



Kunnskap for en bedre verden

INSTITUTT FOR ENERGI- OG PROSESSTEKNIKK

FENT2900 - BACHELOROPPGAVE FORNYBAR ENERGI

Muligheten for bruk av termisk energi i batteriproduksjon

Forfattere

Anna Aurora Berthinussen Lyngstad, Oskar Olafsen

og Sigrid Trøan Lorentsen

Mai 2022

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: Muligheten for bruk av termisk energi i batteriproduksjon Project title: The possibility of using thermal energy in battery production	Gitt dato: 16. desember 2021
	Innlevingsdato: 20. mai 2022
	Totalt antall sider/bilag: 84/0
Gruppedeltakere: Anna Aurora Berthinussen Lyngstad Oskar Olafsen Sigrid Trøan Lorentsen	Veileder: Steven Boles steven.boles@ntnu.no 73559832
Studieretning: Ingeniør fornybar energi	Prosjektnummer: 22BIFOREN-009 / FENT2900
Oppdragsgiver: Eidsiva Bioenergi AS	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Øyvind Hundseid oyvind.hundseid@eidsiva.no 73593935

Fritt tilgjengelig

Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver

Rapporten frigitt etter

Anna Aurora B. Lyngstad

Anna Aurora B. Lyngstad

Oskar Olafsen

Oskar Olafsen

Sigrid T. Lorentsen

Sigrid Trøan Lorentsen

Forord

Overgangen til det grønne skiftet har ført til økende elektrifisering i samfunnet. I sammenheng med dette stiger og energietterspørselen. For å komme den i møte er utviklingen av nye og bedre energiløsninger viktig. Problemstillinga for denne oppgaven er å se på muligheten for å drive en batterifabrikk hvor kilden til termisk og elektrisk energi hovedsaklig er et forbrenningsanlegg som driftes på biomasse.

Denne bacheloroppgaven er skrevet av tre tredjeårsstudenter i Ingeniørfag, Fornybar Energi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Institutt for energi- og prosessteknikk. Studentene er: Anna Aurora Berthinussen Lyngstad, Oskar Olafsen og Sigrid Trøan Lorentsen, hvor alle har hovedretning innenfor Effektiv energibruk.

Problemstillingen for oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Eidsiva Bioenergi og kontaktperson der, Øyvind Hundseid. Gruppen vil rette en stor takk til Øyvind for veiledning og innspill underveis, da spesielt rundt forbenningsanlegget. Det rettes også en stor takk til intern veileder ved NTNU, Steven Boles, for hjelp og veiledning angående batteriproduksjon og tørrom, samt hjelp til å finne relevant litteratur. Det rettes også takk til Ignat Tolstorebrov, Bjørn Austbø og Odne Burheim for informasjon og veiledning om termodynamisk forståelse, Asanthi Jinasena og Shabbir Ahmed for beregninger på batteriproduksjon, og Simen Gjølshjø for informasjon om biobrenselet GROT.

Trondheim, 19. mai 2022

Anna Aurora B. Lyngstad
Anna Aurora B. Lyngstad

Oskar Olafsen
Oskar Olafsen

Sigrid T. Lorentsen
Sigrid Trøan Lorentsen

Sammendrag

Oppgaven går ut på å se på muligheten til å drifte en batterifabrikk på energi fra et CHP-anlegg som benytter biomasse som brensel. Det er funnet at for å produsere 5 GWh NMC333 batteri trengs det 73,6 GWh/år med energi, hvorav 55,2 GWh/år er termisk og 18,4 GWh/år er elektrisk. Dette gir et godt utgangspunkt til å kombinere batterifabrikken med et CHP-anlegg. Tørrrom og tørking i batteriproduksjonen står for 93 % av det totale energibehovet, men det er noe usikkerhet knyttet til dette grunnet stor variasjon i funn fra ulik litteratur. Energiforbruket kan uansett reduseres ved bruk av implementering av varmevekslere og varmepumper. Mengden NMP i anlegget er basert på beregninger gjort av Batpac, som ved en produksjon på 5 GWh vil kreve fordampning av 4,6 millioner kg NMP. Det er denne mengden som er avgjørende faktor for størrelsen på anlegget. CHP-anlegget kan dimensjoneres etter ønsket andel elektrisk og termisk energibehov. Her kan eventuell overskuddsstrøm sendes ut på kraftnettet. Tilgangen på GROT i området er stor og kan dekke behovet på 16 000 tonn hvert år. For å få fuktprosenten ned fra 50 % til 15 % kreves det 1,87 GWh/år. Driften av dette anlegget er økonomisk bærekraftig i forhold til kraftprisene i dag.

Summary

The focus of this thesis is to look at the possibility of running a battery factory on energy from a CHP-plant using GROT (i.e. branches and tree tops which are not taken out during felling). In order to produce 5 GWh of NMC333 battery, 73,6 GWh/year of energy is required. Of which 55,2 GWh/year is thermal and 18,4 GWh/year is electric. The results indicates opportunities for combining a battery factory with a CHP facility. Dry room and drying of the electrodes in the battery production accounts for 93 % of the total energy requirements, but there is some uncertainty associated with this due to variation in literature data. The energy required can be reduced by implementing heat exchangers and heat pumps. The volume of NMP needed in the plant is based on data collected from Batpac. This will require of 4,6 million kg NMP to produce 5 GWh, thus being a deciding factor in the sizing of the plant. The CHP system will be sized according to the desired proportion of electrical and thermal energy. Any surplus electrical power produced can be sent to the power grid. The supply of GROT in the area investigated is large and can cover the need of 16 000 tonnes each year. Reducing the moisture percentage in GROT from 50 to 15 % requires 1,87 GWh/year. The operation of this plant is financially sustainable in relation to todays power prices.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	iv
Summary	v
Liste over begreper	viii
Liste over variabler	ix
Liste over symboler	xi
Liste over forkortelser	xii
Liste over figurer	xiii
Liste over tabeller	xiv
1 Introduksjon	1
2 Bakgrunn	2
2.1 Batterier	2
2.1.1 Bruk av batterier	2
2.1.2 Litium-ion batteri	3
2.1.3 Materialer i et batteri	3
2.1.4 Aktive materialer	3
2.1.5 Carbon black	5
2.1.6 Bindemiddel	6
2.1.7 Løsemiddel	6
2.1.8 Separator	6
2.1.9 Elektrolytt	7
2.1.10 Kjemien i et batteri	7
2.2 Produksjon	8
2.2.1 Blanding	8
2.2.2 Belegging	9
2.2.3 Tørking	9
2.2.4 Oppsamling av løsemiddel	10
2.2.5 Kalandrering	11
2.2.6 Spalting, stabling og sveising	11
2.2.7 Forming	12
2.3 Tørrom	12
2.3.1 Tørkesystem for flytende tørkemiddel	14
2.3.2 Fast tørkemiddel	16
2.4 Forbrenningsanlegg	17
2.4.1 Komponenter	18
2.4.2 Rankine syklus	19
2.5 Kombinert varme- og kraftsystem	21
2.5.1 Dampturbin	22
2.5.2 Kjele, pumpe og kondensator	23

