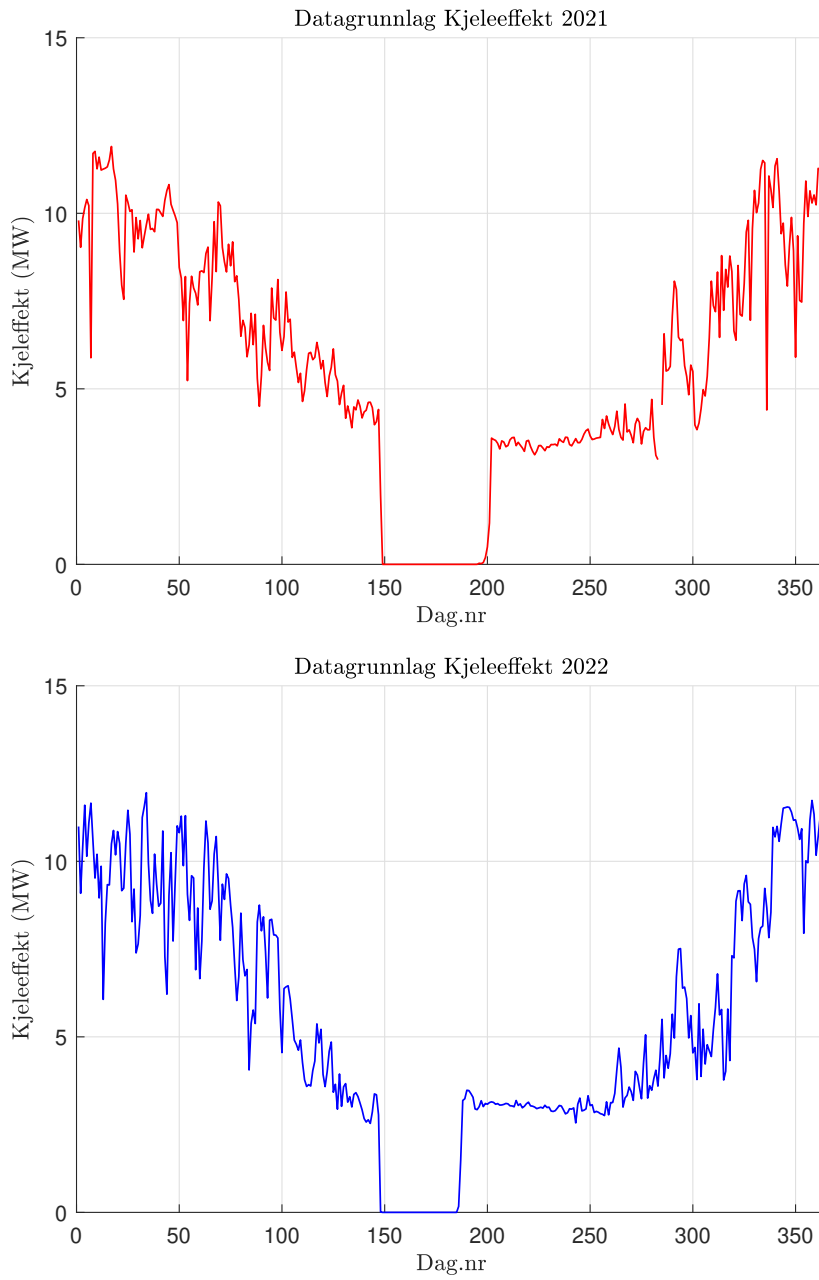
**Figur 3.2:** Datagrunnlag massestrøm

## Datagrunnlag trykk



Figur 3.3: Datagrunnlag trykk

### Datagrunnlag kjeleeffekt



**Figur 3.4:** Datagrunnlag kjeleeffekt

## 3.2 Referansescenarier

For å få et bedre overblikk over driftsbetingelsene til fjernvarmeanlegget over et gjennomsnittlig år, er dataen fordelt i syv forskjellige scenarier som gir et bilde av årstidsvariasjonene. Tabell 3.1 illustrerer fordelingen for året 2021, som strekker seg fra dag 1 (1.januar) til 365 (31.desember).

**Tabell 3.1:** Fordeling av scenarier

Scenario	Beskrivelse	Dag i året	Dager
1	Vinter 1	1 - 50	50
2	Vår	51 - 110	60
3	Forsommer	111 - 148	38
4	Sommer	149 - 195	47
5	Sensommer	196 - 250	55
6	Høst	251 - 319	69
7	Vinter 2	320 - 365	46

Den grafiske fordelingen ble gjort basert på massestrømmen som er presentert i figur 3.2, da denne parameteren har størst innvirkning og variasjon over året. Datasettet fra året 2022 ble ekskludert da sommervedlikeholdet ikke gikk over samme periode, og dette ville ført til komplikasjoner i databehandlingen.

Gjennomsnittverdiene for fjernvarmeanlegget på Gjøvik er presentert i tabell 3.2, og er basert på behandling av data presentert i seksjon 3.1.2. Dette datasettet danner grunnlaget for oppsettet av referansemodellen i Aspentech HYSYS.

**Tabell 3.2:** Referansemodell

	Kjeleffekt	$T_{kjele}$	$T_{tur}$	$T_{retur}$	$\dot{m}_{kjele}$	$\dot{m}_{nett}$	$P_{kjele}$	$P_{tur}$	$P_{retur}$
Benevning	MW	°C	°C	°C	$m^3/h$	$m^3/h$	bar	bar	bar
Vinter 1	10,14	132,95	102,83	58,8	121,03	289,56	5,86	10,26	7,11
Vår	7,31	132,93	93,59	53,58	81,79	159,16	5,84	9,3	7,04
Forsommer	4,98	132,98	90,03	52,95	55,81	104,92	5,81	8,99	7,03
Sommer	0	54,28	88,35	58,75	0	42,71	5,66	8,73	7,04
Sensommer	3,41	132,32	88,18	58,63	41,77	61,38	5,81	8,81	7,04
Høst	5,11	132,91	90,28	54,11	57,43	116,83	5,84	9,08	7,06
Vinter 2	9,62	132,88	97,81	56,6	111,49	214,78	5,91	9,68	7,11

Uteliggere, unormale verdier som stikker seg ut, har blitt fjernet fra de forskjellige scenariene for å få et bedre gjennomsnitt og mer realistiske verdier som reflekterer feilfri drift av anlegget. Det er også valgt å se bort fra oppstarten etter sommervedlikeholdet, da denne perioden trekker ned gjennomsnittsverdiene for sensommer-scenariet. Ved å analysere og

visualisere dataene på denne måten, gir det en bedre illustrasjon og forståelse av variasjoner i driftsbetingelser i løpet av et år. Disse scenariene ble deretter brukt som grunnlag for simuleringer i HYSYS, og anses å danne et mer realistisk bilde av anleggets ytelse under de ulike driftsbetingelser.

### 3.3 HYSYS-modellering

Aspentech HYSYS er en prosess-simuleringsprogramvare som brukes til å modellere og optimalisere kjemiske og termodynamiske prosesser [19]. Programvaren gir mulighet til å designe, simulere og analysere komplekse prosesser ved å bruke en visuell flerfase-modelleringsplattform. I denne oppgaven er AspenTech HYSYS brukt til å simulere ORC-anlegget. Simuleringen gjør det mulig å analysere driften av anlegget under ulike betingelser og optimalisere ytelsen. Dette kapitlet beskriver framgangsmåten brukt for å sette opp de modellene brukt for simulering, basert på de ulike casene.

#### 3.3.1 Case 0: Design-parametere

Ved simulering av et ORC-system i AspenTech HYSYS vil det være nødvendig å sette inn grunn-parametere for at programvaren skal ha et grunnlag for simulasjonene. Ved beregninger av et eksisterende anlegg ville det vært mulig å hente ut data og benytte dette for å optimalisere prosessen, men ved simulering av et fiktiv anlegg er det nødvendig å gjøre antagelser. Basert på driftsverdiene i det eksisterende anlegget til Eidsiva Bioenergi AS på Elverum, samt verdier som kom frem etter prøving og feiling har det blitt satt opp design-parametere som blir benyttet som referansecase i simulasjonene. Design-parametrene som ble benyttet er presentert i tabell 3.3 under.

**Tabell 3.3:** Design-parametere HYSYS modell

Design-parameter	Enhet	Verdi
Virkningsgrad Turbin	$\eta_{turbin}$	0.8
Virkningsgrad Pumpe	$\eta_{pumpe}$	0.75
Temperatur 'Fordamper inn'	°C	70
Trykk 'Fordamper inn'	bar	17
Trykk 'Kondensator ut'	bar	5
Massestrøm	tonne/h	70
Temperaturdifferanse 'Veksler kjel'	$\Delta T$	-25

Det er en del usikkerheter rundt verdiene som er benyttet, og de vil ikke gi et veldig detaljert bilde av faktisk drift av et ORC-system i Gjøvik. Verdiene vil likevel gi et bilde på innvirkningen endringene som blir gjort på modellen har gjennom utførelse av de videre casene, og er bekreftet å være realistiske av veileder hos Eidsiva Bioenergi AS.

### 3.3.2 Arbeidsmedium

Arbeidsmediet som er benyttet i modellen, R1233zd, er laget manuelt i HYSYS da det ikke eksisterer i databanken i programvaren. Her er basis og kritiske verdier til stoffet ført inn basert på informasjon fra Eidsiva Bioenergi AS. Disse verdiene vil ikke representere den faktiske virkningen til stoffet i et reelt anlegg, men er en approksimasjon som vil gi bra nok estimater.

**Tabell 3.4:** Kritiske verdier arbeidsmedium

Egenskaper	Symbol	Verdi
Molekylvekt	$MW$	130,5 g/mol
Normal kokepunkt	$T_b$	18,31 °C
Ideal væsketetthet	$\rho_{liq,id}$	1306 kg/m <sup>3</sup>
Kritisk temperatur	$T_c$	165,5 °C
Kritisk trykk	$P_c$	34,69 bar <sub>g</sub>
Kritisk volum	$V_c$	$2,080 \times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /kg-mol
Asentrisitet	$\omega$	0,3057

### 3.3.3 Tilstandsligning

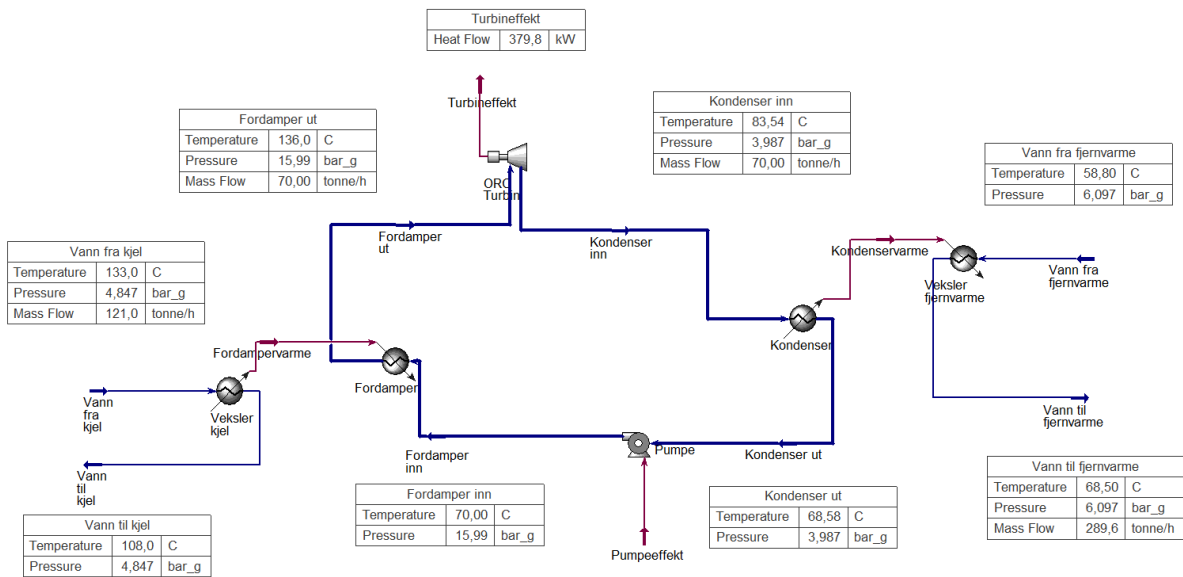
Tilstandsligningen som er blitt benyttet i simulasjonene i HYSYS er Soave-Redlich-Kwong Equation of State (SRK), denne er presentert i formel 3.1 [20].

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b)} \quad (3.1)$$

Denne tilstandsligningen er en modifikasjon av Redlich-Kwong tilstandsligningen fra 1949 og ble modifisert av Giorgio Soave i 1972.

### 3.3.4 Referansemodell

For å analysere og utnytte dataen som ble utlevert fra fjernvarmeanlegget i Gjøvik, presentert i seksjon 3.1.2, ble det nødvendig å utvikle en modell med spesifikke inputmuligheter. Modellen ble utviklet basert på en eksempelmodell utlevert fra veileder i Eidsiva Bioenergi AS. Referansemodellen er presentert i figur 3.5 og den bruker inputvariabler fra Vinter 1-scenariet og designparametrene til Case 0, som er illustrert i tabell 3.3.



Figur 3.5: Referansemodell HYSYS Simulasjon

Design-parametrene fra tabell 3.3 er blitt innsatt ved strømmene 'Fordamper inn' og 'Kondensator ut' samt i turbinen, pumpen og i varmeveksleren 'Veksler kjele'. Disse verdiene setter grunnprinsippene til modellen, og klargjør den for energistrømmene som forekommer når scenarie-verdiene fra tabell 3.2 blir innsatt. Temperatur, trykk og massestrøm for kjelekretsen blir innsatt i strømmen 'Vann fra kjele', og vil i samspill med den innsatte temperaturdifferansen i 'Veksler kjele' definere en varmestrøm som går i strømmen 'Fordampervarme'. Temperatur og trykk fra retur og massestrømmen til nettet blir innsatt i strømmen 'Vann fra fjernvarme', disse verdiene setter grunnlaget for programvaren til å beregne varmestrømmen som vil gå i strømmen 'Kondensator varme'. Når alle disse parameterene er implementert i modellen vil HYSYS kjøre simuleringen ved bruk av de termodynamiske formlene presentert i seksjon 2.2.2.

## 3.4 Caser

Etter simulering av referansescenariene skal det sees videre på metoder for å forbedre oppsettet, og øke effektiviteten til simulasjonene. Det er blitt utarbeidet to caser som vil bli undersøkt i forhold til og sammenlignet med referansecasen Case 0.

### 3.4.1 Case 1: Øke kjeletemperatur

Ved økning av kjeletemperaturen vil det være mulig å hente ut mer energi fra kjelekretsen og overføre det inn til ORC-kretsen igjennom fordamperen. Simulering av denne endringen i modellen vil ikke direkte ha en stor innvirkning, og det vil være nødvendig å endre temperaturdifferansen i 'veksler kjele' i modellen for å gjøre simuleringen realistisk. Denne

endringen av temperaturdifferanse vil være unøyaktig og er mer brukt for å få et omtrentlig overblikk over effekten av endringen i modellen.

De direkte endringene som ble utført i modellen for å få frem resultatene til Case 1 er:

- Justere opp temperaturen på 'vann fra kjel' strømmen fra 133 °C til 153 °C
- Endre  $\Delta T$  i 'Veksler kjel' fra -25 °C til -30 °C

### 3.4.2 Case 2: Senke returtemperatur

Ved senkning av returtemperaturen på fjernvarmenettet vil temperaturen og trykket i ORC-kretsen etter turbinen senkes, dette vil føre til mer effektiv drift av turbinen. HYSYS-modellen tar ikke direkte hensyn til temperaturen i 'vann fra fjernvarme' strømmen, da trykket og temperaturen i kretsen blir definert av parametrene som er satt i tabell 3.3. Det vil da være nødvendig å endre disse parametrene for å simulere endringen som ville skjedd om denne casen ble brukt i praksis.

De direkte endringene som ble utført i modellen for å få frem resultatene til Case 2 er:

- Justere ned temperaturen på 'vann fra fjernvarme' 10 °C fra verdien brukt i Case 0
- Endre trykket satt i 'Kondensator ut' strømmen fra 5 bar til 4,5 bar
- Endre temperaturen satt i 'Fordamper inn' strømmen fra 70 °C til 65 °C

## 3.5 Økonomisk analyse

Den økonomiske analysen består av en investeringskalkyle for prosjektet, med beregning av nedbetalingstid og nåverdi. Analysen bygger på det teoretiske grunnlaget presentert i seksjon 2.3 og inneholder en økonomisk vurdering av lønnsomheten ved å investere i et 355 kW ORC-system. Det vurderes også økonomiske konsekvenser ved å investere i en større turbin, da man i enkelte scenarier overskrider merkeeffekten på 355 kW.

### 3.5.1 Investeringsresultat år 1

Investeringsresultatet for første år for hver case ble beregnet ved å ta hensyn til både inntekter og utgifter knyttet til investeringen. Inntektene inkluderer sparte utgifter på strøm og nettleie, og er basert på en antakelse om en utgift på 1,1 NOK per kWh. Mens utgiftene inkluderer årlige kostnader for service, avskrivninger og renter på lån. For å beregne avskrivningene ble det brukt en lineær avskrivningsmetode over en økonomisk levetid på 20 år. Renter på lån ble beregnet ved å anta en rentesats på 2%.



### 3.5.2 Nåverdi

Nåverdiberegning er beskrevet i seksjon 2.3, og nåverdien for hvert prosjekt beregnes ved hjelp av formel 2.8. Analysen bruker informasjon om netto kontantstrøm for fire ulike caser i det første året, samt en antakelse om en diskonteringsrente på 5% og en årlig inflasjon på 4%. Denne informasjonen ble brukt til å beregne nåverdien av netto kontantstrøm over 20 år for hvert case.

Netto kontantstrøm fra første år for hver case, ble økt med 4% hvert år for å ta hensyn til inflasjonen. Deretter ble hver årlige kontantstrøm diskontert tilbake til nåtiden ved hjelp av diskonteringsrenten på 5%. Til slutt ble alle de diskonterte kontantstrømmene summert opp for å få nåverdien av netto kontantstrøm over 20 år for hver case.