2.6	Biomasse	23
2.6.1	GROT	24
3	Metode	25
3.1	Systembeskrivelse	25
3.2	Litium-ion batteri	26
3.2.1	Blanding av elektrodeslurry	26
3.2.2	Tørking av NMP	27
3.2.3	Tørking av vann	29
3.3	Tørrom	29
3.4	Energibehovet ved LIB-produksjon	30
3.5	Kostnader	30
3.6	Bio	32
3.6.1	Tilgjengelig materiale	32
3.6.2	Forbrenning	33
3.6.3	Tørking av GROT	35
3.6.4	Kostnader	36
4	Resultater	38
4.1	Tørkeprosessen	38
4.2	Tørrom	39
4.3	Batteriproduksjon	39
4.3.1	Kostnader ved batteriproduksjon	40
4.4	Forbrenningsanlegget	42
4.5	Biomasse	43
4.5.1	Tørking av GROT	44
5	Diskusjon	46
5.1	Batterifabrikken	46
5.1.1	Katodemateriale	46
5.1.2	Anodemateriale	47
5.1.3	Løsemiddel	48
5.1.4	Tørking av NMP	48
5.1.5	Tørking av vann	51
5.2	Tørrom	51
5.2.1	Tørromsparametre	52
5.3	Varmeveksler	53
5.4	Kostnader ved batteriproduksjon	53
5.5	CHP-anlegget	54
5.5.1	Dimensjonering	55
5.5.2	GROT	56
5.5.3	Kostnader	58
5.6	Integrering av bioanlegg og batterifabrikk	58
5.6.1	Dimensjonering	58
5.6.2	Total økonomi	59
5.6.3	Utfordringer	60
5.6.4	Fremtidige muligheter	60
6	Konklusjon	61
7	Videre arbeid	62

Liste over begreper

Begreper	Forklaringer
Adsorbering	Ta opp stoffer på en overflate
Agglomerere	Balle sammen
Aktivt materiale	Materialer som er involvert i en reaksjon som produserer elektrisitet.
Amorf	Fast stoff der det ikke er noen definert finstruktur på molekylnivå
Anode	Delen av batteriet hvor oksidasjonen finner sted
Binder	Holder sammen de aktive materialene
Carbon black	Tilsetningsmiddel som øker konduktiviteten til elektroden
Coating	Prosess hvor det blir påført en slurry på et ledende folie
Damptrykk	Det trykket som en gass av et stoff utøver når den er i termodynamisk likevekt med det samme stoffet i fast eller flytende form
Dekar	Enhet for måling av areal som tilsvarer 1 000 kvadratmeter
Dekollering	Produksjonen av individuelle anode- og katodeplater
Elektrode	Elektrisk leder som fungerer som en samlebetegnelse for anode og katode
Elektrolytt	Den delen av batteriet som inneholder frie ioner
Gigafabrikk	Batterifabrikk som produserer over 1 GWh
Halvreaksjon	Hver side av reaksjonen i en redoksreaksjon
Heft	Koblingsstyrken mellom belegget og substratet generelt
Hydroskopisk	Trekker til seg fuktighet fra omgivelsene
Kalandrering	Prosess med å påføre mekanisk trykk på et materiale for å endre egenskapene
Katode	Delen av batteriet hvor reduksjonen finner sted
Minne-effekt	Effekten som oppstår i et batteri etter å ha blitt ladet og utladet til samme punkt flere ganger
Packed bed	Tank fylt med materiale som øker kontakten mellom gasser og væsker
Reologiske egenskaper	Flyte- og deformasjonsegenskaper
Self-charge rate	Interne kjemiske reaksjoner som reduserer den lagrede ladningen i batteriet
Separator	Membran som skiller anoden og katoden
Slurry	Blanding av tunge faste partikler som tilsettes for å forbedre ledningsevnen til anoden
Stabling	Når katoden, anoden, separatoren og andre materialer er stablet opp mot hverandre
Strømleder	Metallet på katoden og anoden som leder strøm
Tørrom	Et forseglet rom som opprettholder lave luftfuktighetsnivåer og passe temperatur
Utluting	Trekke ut løselige bestanddeler fra fast stoff ved å benytte lut, vann eller annen væske

Winding	Separatoren, katodeplaten, anodeplaten sendes gjennom en viklingsmaskin som gjør de til en sammenhengende battericelle
Zeolittjul	Tørkehjul
Z-folding	Teknikk hvor separatorene er jevnt stablet i en sikksakk-formasjon

Liste over variabler

Symbol	Benevninger	Forklaring
A	m^2	Areal på varmeveksler
A_g	m^2	Areal på gassiden
A_l	m^2	Areal på væskesiden
a	m^2/m^3	Grenseflateareal per volum
C_{NMP}	$J/g \cdot K$	Konsentrasjonen av NMP
C_{p_l}	$J/g \cdot K$	Varmekapasiteten til luft
$C_{p_{vann}}$	$J/g \cdot K$	Varmekapasiteten til vann
d	Dimensjonsløs	Konstant som er avhengig av løsemiddel
e	Dimensjonsløs	Konstant som er avhengig av løsemiddel
$E_{torking}$	Wh	Total tørking av NMP
$E_{torkings}$	Wh	Fordampning av løsemiddel
$E_{torkingl}$	Wh	Oppvarming av luftstrøm
E_{torrom}	Wh	Total mengde energi til tørrom
f	Dimensjonsløs	Konstant som er avhengig av løsemiddel
F_r	-	Fuktighetsprosent i biomassen
h	kJ/mol	Entalpi
h_d	$W/m^2 \cdot K$	Varmeoverføringskoeffisienten på gassiden
h_f	kJ/kg	Spesifikk entalpi i væskeform
h_g	kJ/kg	Spesifikk entalpi i gassform
h_{inn}	kJ/kg	Entalpi inn
h_l	$W/m^2 \cdot K$	Varmeoverføringskoeffisienten på væskesiden
h_{ut}	kJ/kg	Entalpi ut
H_e	kJ/kg	Energitettheten i biomassen
LMTD	K	Logaritmisk gjennomsnittstemperatur
\dot{m}	kg/s	Massestrømmen i systemet
\dot{m}_g	$kg/m^2 \cdot s$	Massestrømmen til tørr luft
\dot{m}_{luft}	mol/s	Massestrømmen til luft i tørkeprosessen
\dot{m}_{NMP}	mol/s	Massestrømmen til NMP
m_{H_2O}	mol/s	Massestrøm til vann i tørke prosessen
m_l	$kg/m^2 \cdot s$	Massestrømmen til tørkemiddel
m_1	kg/s	Massestrøm basert på det termiske behovet
m_2	kg/s	Massestrøm basert på det elektriske behovet
p	bar	Trykk
p_{sat}	bar	Mettet trykk
P_c	W	Kjølingseffekt
P_h	W	Oppvarmingseffekt tørrom
R_T	W/K	Termisk motstand tørrom
$t_{torking}$	h	Driftstid
t_{torrom}	h	Driftstid

T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T_{gi}	$^{\circ}\text{C}$	Omgivelsestemperatur
T_{go}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur på luft etter den er tørket
T_{gr}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur inne i tørrom
T_I	$^{\circ}\text{C}$	Inngangstemperatur
T_{li}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur på det nedkjølte tørkemiddelet
T_O	$^{\circ}\text{C}$	Utgangstemperatur
$T_{torrluft}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur i tørrluft
T_{ute}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur ute
$u_f(T)$	kJ/kg	Spesifikk indre energi i væskefor
U	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	Varmeføringskoeffisient
$U_{kondensator}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	Varmeføringskoeffisient for kondensator
$U_{varmeveksler}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	Varmeføringskoeffisient for varmeveksler
v	m^3/kg	Spesifikt volum
$v_f(T)$	m^3/kg	Spesifikt volum i væskeform
\dot{Q}_{inn}	Wh/år	Varme som går inn i kjelen
\dot{Q}_{ut}	Wh/år	Overført varme
\dot{W}_p	Wh/år	Arbeid inn i pumpa
\dot{W}_t	Wh/år	Arbeid ut av turbinen
x	$\text{kg}_{vann}/\text{m}^3_{GROT}$	Mengde vann i brennselet
$\alpha_{Kondensator}$	Faktor	Forhold mellom størrelse på kondensator
$\alpha_{Varmveksler}$	Faktor	Forhold mellom størrelse på varmeveksler
ΔP	bar	Endring i trykk
λ	kJ/kg	Energimengden som trengs til å fordampe et kg løsemiddel

Liste over symboler

Symboler	Forklaring
μm	Mikrometer
α	Alfa
$^{\circ}\text{C}$	Grader Celsius
λ	Lambda
η	Virkningsgrad
E°	Cellepotensialet til et batteri
m	Masse
\dot{Q}	Energimengde per masse

Liste over forkortelser

Forkortelser	Forklaring
CHP	Combined heat and power system
DMAC	Dimetylacetamid
DMF	Dimetylformamid
DMSO	Dimetylsulfoksid
EV	Electric vehicle
GROT	Forkortelse for grener Og topper
ISO 7	International standards organisasjon
LFP	Litium jernfosfat
LIB	Litium-ion batteri
LMTD	Logaritmisk gjennomsnittstemperatur
MER	Maximum electricity rate
MNOK	Millioner norske kroner
N/A	Not applicable, Ikke anvendbar
NCA	Nikkel kobolt aluminium
NMC	Nikkel mangan koboltoksid
NMC111	Batteri bestående av nikkel, mangan og kobolt
NMC333	Batteri bestående av nikkel, mangan og kobolt
NMP	N-metyl-2-pyrrolidon
NIBIO	Norsk institutt for bioøkonomi
ppm	Parts per million
pH	Pondus Hydrogenii eller potentia Hydrogenii
PVDF	Polyvinylidendifluorid
SEI	Solid electrolyte interface

Kjemiske forkortelser	Forklaring
e^-	Negativt ladet ion
C_6	Karbonatom som består av 6 protoner
CO	Karbonmonoksid
Li^+	Litium ion
$LiCoO_2$	Litiumkoboltoksid (Lithium cobalt oxide)
$LiNiCoAlO_2$	Litium nikkel kobolt aluminium oksid
$LiMn_2O_4$	Litium manganesium oksid
$Li[Ni_xCo_xMn_x]O_2$	Litium nikkel kobolt mangan oksid
$LiFePO_4$	Litium jern fosfat

Figurer

2.1	Oppsettet til et litium-ion batteri under utladning[9].	4
2.2	Flytende tørkemiddelsystem	14
2.3	Tørkehjulsystem	17
2.4	Forbrenningsanlegg for avfall, med varmtvannsproduksjon og elektrofilter [22]	18
2.5	Illustrasjon av Rankine-syklus [27].	20
3.1	System for tørking og samling av NMP [14]	27
3.2	Illustrasjon av sirkulasjonsstømmen i CHP-anlegget som det er tatt utgangspunkt i.	34