# Kapittel 4

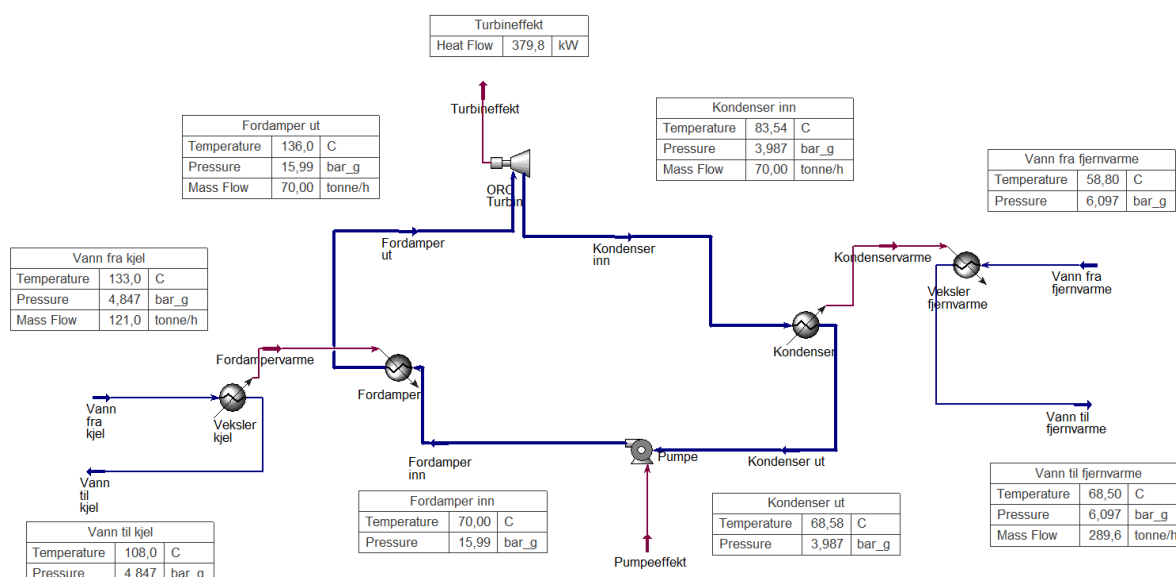
## Resultater

### 4.1 Scenarier

Alle referansescenariene presentert i tabell 3.2 er blitt simulert ved bruk av AspenTech HYSYS, og de ferdige simulasjonene og medfølgende resultater presenteres i denne seksjonen. Modellene fungerer som tidligere forklart i seksjon 3.3.4.

#### Vinter 1

Figur 4.1 presenterer ferdig simulasjon av det første vinter-scenariet på starten av året fra tabell 3.2.



Figur 4.1: Referansmodell Vinter 1

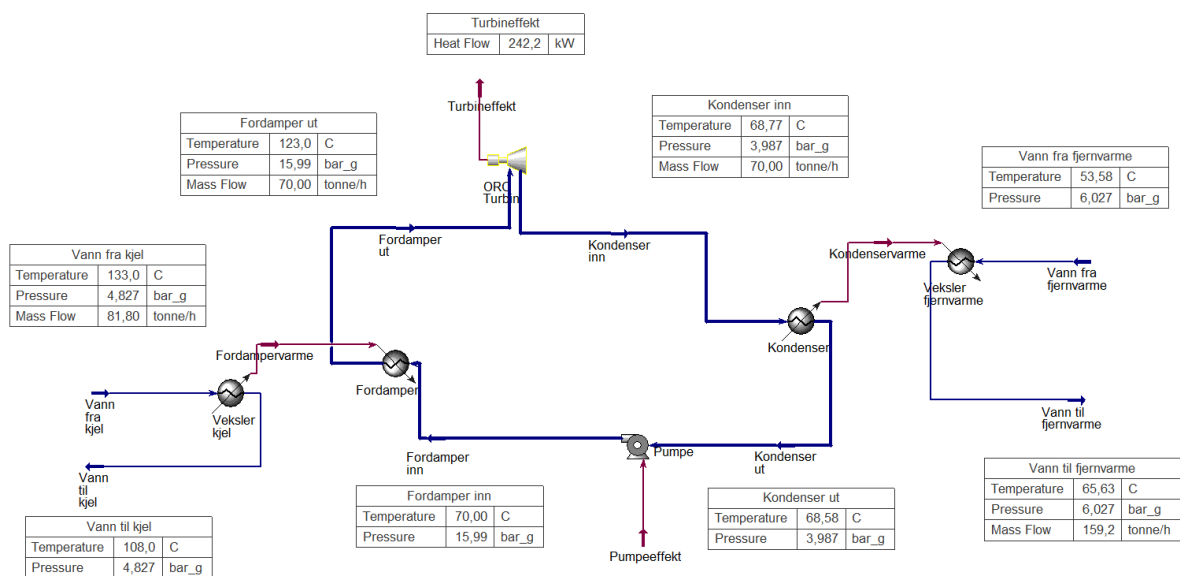
De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.1 under.

**Tabell 4.1: Resultater Vinter 1**

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	3820 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	3467 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	379,8 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	353,15 kW

**Vår**

Figur 4.2 presenterer ferdig simulasjon av vår-scenariet fra tabell 3.2.



**Figur 4.2: Referansemodell Vår**

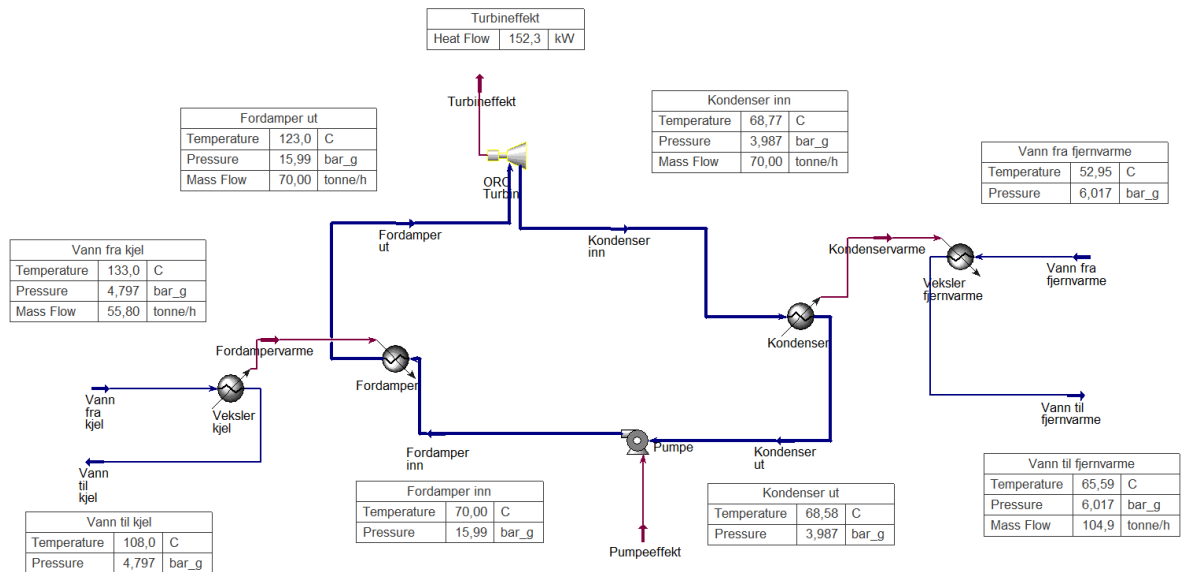
De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.2 under.

**Tabell 4.2: Resultater Vår**

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	2582 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	2367 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	242,2 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	215,55 kW

## Forsommer

Figur 4.3 presenterer ferdig simulasjon av forsommer-scenariet fra tabell 3.2.



**Figur 4.3:** Referansemmodell Forsommer

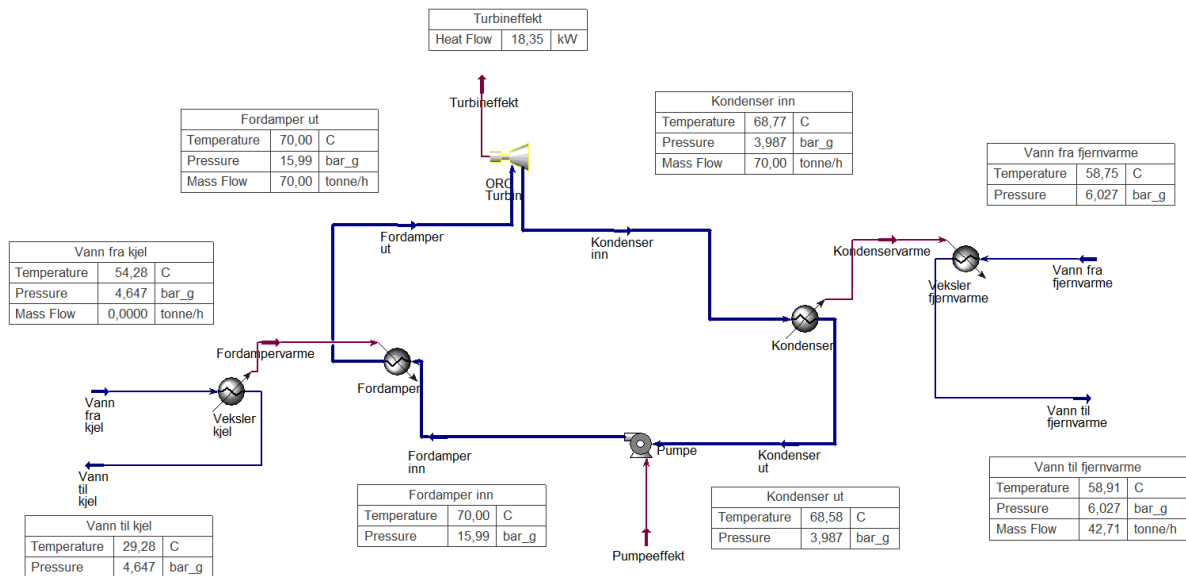
De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.3 under.

**Tabell 4.3:** Resultater Forsommer

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	1762 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	1636 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	152,3 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	125,65 kW

Sommer

Figur 4.4 presenterer ferdig simulasjon av sommer-scenariet fra tabell 3.2.