Tabeller

2.1	Katodematerialer som kan brukes i et LIB.[8]	5
2.2	Anodematerialer som kan brukes i et LIB. [8]	5
2.3	Luftfuktighetsnivåer i batteriproduksjon.	13
3.1	Kjemiske og fysiske egenskaper til ulike løsningsmidler ved $T=20^{\circ}\text{C}$ [40].	26
3.2	Parametere for utregning av energibehov til tørking	28
3.3	Tørrom parametre	29
3.4	Tall om energibehovet til de ulike prosessen i en LIB-produksjon.	30
3.5	Materialkostnader	31
3.6	Kraftkostnader	31
3.7	Materialforbruk per år	32
3.8	Oversikt over energitettheten for de ulike benyttede biomassene	33
3.9	Oversikt over ytelsesdataene til to ulike tørkesystemer for biomasse[38].	36
3.10	Vekt på GROTen med ulik fuktprosent.	36
3.11	Prisoversikt på forbrenning av biomasse [52].	37
4.1	Initielle resultater	38
4.2	Energibehov for tørkekomponenter	38
4.3	Energibehov for tørrommet	39
4.4	Nødvendig energibehov for de ulike stegene i en LIB produksjon.	39
4.5	Temperaturstrømmer	40
4.6	Totale utgifter til innkjøp av materiale for produksjon av 5 GWh batteri	40
4.7	Utgifter av drifting av et 6038 m^2 tørrom	41
4.8	Kostnader for tørking av 4666 tonn NMP	41
4.9	Totale årlige kostnader for produksjon av 5 GWh batterier	41
4.10	Verdier tilhørende de ulike stegene i forbrenningsanlegget	42
4.11	Energien som går inn og ut av forbrenningsanlegget med m_1 lik $2,64\text{ kg/s}$.	43
4.12	Energien som går inn og ut av forbrenningsanlegget med m_2 lik $3,96\text{ kg/s}$.	43

4.13 Sammenligning mellom energien som fås fra ulike andeler av flis ved 35 % fukt og GROT ved 15 % fukt	44
4.14 Sammenligning mellom energien som fås fra ulike andeler av flis ved 50 % fukt og GROT ved 15 % fukt.	44
4.15 Nødvendig mengde som må leveres til anlegget for å oppnå ønsket effekt på 73,6 GWh/år.	44

1 Introduksjon

Behovet for energi er forventet å øke i årene som kommer. Det er derfor viktig å kunne utnytte de energiresursene som er tilgjengelig. I Norge utnyttes allerede vannkraften i stor grad, men det er forbedringspotensiale på andre områder. I Innlandet er det god tilgang på biobrensel sammenlignet med andre deler av landet. Denne energiresursen blir ikke utnyttet optimalt i dag, men vil kunne komme godt til nytte i møte med den økende energietterspørselen.

Den fornybare energiproduksjonen er ikke jevn. Den varierer fra natt til dag og avhenger av nedbørmengde, vind og sol. Sammen med det økende energibehovet kommer også et behov for nye måter å lagre denne på. Det er nødvendig med ny teknologi for å kunne lagre overskuddsenergi som en kan benytte seg av ved behov. Utvikling og produksjon av batterier er derfor essensielt for å håndtere de kommende utfordringene.

Denne oppgaven er hovedsakelig delt inn i to hovedtemaer: batterifabrikk som produserer litium-ion batterier og et forbrenningsanlegg som driftes på biomasse. En underkategori til sistnevnte er uttak og tørking av greiner og røtter som ikke blir tatt ut ved hogst, også kalt GROT.

Opgavens problemstilling er å analysere muligheten for å drive en batterifabrikk i Innlandet på termisk energi som fås fra et bioforbrenningsanlegg. Hovedfokuset er å se på det totale energibehovet som en batterifabrikk har og hvor mye energi som kan fås ut av et forbrenningsanlegg som driftes på biobrensel. Videre skal disse to delene slås sammen og analyseres for å se på kombinasjonsmuligheter. Ettersom at forbrenningsanlegget vil produsere mye termisk energi, vil et av fokusene i oppgaven være hvilke deler av batteriproduksjonen som kan bruke termisk- fremfor elektrisk energi. Nøkkelstegene som skal vurderes er tørkingen av elektrodene, samt drifting av tørrommet i batterifabrikken.

2 Bakgrunn

Denne delen dekker det grunnleggende og den underliggende teorien for det som oppgaven baseres på. Teoridelen er forholdsvis stor sammenlignet med resterende deler av oppgaven. Dette begrunnes med at det ligger mye teori bak hver beregning, spesielt når det kommer til batteriproduksjonen.

2.1 Batterier

Batterier representerer en måte å lagre energi på. Dette skjer i form av kjemisk energi som kan omformes til elektrisk energi når en har behov for strømmen. Denne formen for energilagring gjør det lettere å kunne lagre og transportere energien. Større deler av samfunnet blir elektrifisert, samtidig som at stadig flere lavere samfunnslag i verden får tilgang på og behov for strøm. I tida fremover vil derfor etterspørselen av elektrisk energi fortsette å øke, og batterier vil være en viktig faktor for å kunne møte det økende behovet.

Batterier kan deles inn i to grupper: energibatterier, som er de primære ikke-oppladbare batteriene, og de sekundære oppladbare batteriene. Forskjellen på disse er at i de oppladbare batteriene er den kjemiske prosessen reversibel, mens dette ikke er mulig for de primære batteriene. Det vil si at batteriene både kan utlades under bruk, og lades opp igjen etterpå ved å reversere den kjemiske reaksjonen ved opplading - også kalt elektrolyse. De sekundære batteriene kan lades opp igjen flere tusen ganger. To eksempler på sekundære batterier er Litium-ionbatteri (LIB) og sink-karbonbatteri. [1]

2.1.1 Bruk av batterier

Batterier er en form for bærebær energi som har blitt en del av hverdagen til de alle fleste. De kommer i alle mulige størrelser og fasonger, og brukes blant annet i mobiltelefoner og datamaskiner. De siste årene har de også blitt tatt i bruk i for eksempel verktøy til håndverkere, i større batterier til medisinsk utstyr og i elektriske biler. [2]

Bruk av større batterier i elektriske kjøretøyer har fått økende interesse på grunn av deres mange fordeler sammenlignet med kjøretøy med forbrenningsmotor. De er miljøvennlige, har enklere motorer og er enklere å vedlikeholde. Elektriske biler har vist seg å være mer energieffektive, slipper ikke ut lokal forurensning og avgir mindre støy enn fossildrevne kjøretøy. I tillegg er produksjon av elektriske biler en potensiell muliggjører for kostnadsreduksjon innen batteriteknologi, dette på grunn av masseproduksjon og stadig mer effektive produksjonsmetoder. Dette kan støtte videre utvikling av andre

batteribaserte sektorer for et samfunn basert på ren energi, som for eksempel tog, utstyr i anleggsbransjen og lignende. [3]

2.1.2 Litium-ion batteri

Den mest utbredte batteriteknologien for batteriopplading i dag er batterier basert på litium. Disse batteriene har allerede hatt stor utvikling de siste årene, men det er fortsatt forbedringspotensiale blant annet på materialsiden, samt automatisering av produksjonsprosessene. Forespørselen etter litium-ion batterier er antatt å øke, ettersom de brukes i bærbare elektriske enheter og i elektrisk samt hybride kjøretøy, hvor etterspørselen også er økende. Litium er et veldig lett metall, og består av små ioner som migrerer lett i et elektrisk felt. De er derfor både raske å lade opp og gir høy effekt ved utladning. Batteriene har i tillegg høy energitetthet, og egnes derfor godt til mange anvendelser. [4]

Fordelen med disse typer batterier er at de har høy tetthet og fungerer svært godt i mindre enheter som mobiler og datamaskiner. Batteriet har heller ikke noe minne-effekt og har lav self-charge rate. Her er minne-effekt effekten som oppstår i et batteri etter å ha blitt ladet og utladet til samme punkt flere ganger[5], og self-charge rate er den interne kjemiske reaksjoner som reduserer den lagrede ladningen i batteriet uten at det er i bruk. Dette gjør at levetiden reduseres og at de ikke kan lades fullt når de faktisk tas i bruk[6]. Batteriene er avhengig av beskyttende innpakning, og vil starte en degradering så snart de er ferdigprodusert. Dessuten er de større batteriene kostbare å produsere, og det finnes fortsatt ingen effektive måter å resirkulere dem på - selv om dette jobbes aktivt med av flere aktører, eksempelvis Hydro Volt og Northvolt [7]. [8]

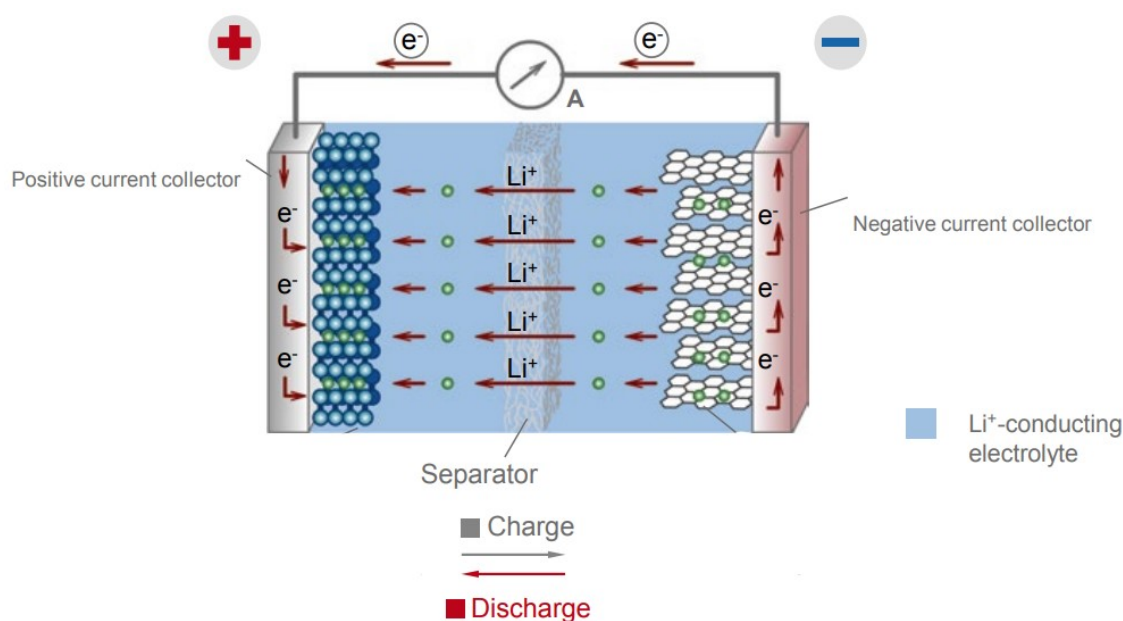
2.1.3 Materialer i et batteri

Elektrodene i et LIB består av en kombinasjon av aktive og inaktive materialer. Hvilke typer materialer som blir brukt i batteriene varierer mellom de ulike produsentene, avhengig av de ulike produsentteknikkene som blir brukt. Imidlertid er basismaterialet til elektroden den samme for alle. [9]

2.1.4 Aktive materialer

Et LIB-batteri består av mange forskjellige deler hvor hver av dem har sine definerte egenskaper. Hovedkomponentene i et slikt batteri er det aktive materialet carbon black, bindemiddel, løsemiddel, separator, elektrolytt og strømlleder. Strømllederen vil i de fleste tilfeller bestå av kobber på anoden, og aluminium på katoden. Et batteri ved utladning fungerer ved at ioner fra anoden transporteres gjennom separatorene til katoden. Samtidig

blir elektroner transportert til katoden gjennom den ytre kretsen i en strømleder, hvor det utføres et elektrisk arbeid ved utladning. Ved oppladning av batteriet er prosessene reversert[9]. Når det videre nevnes anode og katode er dette anoden og katoden ved utladning. En illustrasjon av hvordan oppsettet til et LIB ser ut er vist i Figur 2.1.



Figur 2.1: Oppsettet til et litium-ion batteri under utladning[9].

Litium er et godt egnet materiale for bruk i et batteri. Det sølvhvite metallet har en spesifikk ladning på 3,862 Ah/kg, i tillegg til et svært negativt spenningspotensialet på hele -3,05 V. Det kan også oppnå en spesifikk energi på mer enn 600Wh/kg. En ulempe med bruk av litium er at en ikke kan bruke vanlige elektrolytter på grunn av den høye reduksjonspotensialet til litiumet. Litiumionet har høy mobilitet, og egner seg derfor godt til rask oppladning og høyt effektforbruk. [9]

2.1.4.1 Katode

Under oppladningen av batteriet, også kalt elektrolyse, skjer det en reduksjonsreaksjon på katoden. Under elektrolysen er katoden negativ, mens under utladning i batteriet er den positiv. Katodematerialet som blir brukt i batteriene kan variere, men en av de vanligste er litiumbasert metalloksidlegering, for eksempel LiCoO_2 . [10]

Tabell 2.1: Katodematerialer som kan brukes i et LIB.[8]