Figur 4.4: Referansemødel Somer

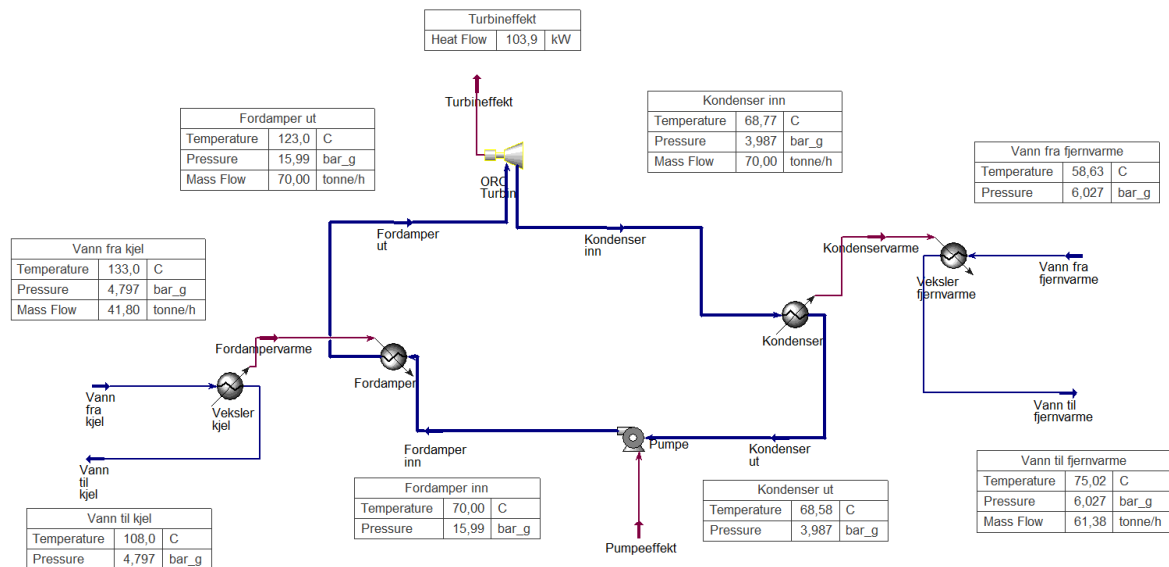
De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.4 under.

Tabell 4.4: Resultater Somer

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	0 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	8,3 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	18,35 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	-8,3 kW

## Sensommer

Figur 4.5 presenterer ferdig simulasjon av sensommer-scenariet fra tabell 3.2.



**Figur 4.5:** Referansemodell Sensommer

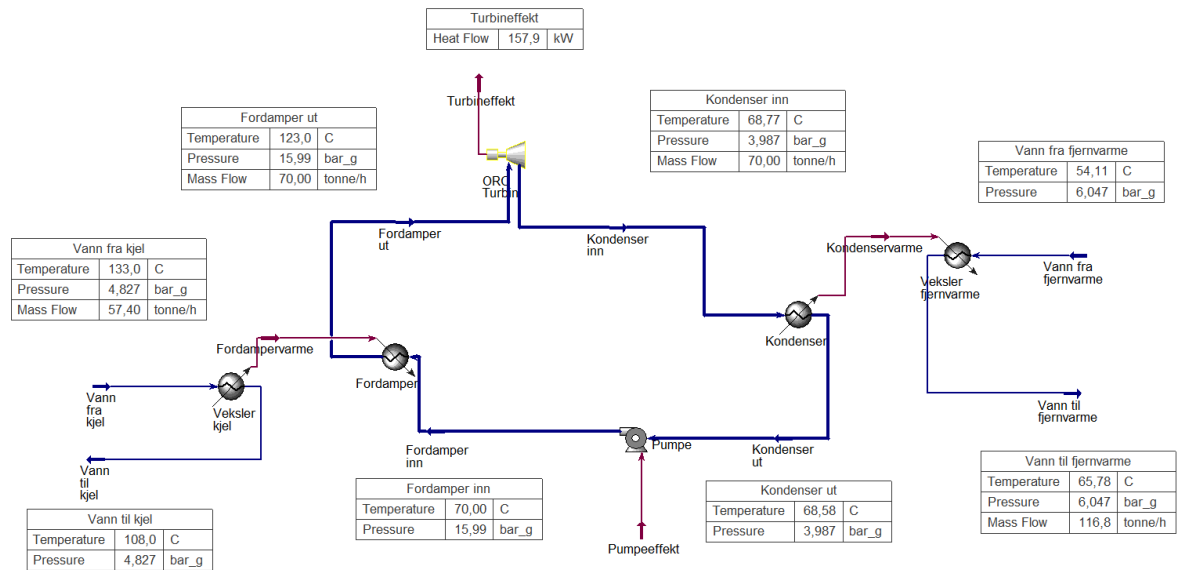
De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.5 under.

**Tabell 4.5:** Resultater Sensommer

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	1320 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	1242 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	103,9 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	77,25 kW

Høst

Figur 4.6 presenterer ferdig simulasjon av høst-scenariet fra tabell 3.2.



Figur 4.6: Referansemodell Høst

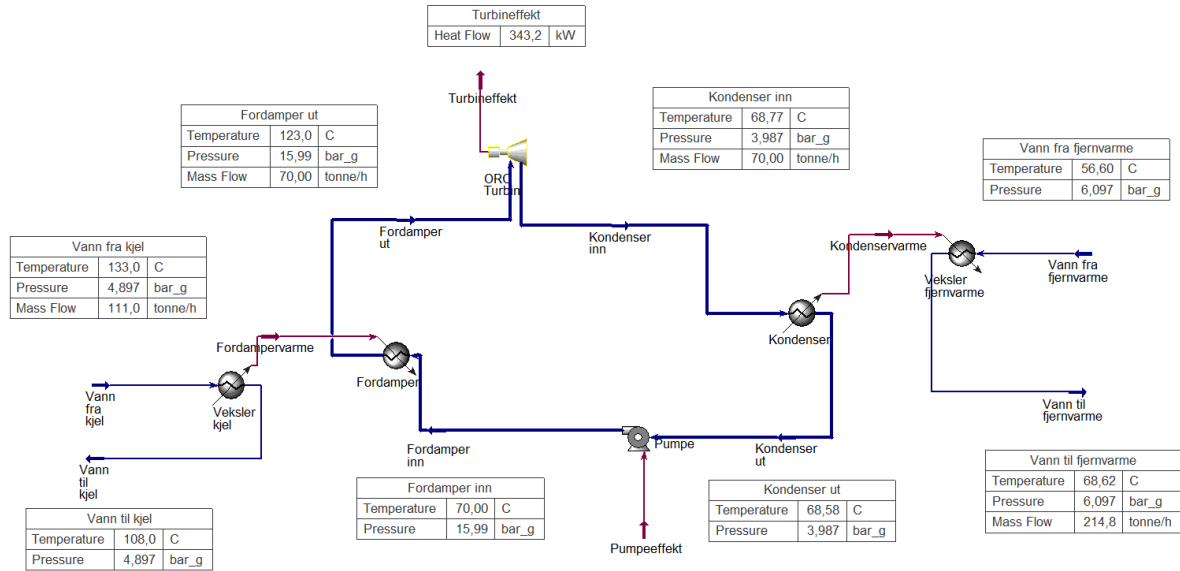
De viktigste resultatene fra figur 4.6 blir videre presentert i tabell 4.6 under.

Tabell 4.6: Resultater Høst

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	1812 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	1681 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	157,9 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	131,25 kW

## Vinter 2

Figur 4.7 presenterer ferdig simulasjon av det andre vinter-scenariet på slutten av året fra tabell 3.2.



Figur 4.7: Referansemødel Vinter 2

De viktigste resultatene blir videre presentert i tabell 4.7 under.

Tabell 4.7: Resultater Vinter 2

Resultat	Symbol	Verdi
Fordampervarme	$Q_{inn}$	3504 kW
Kondensatorvarme	$Q_{ut}$	3188 kW
Turbin effekt	$W_{turbin}$	343,2 kW
Pumpe effekt	$W_{pumpe}$	26,65 kW
Netto effekt	$W_{netto}$	316,55 kW



## 4.2 Caser

Tabell 4.8 viser resultatene for både Case 1 og Case 2 gjennom hele året. For hver case og scenario vises termisk energi inn ( $Q_{inn}$ ), termisk energi ut ( $Q_{ut}$ ), turbinarbeid ( $W_{turbin}$ ), pumpearbeid ( $W_{pumpe}$ ) og netto arbeid ( $W_{netto}$ ). Tabellen gir en oversikt over hvordan termiske energiforhold og arbeidsytelser varierer mellom de to casene og scenariene, og bidrar til å evaluere effektiviteten og ytelsen til ORC-turbinen under forskjellige forhold.