Materiale	Gj.volt vs. Li/Li^+ [V]	Kapasitet [mAh/g]	Sikkerhet	Stabilitet	Kald start	Temp. stabilitet	Pris
LiCoO ₂	3,8	274	-	+	+	+	- -
LiNiCoAlO ₂	3,9	170	+	+	++	++	0
LiMn ₂ O ₄	4,0	148	+	0	0	-	++
Li[Ni _x Co _{x0} Mn _x]O ₂	3,8-4,0	210-280	+	+	+	+	0
LiFePO ₄	3,3	170	+	++	-	0	++

Tabell 2.1 er en oversikt over noen av materialene som kan brukes som katodemateriale [11]. Her er + symbol for en fordel, 0 er symbol for nøytralt, og - er symbol for en ulempe. [8]

2.1.4.2 Anode

Under oppladning er anoden elektroden hvor oksidasjonsreaksjonen skjer. Anoden fungerer som den positive elektroden i en elektrolysecelle, mens den blir den negative elektroden i en spontan elektrokjemisk celle, som for eksempel i et batteri. Her vil anoden være negativ under utlading og positiv under lading. [12]

Det vanligste anodematerialet er grafit. Det er et stabilt materiale som tåler mange elektrokjemiske sykluser, hvor en syklus består av en opplading og en utlading. Tabell 2.2 viser en oversikt over de mest vanlige anodematerialene som blir brukt i et LIB. [13]

Tabell 2.2: Anodematerialer som kan brukes i et LIB. [8]

Materiale	Volt vs. Li/Li^+ [V]	Kapasitet [mAh/g]	Sikkerhet	Stabilitet	Pris
Li-Metall	0	3860	-	-	+
Amorf C	100-700	ca. 200	+	+	0
Grafit LiC ₆	50-300	372	+	+	+
Li-leggering	50-600	3990 (Si), 1000 (Sn)	0	-	++
Li-oksider	50-600	1500	+	-	-
Li-titanate	1400-1600	150	++	++	-

2.1.5 Carbon black

Carbon black, "kjørnørk" på norsk, tilsettes elektrodemiksen for å forbedre ledningsevnen til anoden. Mengden carbon black som blir brukt varierer blant produsentene, men det vanligste er at andelen ligger på rundt 1-5 %. Mengden som blir tilsatt er også avhengig av hva batteriet skal brukes til. Hvis en ønsker å lagre mest mulig energi, vil en redusere bruken av carbon black-tilsetninger. Dette fordi det i seg selv ikke lagrer energi og reduserer energitettheten i batteriet, men brukes til å få elektroner til å fordele seg bedre utover elektroden. Den øker også reaksjonshastigheten, altså effektuttaket. Dersom det er

ønskelig med et batteri med høy effekt, vil en øke mengden tilsetninger for å få reaksjonene til å gå raskere. [9]

2.1.6 Bindemiddel

Bindemiddelet refererer til et inaktivt materiale i elektroden som øker heftet (adhesjonen) mellom materialene. Bindemiddelet skal også hjelpe elektroden til å opprettholde strukturen ved å øke heften til strømlederen. Et mye brukt bindemiddel for et LIB er Polyvinylidenfluorid, forkortet til PVDF. [9]

2.1.7 Løsemiddel

Løsemiddelet er et inaktivt materiale som tilsettes under blandingen av elektrodematerialene. Etersom elektrodene består av faste stoffer er det vanskelig å få disse til å hefte til strømlederen. Derfor tilsettes det et løsemiddel for å forbedre miksing av materiale, samt for å hjelpe å fordele elektrodematerialet jevnt over strømlederen. Etter at miksen er lagt på strømlederen blir løsemiddelet fjernet ved tørking ved bruk av infrarød stråling eller vanlig konveksjonstørking. [9]

Det vanligste stoffet for løsemiddel er N-metyl-2-pyrrolidone, forkortet NMP. Dette stoffet er svært giftig, så det er viktig å få samlet opp alt under tørking slik at det ikke går ut til omgivelsene. Oppsamlingen av NMP er en energikrevende prosess, men også nødvendig ettersom NMPen brukes flere ganger. Dette løsemiddelet brukes hovedsakelig for katoden, mens vann vanligvis brukes som løsningsmiddel for anoden. [9]

En undersøkelse gjort av Ahmed et al(a).[14] viste at produksjon av en batteripakke krevde $42.1 Wh/Wh_{bat}$ hvorav $14.2 Wh$ gikk med til oppsamling av NMP. Dette utgjør med andre ord litt over $1/3$ av den totale energimengden til produksjonen. Det er derfor ønskelig for fremtidig batteriproduksjon å gå bort fra bruken av NMP og heller finne andre løsninger, som for eksempel å bruke vann som løsemiddel. [14]

2.1.8 Separator

For å unngå direkte kontakt og kortslutning mellom de positive og negative elektrodene brukes det en separator. Separatoren kan ikke lede elektroner, samtidig som den skal kunne transportere litiumioner mellom elektrodene. Organiske elektrolytter har et lag med en konduktivitet på ca. 10 mS/cm . Dette gjør at avstanden mellom elektrodene må være svært lav for å unngå høy ohmsk motstand i batteriet. Det er vanlig at en separator er mellom 12 og $25 \mu\text{m}$ tykk. Separatoren må være såpass tynn for å kunne transportere litiumioner, men samtidig tykk nok til at det ikke kan oppstå kortslutning eller skade

på grunn av høy temperatur under utlading/lading. En kortslutning er når det ikke går elektroner i den ytre kretsen, men den elektrokjemiske reaksjonen skjer inne i batteriet. Ofte foretrekkes polyetylen og polypropylen som separasjoner på grunn av deres kjemiske stabilitet og at de er rimelige i pris. [9]

2.1.9 Elektrolytt

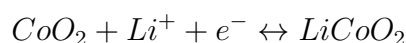
Elektrolytten er den delen av batteriet som inneholder frie ioner i form av negative kationer eller positive anioner. Disse ionene kan migrere mellom elektrodene, mens elektronene går gjennom den ytre kretsen og utnyttes til å gjøre et arbeid. I et litiumbatteri består ofte elektrolytten av en polymerbasert løsning med litiumsalt, med den kjemiske strukturen LiPF_6 . [15]

I litiumbatteriet er elektrolytten karakterisert ved tre materialklasser: de ledende saltene, de organiske løsemiddelene og tilsetningsstoffene. Ved valg av elektrolytt må en ta hensyn til funksjonalitet, sikkerhet og økonomi. For eksempel må den ha høy ledningsevne over et bredt temperaturområde, vise stabilitet etter veldig mange ladesykluser og kjemisk passe med elektroden [9]. I en litium-ioncelle blir elektrolytten og grafitten skadet av selv de minste mengder med fuktighet. Derfor brukes det ofte et ytre beskyttende metallhus, siden vann ofte trenger inn gjennom plastikkmaterialer. Tynn og lett aluminium blir ofte brukt til dette, men stål og jern kan bli funnet i billigere celler. Dette gjør dog at batteriet blir tyngre som er lite gunstig for transportsektoren. Keramisk belegg kan også brukes for større temperaturstabilitet. [9]

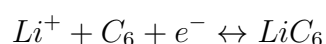
2.1.10 Kjemien i et batteri

Et LIB er basert på elektrokjemiske reaksjoner hvor litium spiller en sentral rolle [16]. Det vanligste å bruke som anodemateriale er grafitt. På grunn at dette kan batteriene ofte kategoriseres ut i fra hvilket katodemateriale som er brukt. Hvilket materiale som blir brukt her kan variere. De to materialene som skiller seg mest ut er nikkelt mangan koboltoksid (NMC) og nikkelt kobolt aluminiumoksid (NCA). [9]

Et eksempel på kjemiske reaksjoner til et LIB kan være halvreaksjonene:

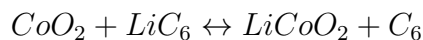


med cellepotensialet $E^\circ = 1V$, og



med cellepotensialet $E^o \sim -3V$, som er et høyt cellepotensiale.

Dette gir den totale reaksjonen:



med det totale cellepotensialet, ved utlading, er gitt ved Ligning 2.1.10 under [8].

$$E_{oc} = E^+ - E^- = [V]$$

$$1 - (-3,01) = 4V$$

2.2 Produksjon

Under produksjon av elektrodene til litium-ion batteriet er det syv ulike steg som gjennomgås. Hele prosessen skjer i et tørrrom, hvor poenget er å holde luftfuktigheten nede for å ikke skade batteriet.

2.2.1 Blanding

Den første delen i battericelleproduksjonen er blanding av de ulike aktive materialene som er brukt. Resultatet er en sammensatt masse som kalles en slurry. Slurryen består av de aktive materialene, elektrisk ledende midler, bindingsmiddel og tilsetningsstoffer. De ulike materialene forhåndsbehandles og blandes sammen når de fremdeles er tørre. Målet med den tørre blandingsprosessen er at alt det aktive materialet skal dekkes fullstendig med carbon black. [9]

Videre skjer det en våt type miksing. Her blandes forhåndsbehandlet pulver og løsningsmiddel. Slurryen er i utgangspunktet betydelig agglomerert, men etter grundig gjennomgang med blandeverktøy dannes det en homogen masse. Det benyttes ulike systemer for blandingen av massen, avhengig av den bestemte applikasjonen samt kvalitetskravene. Systemene benytter ulike temperaturer, blandeteknikker og trykk. Det er også viktig å huske at feil i blandingen ikke kan reverseres. [9]

Denne prosessen har størst betydning for kvaliteten til battericellen, hvilket er grunnen til at kravene for blandingen er så strenge. Hver enkelt komponent skal være nøyaktig målt og ha svært lavt resternede innhold av vann. Det er også bestemte parametre med hensyn til homogenitet og viskositet for å sikre en videre sikker, uniform og kontinuerlig belegging. [9]

2.2.2 Belegging

Videre følger beleggingsprosessen. Her legges slurryen fra forrige prosess på strømsamleren. Disse består av metallisk folie, kobber for anoden og aluminium for katoden. Bindemidlene sørger for en kohesiv elektrodestruktur og slurryens heft til den metalliske folien. I blandingsprosessen bearbeides disse komponentene sammen med et løsningsmiddel, hvor utfallet er et homogent lim. Løsemiddelet løser kun opp bindemiddelet samt noen av tilsetningstoffene. Det endrer reologiske egenskaper hos materialene, og sørger dermed for at slurryen skal kunne feste seg til den metalliske folien. [9]

Belegging gjøres på en av tre følgende måter: hvor prosedyren er kontinuerlig eller periodevis, hvor én side belegges av gangen, eller begge samtidig. I alle tre metodene er det viktig med optimal presisjon for produktets sluttresultat. [9]

2.2.3 Tørking

Etter at slurryen er belagt på foliene, må de tørkes. Til tørking brukes det luftstråler og ulike tørketromler, hvilket består av luftbårne ark, sugestråler og rulletransportører. I tørketromlene er det innstilt en temperaturprofil, og det er denne som bestemmer heftet mellom belegget og metallfoliene, samt fordelingen av bindemidlet i det aktive materiallaget. Under tørking fordampes løsningsmidlet, og dette trekkes ut av tromlens avtrekksluft. Deretter kondenseres de, renses og gjenbrukes igjen i blandingsprosessen. Energien som trengs for å tørke løsemiddelet finnes ved Ligning 2.1. [17]

$$E_{torkings} = m_{NMP} \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Her er m_s massen til løsemiddelet, og λ er energien som trengs for å fordampe en kg løsemiddel. λ finnes i dette tilfellet ved å løse følgende andregrads polynom:

$$\lambda_{NMP} = 6.991 \cdot T^2 - 6193 \cdot T + 1.848 \cdot 10^6 \quad (2.2)$$

og

$$\lambda_{H2O} = -3.345 \cdot T^2 - 259.3 \cdot T + 2.817 \cdot 10^6 \quad (2.3)$$

Energien som trengs for å varme opp luften kan finnes ved Ligning 2.4.

$$E_{torkingl} = \dot{m}_l \cdot C_{pl} \cdot (T_O - T_I) \cdot t_{torking} \quad (2.4)$$

Her er \dot{m} massestrømmen til luften, C_{pl} er varmekapasiteten til luft, T_O og T_I er utgang og inngangstemperatur, og $t_{torking}$ er tid. Den totale tørkeenergien er vist i Ligning 2.5.