Tabell 4.8: Resultater caser

Case 1	Vinter 1	Vår	Forsommer	Sommer	Sensommer	Høst	Vinter 2
$Q_{inn}$	4642	3138	2141	0	1603	2202	4258
$Q_{ut}$	4205	2862	1973	0	1495	2028	3857
$W_{turbin}$	463,6	303,1	193,8	0	135	200,6	427,4
$W_{pumpe}$	26,65	26,65	26,65	0	26,65	26,65	26,65
$W_{netto}$	436,95	276,45	167,15	0	108,35	173,95	400,75
Case 2	Vinter 1	Vår	Forsommer	Sommer	Sensommer	Høst	Vinter 2
$Q_{inn}$	3820	2582	1762	0	1320	1812	3509
$Q_{ut}$	3448	2357	1632	0	1242	1677	3170
$W_{turbin}$	399,5	253,3	156,8	0	104,3	162,8	361,5
$W_{pumpe}$	27,42	27,42	27,42	0	27,42	27,42	27,42
$W_{netto}$	372,08	225,88	124,38	0	76,88	135,38	334,08

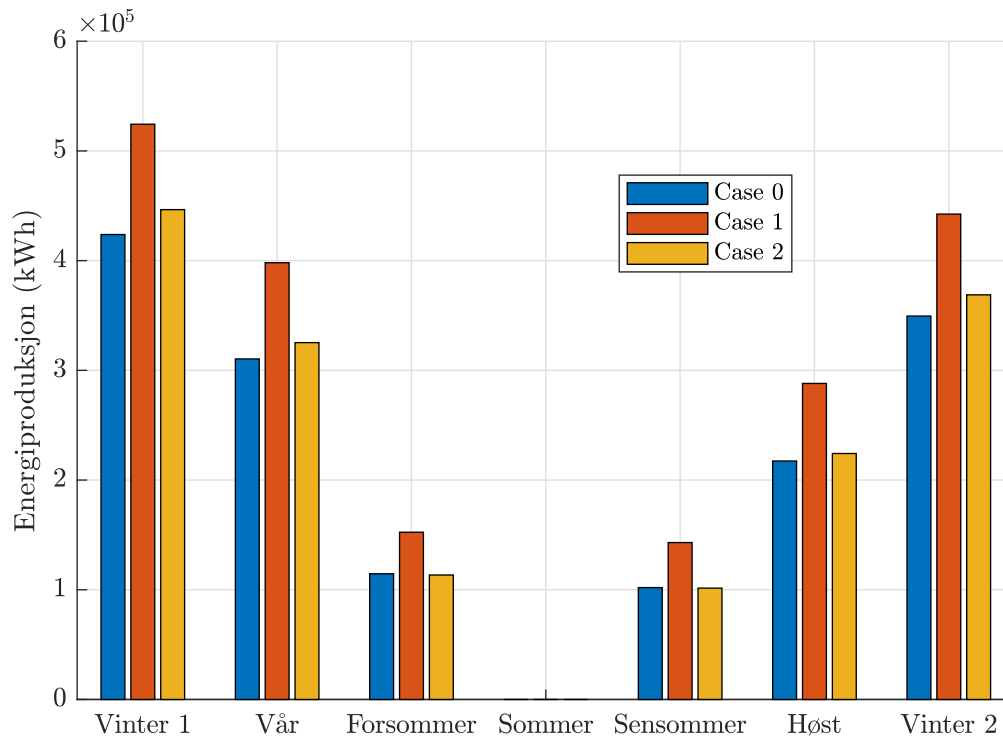
Tabell 4.9 viser turbin-effektene for hver case i de forskjellige scenariene. Tabellen gir en sammenligning av turbin-effektene mellom de ulike casene, og gir en indikasjon på hvilken case som gir best turbin-effekt under de ulike scenariene. Dette er nyttig for å vurdere den generelle ytelsen til ORC-turbinen og bidrar til å identifisere når man overstiger merkeffekt på 355kW og dermed muliggjør ekstra produksjon.

Tabell 4.9: Turbineffekter

	Case 0	Case 1	Case 2
<b>Vinter 1</b>	379,8 kW	463,6 kW	399,5 kW
<b>Vår</b>	242,2 kW	303,1 kW	253,3 kW
<b>Forsommer</b>	152,3 kW	193,8 kW	156,8 kW
<b>Sommer</b>	0 kW	0 kW	0 kW
<b>Sensommer</b>	103,9 kW	135 kW	104,3 kW
<b>Høst</b>	157,9 kW	200,6 kW	162,8 kW
<b>Vinter 2</b>	343,2 kW	427,4 kW	361,5 kW

### 4.3 Energiproduksjon

En estimert energiproduksjon for hvert case for de ulike scenarier vises i Figur 4.8. Diagrammet illustrerer hvordan energiproduksjonen varierer mellom de tre casene i løpet av forskjellige perioder gjennom året. Denne figuren gir en visuell sammenligning av energiproduksjonen og hjelper til med å evaluere konsekvensen og effektiviteten av de ulike casene.



Figur 4.8: Estimert produksjon

Tabell 4.10 presenterer de numeriske verdiene for energiproduksjonen i hvert scenario for de tre casene. Tallene i tabellen gir en mer detaljert oversikt over energiproduksjonen og gir en kvantitativ sammenligning mellom de ulike casene.

Tabell 4.10: Energiproduksjon

	Case 0	Case 1	Case 2
<b>Vinter 1</b>	423780 kWh	524340 kWh	446496 kWh
<b>Vår</b>	310392 kWh	398088 kWh	325267,2 kWh
<b>Forsommer</b>	114592,8 kWh	152440,8 kWh	113434,56 kWh
<b>Sommer</b>	0 kWh	0 kWh	0 kWh
<b>Sensommer</b>	101970 kWh	143022 kWh	101481,6 kWh
<b>Høst</b>	217350 kWh	288061,2 kWh	224189,28 kWh
<b>Vinter 2</b>	349471,2 kWh	442428 kWh	368824,32 kWh
<b>Total</b>	<b>1517556 kWh</b>	<b>1948380 kWh</b>	<b>1579692,96 kWh</b>

## 4.4 Økonomi

I dette kapittelet presenteres de økonomiske resultatene fra analysen av investeringen i et ORC-system. Resultatene inkluderer beregning av tilbakebetalingstid og nåverdi for de tre ulike casene, og inkluderer i tillegg en investering i en større turbin. De økonomiske resultatene bygger tallene presentert i tabell 4.11 og basert på resultatene fra simulering presentert i seksjon 4.3, og gir en vurdering av lønnsomheten ved å investere i et ORC-system.

### 4.4.1 Tilbakebetalingstid

Tilbakebetalingstiden til prosjektets investering er presentert i tabell 4.11. Og viser resultatene for Payback på 355kW ORC-investeringen for de tre ulike casene, og inkluderer en alternativ investering i en større 455kW turbin. Payback er beregnet med tilbakebetalingsmetoden som tidligere etablert i seksjon 2.3, og viser tiden det tar for besparelsene å bli like store som investeringskostnadene, og investeringen dermed blir lønnsom.

**Tabell 4.11:** Tilbakebetalingstid ORC

Beskrivelse	Case 0	Case 1	Case 1 <sub>455 kW</sub>	Case 2
Total produksjon [kWh/år]	1 517 552	1 799 532	1 948 380	1 579 693
Besparelse eget forbruk [kWh/år]	1 517 522	1 799 532	1 948 380	1 579 693
Investeringskostnad [NOK]	8 150 000	8 150 000	10 150 000	8 150 000
Installasjonskostnad [NOK]	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
Vedlikeholdskonstad [NOK/år]	115 000	115 000	115 000	115 000
Besparelse strøm [NOK/år]	1 669 307	1 979 485	2 143 218	1 737 662
Besparelse nettleie [NOK/år]	140 288	165 660	179 978	145 988
Sum besparelse [NOK/år]	1 694 595	2 030 145	2 208 196	1 768 650
Økonomisk levetid [år]	20	20	20	20
<b>Payback ORC [år]</b>	<b>5,4</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>5,2</b>

### 4.4.2 Investeringsresultat år 1

Investeringsresultatet etter første år for de ulike casene, presenteres i tabell 4.12. Resultatene inkluderer årlig generert netto kontantstrøm i form av sparte utgifter på strøm og nettleie, samt årlige kostnader for service, avskrivninger og renter på lån. Som ble detaljert beskrevet i seksjon 3.5.1.

Som det fremgår av tabellen 4.12, er netto generert kontantstrøm for første år høyest for Case 1<sub>455 kW</sub>, mens den er lavest for Case 0.

**Tabell 4.12:** Investeringsgrunnlag år 1

Beskrivelse	Case 0	Case 1	Case 1 <sub>455 kW</sub>	Case 2
Spart strøm og nettleie [NOK]	1 809 595	2 145 145	2 323 196	1 883 650
Årlige kostnader service [NOK]	-115 000	-115 000	-115 000	-115 000
Avskrivning [NOK]	-457 500	-457 500	-557 500	- 457 500
Rente på lån [NOK]	-183 000	-183 000	-223 000	-183 000
Kontantstrøm år 1 [NOK]	1 171 992	1 572 645	1 650 696	1 311 150
<b>Netto kontantstrøm [NOK]</b>	<b>988 992</b>	<b>1 389 645</b>	<b>1 427 696</b>	<b>1 128 150</b>

#### 4.4.3 Nåverdi

Tabell 4.13 viser nåverdien basert på netto kontantstrøm over 20 år for de fire ulike casene, beregnet med en diskonteringsrente på 5% og en årlig inflasjon på 4%. Resultatene ble beregnet ved hjelp av formel 2.8, og ble nøyere beskrevet i seksjon 3.5.

**Tabell 4.13:** Resultat nåverdiberegning

Beskrivelse	Case 0	Case 1	Case 1 <sub>455 kW</sub>	Case 2
<b>Netto nåverdi [NOK]</b>	<b>14 042 000 NOK</b>	<b>19 736 000 NOK</b>	<b>20 247 000 NOK</b>	<b>16 002 000 NOK</b>

Resultatene viser at Case 1<sub>455 kW</sub> har den høyeste nåverdien på 20 247 000 NOK, mens Case 0 har den laveste nåverdien på 14 042 000 NOK.

# Kapittel 5

## Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene til simulering av modellen, funnene i den økonomiske analysen, de ulike scenariene og casene som er presentert. Begrensninger og forslag til videre arbeid vil også bli diskutert.

### 5.1 Modellens begrensninger

Modellen er satt opp for å optimalisere mot maksimal effekt, men i virkeligheten vil anlegget sjelden operere ved maksimal effekt eller høy belastning. Det kan derfor være mer hensiktsmessig å optimalisere for lavere belastninger for å hente ut mer energi. Dette kan være et potensielt område for videre arbeid.

Det er også viktig å merke seg at modellen er basert på data fra kun ett år (2021) og dermed ikke tar høyde for mulige variasjoner i ytterligere år.

Den økonomiske modellen er som beskrevet i seksjon 3.5.1 er basert på en antakelse om konstant strømpris. Det kan tenkes at det burde vært en dynamisk prognose for å få dette mer realistisk, men da det er umulig å spå framtidige kraftpriser ble det her gjort en forenkling. Dette gir likevel en tydelig indikasjon på effekten av en slik investering basert på dagens situasjon.

### 5.2 Scenarier

Simulering av referansecasen, Case 0, viser at prosjektet har et betydelig potensial for energi-produksjon, spesielt i vinter- og vårsesongene. Imidlertid er det viktig å understreke at data-settene som er benyttet i simulasjonen er grove gjennomsnittsverdier som ikke tar hensyn til de daglige variasjonene som lett kan sees i figurene 3.1, 3.2, 3.3, og 3.4. Disse figurene er også gjennomsnittsverdier fordelt over dager, og den faktiske driften vil ha enda større variasjoner.

Det vil også være utfordrende å utnytte det fulle potensialet til et ORC-system ved optimale betingelser, som vil være når fjernvarmeanlegget driftes for fullt. Å forsyne fjernvarmekretsen med energi er første prioritet, og det vil være nødvendig å redusere mengden energi som blir tilført ORC-kretsen. Med disse hensynene bør resultatene i seksjon 4.1 tas med en klype salt, men de gir likevel et godt grunnlag for videre innsikt i modellens drift.

### 5.3 Caser

Resultatene fra simulering av referansecasen viser at drift av ORC vil være mulig med dagens fjernvarmeanlegg i Gjøvik. For å oppnå mer effektiv drift og hente ut mer energi ved hjelp av ORC-systemet, vil det imidlertid være nødvendig å vurdere mulige endringer i driftsbetingelsene for fjernvarme- og kjelekretsen.

Case 1 og 2, presentert i seksjon 3.4, innebærer endringer i driftsparametrene til varmeanlegget. Figur 4.8 og tabell 4.10 viser at både Case 1 og Case 2 har en positiv innvirkning på modellen som helhet. Case 1 øker den potensielle effekten betydelig i alle scenariene, mens Case 2 skalerer med energien som tilføres.

#### Case 1

Effekten av Case 1 er tydelig, det fremgår av tabell 4.9 at turbineffekten øker med mellom 20-30% sammenlignet med referansecasen. Dette er en betydelig økning som bidrar til en vesentlig større energiproduksjon, som vist i tabell 4.10.

Endringene som vil bli gjort i fjernvarmeanlegget ved implementering av Case 1 er relativt enkle i modellen, der det kun økes temperaturen i kjelekretsen. I faktisk drift vil dette være litt vanskeligere å implementere, siden kjelekretsen er direkte koblet sammen med fjernvarmekretsen. For å øke temperaturen til samme grad som gjort i simuleringen, vil det være nødvendig å øke trykket for at vannet ikke skal begynne å koke. Dette kan imidlertid by på problemer i fjernvarmekretsen hvis rørsystemet ikke kan håndtere det økte trykket.

#### Case 2

Case 2 viser også en forbedring i energiproduksjonen sammenlignet med referansecasen. Selv om effektøkningen ikke er så markant som i Case 1, gir det fortsatt en forbedring i modellens ytelse. Denne casen gir gode resultater i scenariene med høy energi, men den økte pumpe-effekten case-endingene medfører gjør at det blir en nedgang i netto-effekt i sommerscenariene.

### 5.3.1 Samlet effekt og mulige ulemper

Case 1 klarer å stå for seg selv da den gir en direkte økning av effekt, men Case 2 vil ha en mer markant effekt på simulasjonen hvis den implementeres sammen med Case 1. Som tidligere nevnt øker Case 2 sin effekt basert på grunneffekten, så ved å øke grunneffekten med Case 1 vil Case 2 være mer 'nyttig'.

Både Case 1 og Case 2 gir forbedringer i modellens ytelse og energiproduksjon, men det er viktig å ta hensyn til mulige ulemper og utfordringer ved å implementere disse endringene i praksis. For eksempel, som nevnt tidligere, kan økningen i trykket i fjernvarmekretsen for Case 1 føre til problemer hvis rørsystemet ikke kan håndtere det økte trykket. Senkning av returtemperaturen i fjernvarmeanlegget vil og være utfordrende å implementere, da dette krever effektivisering av varmeoverføringen i kundesentralene ute i fjernvarmenettet og videre energieffektivisering som er utenfor kontrollen til Eidsiva Bioenergi AS.

#### Endring av Case-parametre

Design-parametrene som ble endret for å undersøke effektiviteten til casene ble endret ganske konservativt, men de kunne blitt endret mer og fremdeles vært realistiske. Dette ville ført til mer markante endringer, men ved utførelsen av oppgaven så var det mer hensiktsmessig å se hva slags effekt endringene hadde motfor størrelsen av endringene. Men ved videre arbeid med denne problemstillingen så kunne det vært hensiktsmessig å brukt disse større endringene i casene for å finne den optimale kombinasjonen av driftsbetingelser for å maksimere energiproduksjonen.

## 5.4 Økonomi

Investeringer i ORC-turbiner kan være en utfordrende beslutning for en virksomhet. I denne analysen vurderes to ulike investeringsalternativer med ulik turbin størrelse og investeringskostnader. Målet er å undersøke om det er økonomisk fordelaktig å velge en 455 kW turbin fremfor en 355 kW turbin, til tross for høyere investeringsbehov. Dette vurderes ut fra resultatene presentert i seksjon 4.4, årlige genererte netto kontantstrømmer, tilbakebetalingstiden, og nåverdien av netto kontantstrøm over 20 år.

### 5.4.1 Økonomiske resultater

Tilbakebetalingstiden for hver investering varierer som vi ser i tabell 4.11, fra 4,5 til 5,4 år. Case 1 har kortest tilbakebetalingstid på 4,5 år, mens Case 1<sub>455 kW</sub> har en tilbakebetalingstid

på 5 år. Selv om det tar noe lengre tid før Case 1<sub>455 kW</sub> går i null sammenlignet med Case 1, er det likevel viktig å ta med i vurderingen hele prosjektets levetid.

Som vi ser i tabell 4.12 vil netto kontantstrøm etter første år være lavest ved Case 0 og Case 1 og 2 viser høyere lønnsomhet, men videre kommer det frem at investering i en 455 kW gir den beste kontantstrømmen. Siden netto kontantstrømmen er høyere for alternativet med større turbin på 455 kW, taler dette i favør for at denne investeringen i dette tilfellet vil være mer lønnsom på lang sikt. Til tross for at Case 1 med 355kW turbin har kortere nedbetalingstid og blir lønnsom raskere.

Tabell 4.13 presenterer nåverdien på investeringen over 20 år for de fire ulike casene. Her kommer det fram at Case 1<sub>455 kW</sub> gir den høyeste nåverdien, mens Case 0 har den laveste nåverdien, dette gir enda en tydelig indikasjon på at Case 1<sub>455 kW</sub> kan være den mest lønnsomme langsiktige investeringen blant de fire casene.

Selv om det indikeres at investeringen i en større 455 kW turbin kan være bedre enn i en 355 kW turbin, gir det også grunnlag for å drøfte rundt en forventet økning i kostander ved å øke størrelse på turbin, eller ved ytterligere økning av investeringskostnader eller installasjonskostnader. Investeringen på 355 kW kan likevel vurderes til å være et gunstig alternativ, da Case 1 ikke vil kreve ytterligere investeringskostnader i forbindelse med større turbin, men fremdeles resulterte i en betydelig økning av turbineffekt og energiproduksjon. Likevel er det viktig å merke seg at denne tilnærmingen kan tenkes å medføre tekniske utfordringer. Økt temperatur kan føre til økt trykk i fjernvarmekretsen og rørsystemet, noe som kan kreve ytterligere investeringer i forsterkning av infrastrukturen og oppgradering av sikkerhetssystemer. Derfor må man veie fordelene ved økt energiproduksjon mot de potensielle utfordringene og kostnadene ved å implementere denne løsningen. På den annen side vil en forventet økning i strømprisen være til fordel for investeringen på 455 kW, resultatene viser at en økning i strømprisen kan ha betydelig innvirkning på lønnsomheten og resultatene til ORC-anlegget. Da en økt strømpris vil føre til høyere inntekter fra salg av den produserte elektrisiteten, og investeringen med høyere effekt vil kunne dra nytte av dette ved å generere mer produksjon og dermed økte inntekter.

### **Andre relevante faktorer**

Det er imidlertid viktig å ta hensyn til andre relevante faktorer når man vurderer investering i ORC-turbiner. For eksempel kan konkrete installasjons- og vedlikeholdskostnader spesifisert til turbinstørrelse spille inn i beslutningen. Det kan også være relevant å vurdere andre økonomiske indikatorer som internrente og lønnsomhetsindeks.

En annen faktor som kan påvirke inntjeningen fra ORC-systemet er usikkerheten rundt strømpriser. Strømprisene kan variere over tid, og det kan være vanskelig å spå hvordan



de vil utvikle seg i fremtiden. Dette vil påvirke inntjeningen fra ORC-turbinene og bør tas hensyn til i beslutningsprosessen.

## 5.5 Bærekraftperspektiver

Resultatene fra denne studien understreker relevansen av ORC-systemet i forhold til bærekraftig ingeniørfag og FNs bærekraftsmål. ORC-teknologien er identifisert som potensielt effektiv metode for utnyttelse av lavverdig varme, som ellers er et ubrukt biprodukt fra forskjellige industrielle prosesser, og konvertere det til elektrisk energi. Denne teknologien kan og utnyttes ved andre instaser enn fjernvarme, og videre utvikling og investering kan lette på kravet til elektrisk energi og er en mulig løsning for energikrisa som er et stort tema nå.

Med hensyn til FNs bærekraftsmål, er ORC-teknologien direkte relevant for målet om «Ren energi for alle» og målet om å «Stoppe klimaendringene». Ved å utnytte varmen i fjernvarmenettet, kan ORC-systemet produsere ren energi og dermed redusere karbonutslipp, selv i Norge da man til tider importerer kullkraft. Dette er i tråd med ideen om bærekraftig ingeniørfag, og handler om å utvikle løsninger som både er økonomisk levedyktige og miljømessig ansvarlige. Det innebærer og å balansere tekniske og økonomiske faktorer med miljømessige og sosiale konsekvenser, og å være forberedt på å justere praksis etter hvert som teknologier og samfunnsmessige verdier utvikler seg.

Derfor understreker denne studien viktigheten av bærekraftig ingeniørfag som et kontinuerlig engasjement istedenfor en enkeltstående løsning. Fremtidig forskning bør fokusere på utvikling av mer effektive og kostnadseffektive ORC-teknologier, samt på studier av deres sosioøkonomiske og miljømessige innvirkninger.

# Kapittel 6

## Konklusjon

Formålet med oppgaven er å definere optimale prosessbetingelser for et ORC-system implementert i fjernvarmeanlegget til Eidsiva Bioenergi AS i Gjøvik. Dette ble gjort for å belyse den mest optimale løsningen både driftsmessig og økonomisk.

Studien viser at det er et potensial for å forbedre energiproduksjonen og effektiviteten til ORC-turbinen, ved å justere driftsbetingelsene i fjernvarmeanlegget. Gjennom utførelse av simulasjon og analyse av de forskjellige scenariene i referansecasen, Case 1 hvor kjeletemperaturen ble økt og Case 2 hvor returtemperaturen ble senket, kommer det frem at ORC-systemet vil være en fornuftig investering, både ved et økonomisk og bærekraftig perspektiv. Kun sett på referansecase analysen vises en meget høy lønnsomhet, og videre implementering av endringene til casene økes denne lønnsomheten. Samtidig vil bruken av denne rene energien være et positivt bidrag i kampen mot den stigende energikrisen.

Økonomisk analyse viser at investering i en 455 kW ORC-turbin kan være mer lønnsom på lang sikt enn en 355 kW turbin, selv om den krever høyere investeringer. Tilbakebetalings-tiden var lavest for Case 1 med 355 kW turbin og denne casen vil bli lønnsom fortest, men for å få maksimal avkastning på investeringen så lønner det seg med 455 kW turbin.

Imidlertid vil implementering av casene i praksis kunne innebære utfordringer, Case 1 vil kreve store endringer i anlegget lokalt hos Eidsiva Bioenergi AS, mens Case 2 krever bedre effektivisering av kundesentralene ute i fjernvarmenettet og mer energieffektivitet som Eidsiva Bioenergi AS ikke kan kontrollere direkte.

Usikkerhet rundt strømpriser og andre økonomiske faktorer som installasjons- og vedlikeholdskostnader bør tas i betraktning ved beslutning om investering i ORC-turbiner. Det anbefales å utføre ytterligere analyser og vurderinger for å få et mer helhetlig bilde av lønnsomheten og risikoene forbundet med investeringen. I fremtidig arbeid kan det være hensiktsmessig å undersøke alternative driftsstrategier og teknologiske løsninger for å optimalisere

ORC-systemets ytelse under varierende belastning. Videre kan det være nyttig å undersøke effekten av ulike klimascenarier og endringer i energimarkedet på ORC-systemets lønnsomhet og drift.

Denne oppgaven bekrefter potensialet til ORC-teknologi som et levedyktig bidrag i å takle energiutfordringer på lokalt og globalt nivå. Med riktig implementering kan ORC-systemer være kostnadseffektive, bærekraftige løsninger for energiproduksjon, noe som er avgjørende i den aktuelle energikrisen. Studien belyser hvordan slike teknologier kan bidra til FNs bærekraftsmål ved å fremme fornybare energikilder og effektiv energibruk. Selv med lokale utfordringer knyttet til implementering, fremhever oppgavens resultater behovet for kontinuerlig forskning og innovasjon i ORC-teknologi og andre bærekraftige energiløsninger

# Litteraturliste

- [1] Energikommisjonen. «Mer av alt - raskere.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/pdfs/nou202320230003000dddpdfs.pdf> (sjekket 28.03.2023).
- [2] Robert Goodland, «Environmentally sustainable economic development: building on Brundtland,» 1991. Tilgjengelig: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000089105> (sjekket 17.05.2023).
- [3] United Nations. «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.» (2015), Tilgjengelig: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (sjekket 17.05.2023).
- [4] Forente nasjoner. «FNs bærekraftsmål.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 17.04.2023).
- [5] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, «Progress in electrical energy storage system: A critical review,» *Progress in Natural Science*, 2009. Tilgjengelig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1002007108003548> (sjekket 20.05.2023).
- [6] James R. Mihelcic, John C. Crittenden, Martin J. Small, David R. Shonnard, David R. Hokanson, Qiong Zhang, Hui Chen, Susan A. Sorby, James V. James, Pedro J. J. Alvarez, and Daniel A., «Sustainability Science and Engineering: The Emergence of a New Metadiscipline,» *Environmental Science & Technology*, 2003. Tilgjengelig: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es034605h> (sjekket 20.05.2023).
- [7] Norsk Fjernvarme. «Fjernvarme.» (2023), Tilgjengelig: <https://fjernvarme.no> (sjekket 12.04.2023).
- [8] Norsk Fjernvarme. «Fjernkontrollen.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.fjernkontrollen.no/> (sjekket 13.04.2023).
- [9] Eidsiva Bioenergi AS. «Eidsiva Bioenergi, Anlegg på Gjøvik.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.eidsivabioenergi.no/om-oss/vare-lokasjoner/gjovik/> (sjekket 17.04.2023).
- [10] Eidsiva Bioenergi AS, *Utlevert data og informasjon fra oppdragsgiver*, 2023.

- [11] Norsk Fjernvarme. «Fjernkontrollen Gjøvik.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.fjernkontrollen.no/gjovik/> (sjekket 13.04.2023).
- [12] Kirtipal A. Barse, Michael D. Mann, *Kirtipal A. Barse, Michael D. Mann, Maximizing ORC performance with optimal match of working fluid with system design*, 2016, Pages 11-19: Tilgjengelig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116301405>.
- [13] Hofstad, Knut. «Rankine-syklus i Store norske leksikon.» (2023), Tilgjengelig: <https://snl.no/Rankine-syklus> (sjekket 11.04.2023).
- [14] Kirtipal A. Barse, Michael D. Mann, «Kirtipal A. Barse, Michael D. Mann, Maximizing ORC performance with optimal match of working fluid with system design,» 2016. Tilgjengelig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116301405> (sjekket 29.03.2023).
- [15] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B, *Principles of Engineering Thermodynamics – SI version*. kap 8.2: Wiley, 2017.
- [16] JOHN JAGERSON. «What Is the Formula for Calculating Net Present Value (NPV)?» (2023), Tilgjengelig: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp> (sjekket 09.05.2023).
- [17] JOHN JAGERSON. «Payback Period Explained, With the Formula and How to Calculate It.» (2023), Tilgjengelig: <https://www.investopedia.com/terms/p/paybackperiod.asp%20=%20%7B2023-05-09%7D,.>
- [18] Tom Heine; Sæbjørnsen. «Matlab.» (2023), Tilgjengelig: <https://snl.no/MATLAB.%20=%20%7B2023-05-11%7D,%20urldate%20=%20%7B2023-04-17%7D,.>
- [19] HYSYS. «Push the limits of performance with Aspen HYSYS..» (2023), Tilgjengelig: <https://www.aspentech.com/en/products/pages/aspen-hysysrt%20=%20%7B2023-05-11%7D,%20urldate%20=%20%7B2023-04-17%7D,.>
- [20] Giorgio Soave. «Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state.» (1972), Tilgjengelig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0009250972800964> (sjekket 24.04.2023).

# Vedlegg A

## Matlab kode

### A.1 Databehandling

```
1 close all; clear; clc
2
3
4 data_2022 = readtable('Data for simulering ORC 2022', 'Range', 'B2:J366');
5 data_2021 = readtable('Data for simulering ORC 2021', 'Range', 'B2:J366');
6
7 data_2022_vec = table2array(data_2022);
8 data_2021_vec = table2array(data_2021);
9
10
11 scen_vint_21_vec = data_2021_vec(1:50,:);
12 scen_var_21_vec = data_2021_vec(51:110,:);
13 scen_for_som_21_vec = data_2021_vec(111:148,:);
14 scen_som_21_vec = data_2021_vec(149:195,:);
15 scen_sen_som_21_vec = data_2021_vec(196:250,:);
16 scen_host_21_vec = data_2021_vec(251:319,:);
17 scen_vint_2_21_vec = data_2021_vec(320:365,:);
18
19
20
21 scen_vint_2_21_vec(17,:) = [];
22 scen_vint_21_vec(7,:) = [];
23 scen_var_21_vec(4,:) = [];
24 scen_for_som_21_vec(38,:) = [];
25 scen_sen_som_21_vec(1:5,:) = [];
26 scen_host_21_vec(34,:) = [];
27
28
29 scen_vint_21 = round(mean(scen_vint_21_vec),2);
30 scen_vint_2_21 = round(mean(scen_vint_2_21_vec),2);
```

```
31 scen_var_21 = round(mean(scen_var_21_vec),2);
32 scen_for_som_21 = round(mean(scen_for_som_21_vec),2);
33 scen_sen_som_21 = round(mean(scen_sen_som_21_vec),2);
34 scen_som_21 = round(mean(scen_som_21_vec),2);
35 scen_host_21 = round(mean(scen_host_21_vec),2);
36
37
38
39 scen_table = array2table([scen_vint_21 ,
40     scen_var_21
41     scen_for_som_21
42     scen_som_21
43     scen_sen_som_21
44     scen_host_21
45     scen_vint_2_21]);
46
47
48 writetable(scen_table , 'Scenario Table.xlsx');
49
50
51 temp_kjel_22 = data_2022_vec(:,2);
52 temp_tur_22 = data_2022_vec(:,3);
53 temp_retur_22 = data_2022_vec(:,4);
54 temp_kjel_21 = data_2021_vec(:,2);
55 temp_tur_21 = data_2021_vec(:,3);
56 temp_retur_21 = data_2021_vec(:,4);
57
58 m_net_22 = data_2022_vec(:,6);
59 m_kjel_22 = data_2022_vec(:,5);
60 m_net_21 = data_2021_vec(:,6);
61 m_kjel_21 = data_2021_vec(:,5);
62
63 p_kjel_22 = data_2022_vec(:,7);
64 p_kjel_21 = data_2021_vec(:,7);
65 p_tur_22 = data_2022_vec(:,8);
66 p_tur_21 = data_2021_vec(:,8);
67 p_retur_22 = data_2022_vec(:,9);
68 p_retur_21 = data_2021_vec(:,9);
69
70
71 eff_kjel_22 = data_2022_vec(:,1);
72 eff_kjel_21 = data_2021_vec(:,1);
73
74
75 ant_dag = [50, 50, 50;
76     60, 60, 60;
```

```
77     38, 38, 38;
78     47, 47, 47;
79     55, 55, 55;
80     69, 69, 69;
81     46, 46, 46];
82
83
84 W_el = [353.15, 436.95, 372.08;
85         215.55, 276.45, 225.88;
86         125.65, 167.15, 124.38;
87         0, 0, 0;
88         77.25, 108.35, 76.88;
89         131.25, 173.95, 135.38;
90         316.55, 400.75, 334.08];
91
92
93 W_el_355 = [330, 330, 330;
94            215.55, 276.45, 225.88;
95            125.65, 167.15, 124.38;
96            0, 0, 0;
97            77.25, 108.35, 76.88;
98            131.25, 173.95, 135.38;
99            316.55, 330, 330];
100
101
102 P_el = W_el .* ant_dag * 24;
103
104 P_sum_0 = sum(P_el(:,1));
105 P_sum_1 = sum(P_el(:,2));
106 P_sum_2 = sum(P_el(:,3));
107
108
109
110 prod_graf_case = figure(9);
111     clf
112     grid on
113     set(gcf, 'Position', [700 350 600 400], 'color', 'w'); hold on
114     bar(P_el)
115     xticks(1:7);
116     set(gca, 'XTick', xticks, 'XTickLabel', {'Vinter 1', 'V\aa r', 'Forsommer',
117         'Sommer', 'Sensommer', 'H\o st', 'Vinter 2'}, 'TickLabelInterpreter',
118         'latex');
119     ylabel('Energiproduksjon (kWh)', 'Interpreter', 'latex');
120     legend('Case 0', 'Case 1', 'Case 2', 'Interpreter', 'latex', 'Position',
121         [6.5 6.5 0 1]/10);
```



```
120
121
122
123
124 %Plot temp, massestrøm, effekt, og trykk
125
126 t = linspace(1, 365, 365);
127
128 temp_graf_22 = figure(1);
129     clf
130     grid on
131     set(gcf, 'Position', [700 350 600 400], 'color', 'w'); hold on
132     plot(t,temp_kjel_22, 'r', 'Linewidth', 0.7)
133     plot(t,temp_tur_22, 'b', 'Linewidth', 0.7)
134     plot(t,temp_retur_22, 'g', 'Linewidth', 0.7)
135     ylabel('Gj.snitt Temp( $\circ$  C$)', 'Interpreter', 'latex')
136     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
137     xlim([0 365])
138     ylim([0 140])
139     title('Datagrunnlag Temperatur 2022', 'Interpreter', 'latex')
140     legend('Temperatur Kjel ( $\circ$  C$)', 'Temperatur Tur( $\circ$  C$)', '
        Temperatur Retur( $\circ$  C$)', 'Interpreter', 'latex', 'Position', [7.5
        2 0 1]/10)
141
142
143 temp_graf_21 = figure(2);
144     clf
145     grid on
146     set(gcf, 'Position', [250 350 600 400], 'color', 'w'); hold on
147     plot(t,temp_kjel_21, 'r', 'Linewidth', 0.7)
148     plot(t,temp_tur_21, 'b', 'Linewidth', 0.7)
149     plot(t,temp_retur_21, 'g', 'Linewidth', 0.7)
150     ylabel('Temperatur( $\circ$  C$)', 'Interpreter', 'latex')
151     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
152     xlim([0 365])
153     ylim([0 140])
154     title('Datagrunnlag Temperatur 2021', 'Interpreter', 'latex')
155     legend('Temperatur Kjel ( $\circ$  C$)', 'Temperatur Tur( $\circ$  C$)', '
        Temperatur Retur( $\circ$  C$)', 'Interpreter', 'latex', 'Position', [7.5 2
        0 1]/10)
156
157
158 strom_graf_21 = figure(3);
159     clf
160     grid on
161     set(gcf, 'Position', [700 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
```

```
162 plot(t,m_nett_21, 'r', 'Linewidth', 0.7)
163 plot(t,m_kjel_21, 'b', 'Linewidth', 0.7)
164 ylabel('Massestr\o m($\dot{m}$)', 'Interpreter', 'latex')
165 xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
166 xlim([0 365])
167 ylim([0 375])
168 title('Datagrunnlag Massestr\o m 2021', 'Interpreter', 'latex')
169 legend('Massestr\o m Bynett ($\dot{m}$)', 'Massestr\o m Kjele ($\dot{m}$)',
        'Interpreter','latex', 'Position', [6.5 7 0 1]/10)
170
171 strom_graf_22 = figure(4);
172     clf
173     grid on
174     set(gcf, 'Position', [250 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
175     plot(t,m_nett_22, 'r', 'Linewidth', 0.7)
176     plot(t,m_kjel_22, 'b', 'Linewidth', 0.7)
177     ylabel('Massestr\o m($\dot{m}$)', 'Interpreter', 'latex')
178     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
179     xlim([0 365])
180     ylim([0 375])
181     title('Datagrunnlag Massestr\o m 2022', 'Interpreter', 'latex')
182     legend('Massestr\o m Bynett ($\dot{m}$)', 'Massestr\o m Kjele ($\dot{m}$)',
        'Interpreter','latex', 'Position', [6.5 7 0 1]/10)
183
184
185 effekt_graf_21 = figure(5);
186     clf
187     grid on
188     set(gcf, 'Position', [250 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
189     plot(t,eff_kjel_21, 'r', 'Linewidth', 0.8)
190     ylabel('Kjeleeffekt (MW)', 'Interpreter', 'latex')
191     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
192     xlim([0 365])
193     ylim([0 15])
194     title('Datagrunnlag Kjeleeffekt 2021', 'Interpreter', 'latex')
195
196
197 effekt_graf_22 = figure(6);
198     clf
199     grid on
200     set(gcf, 'Position', [250 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
201     plot(t,eff_kjel_22, 'b', 'Linewidth', 0.8)
202     ylabel('Kjeleeffekt (MW)', 'Interpreter', 'latex')
203     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
204     xlim([0 365])
205     ylim([0 15])
```

```
206     title('Datagrunnlag Kjeleeffekt 2022', 'Interpreter', 'latex')
207
208
209 trykk_graf_22 = figure(7);
210     clf
211     grid on
212     set(gcf, 'Position', [850 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
213     plot(t, p_kjel_22, 'r', 'Linewidth', 0.8)
214     plot(t, p_tur_22, 'b', 'Linewidth', 0.8)
215     plot(t, p_retur_22, 'g', 'Linewidth', 0.8)
216     ylabel('Trykk (Bar)', 'Interpreter', 'latex')
217     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
218     xlim([0 365])
219     ylim([0 15])
220     title('Datagrunnlag Trykk 2022', 'Interpreter', 'latex')
221     legend('Trykk Kjele (Bar)', 'Trykk Nett Tur (Bar)', 'Trykk Nett Retur (Bar)',
222           'Interpreter', 'latex', 'Position', [6.5 7 0 1]/10)
223
224 trykk_graf_21 = figure(8);
225     clf
226     grid on
227     set(gcf, 'Position', [150 100 600 400], 'color', 'w'); hold on
228     plot(t, p_kjel_21, 'r', 'Linewidth', 0.8)
229     plot(t, p_tur_21, 'b', 'Linewidth', 0.8)
230     plot(t, p_retur_21, 'g', 'Linewidth', 0.8)
231     ylabel('Trykk (Bar)', 'Interpreter', 'latex')
232     xlabel('Dag.nr', 'Interpreter', 'latex')
233     xlim([0 365])
234     ylim([0 15])
235     title('Datagrunnlag Trykk 2021', 'Interpreter', 'latex')
236     legend('Trykk Kjele (Bar)', 'Trykk Nett Tur (Bar)', 'Trykk Nett Retur (Bar)',
237           'Interpreter', 'latex', 'Position', [6.5 7 0 1]/10)
```