$$E_{torking} = E_{torking_s} + E_{torking_l} \quad (2.5)$$

2.2.4 Oppsamling av løsemiddel

Det er spesielt viktig å få samlet opp løsemiddelet hvis en bruker helseskadelige eller miljøskadelige stoffer. Et veldig vanlig eksempel på dette er bruken av NMP. Følgende eksempel er utledet av Ahmed et al.(a)[14]. På grunn av at NMP er lettantennelig er det ønskelig å holde temperaturen og konsentrasjonen under antennesforholdet lave. Dette vil si en temperatur på 140°C og et NMP-innhold i luften på 1,1 %. Først blir NMPen fordampet ved bruk av konvektiv tørking. Deretter blir den varme luften kjølt ned ved bruk av én luft til luft varmeveksler, for å gjenbruke noe av energien i den varme luften før den kjøles ned ved vannkjøling og kondenserer. Mixen av NMP, vann, og hydrokarboner blir deretter destillert og skilt fra hverandre, for å ta vare på NMPen. Videre vil luften som nå inneholder en lav grad av NMP bli splittet i en utkaststrøm og en strøm som går til resirkulering. Utkaststrømmen går gjennom et zeolitt hjul hvor mesteparten av NMPen fester seg til hjulet, før luften sendes ut. Ren luft blir deretter tatt inn, varmet opp til 50°C, og sendt gjennom hjulet for å samle opp NMPen igjen. Deretter blandes den med luften som resirkuleres, som igjen går tilbake til tørking av katoden. På grunn av lettantenneligheten til NMP er det nødvendig å holde konsentrasjonen av NMP så lav som mulig i luften. Den letteste måten å gjøre dette på er å ha en stor luftstrøm. [17]

Utregningen av denne luftstrømmen vises i Ligning 2.6 og 2.7.

$$C_{NMP} = \frac{\dot{m}_{NMP}}{\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{NMP}} \cdot 10^6 \quad (2.6)$$

Her er C konsentrasjonen av NMP, og m_i er massen til de ulike stoffene, gitt i mol/s. Snur en på denne ligningen får en luftstrømmen:

$$\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{NMP} \cdot \left(\frac{10^6}{C_{NMP}} - 1 \right) \quad (2.7)$$

Videre brukes Ligning 2.7 for å finne ut hvor stor varmeveksleren som resirkulerer varmen skal være, eller hvor mye varme den må overføre. U er varmeoverføringskoeffisienten, A er arealet på varmeveksleren, mens LMTD er her den logaritmiske gjennomsnittstemperaturen. Mengde overført varme, \dot{Q} , finnes ved bruk av Ligning 2.8.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot LMTD \quad (2.8)$$

2.2.5 Kalandrering

Det neste steget i prosessen er kalandrering. Dette er en bearbeiding av materialer på et type valseverk som kalles kalender. Kalender har flere valser montert over hverandre, og benyttes for å bestemme den endelige porøse elektrodemikrostrukturen, forbedre den elektroniske ledningsevnen og elektrodeenergitettheten. Flere topp- og bunnvalser reduserer tykkelsen litt etter litt, og komprimeringskontroll sørger for forbedring av den aktive materialsammenhengen som er i folien. Prosessen er kontinuerlig, og kan ha hastigheter på 20 m/min og oppover. Den lineære belastningen kan nå 40 til 60 tonn. Dersom belastningen settes for høyt under kalandrering, kan det resultere i at foliene blir sprø og i verste fall brekker. [9]

2.2.6 Spalting, stabling og sveising

Spalting er en prosess uavhengig av celletypen. Her kuttet anoden og katoden til en bestemt størrelse. Spalting skjer ved hjelp av en maskin som enten benytter kniv- eller laserskjæring med hastigheter som når over 100m/min. Etter spalting rulles de sammen og transporteres i vakuumbokser til neste steg. Videre vil cella monteres i et tørrom. Før rullene transporteres hit, tørkes de på nytt som kveiler i et vakuumskap eller som ark under gjennomføring. De tørkes for at de skal kunne etterlate lite vann. [9]

Påfølgende steg i produksjonen av flat-celle er dekolering, som er produksjon av de individuelle anode- og katodeplatene. Denne prosessen kan foregå i et integrert samlebånd eller gjennom midlertidig oppbevaring av flere ark i magasiner. Påfølgende skjer en rengjøring som fjerner partikler fra elektrodeplatene, samt de avskårne partiklene fra kantene på elektrodeplatene fra dekoleringen. [9]

Etter dekolering følger stabling. Dette gjøres på en av to ulike måter: z-folding eller enkeltark-stabling. Z-folding innebærer at anode- og katodearket settes sidelengs inn i det Z-formede separatornett. Sistnevnte går ut på dekolering av separatoren og at de resulterende arkene herfra stables vekselvis med anode- og katodeplater. [9]

Etter montering av cella må elektrolytten fylles inn. Dette er en teknologisk krevende prosess som påvirker cellefunksjonaliteten i betydelig grad. Porevolumet til cellekroppen må være fuktet homogent med elektrolytt. Homogeniteten er et viktig parameter som påvirker cellens sikkerhet og levetid. Det er tynne sprekker på omtrent 200-300 μm mellom samlerfoliene som skal fylles. Sprekkene er dog ikke tomme, men fylt med elektrodemateriale samt separator. Elektrolytten må helles i sakte eller i flere omganger ettersom at hulrommet i cellehuset alt er fylt med cellekroppen. I porene finnes det gasser

som må fjernes før fylling for at de skal kunne fuktes med aktivt materiale og separator. I LIB benyttes elektrolytter i form av høyt konsentrerte løsninger av litiumsalt i polare, organsike løsemidler. Disse er svært hygroskopiske og derfor etsende. En elektrolytt kan også begynne å koke ved romtemperatur dersom trykket reduseres til vakuum. Dette kommer av koke-egenskapene hos ingrediensene i løsningsmiddelet, og kan forårsake uønsket elektrolyttskumming. [9]

2.2.7 Forming

Etter fylling av elektrolytten blir batteriene utladet. Forming er et steg i prosessen hvor cella lades fullstendig, og målet er å danne et essensielt lag kalt SEI (solid electrolyte interface). SEI dannes på grunn av nedbrytningen av elektrolytten som skjer på den negative elektroden. Når dette skjer brukes det litium fra elektroden, noe som videre reduserer kapasiteten til batteriet. Det er viktig at SEI gir elektrisk isolasjon samtidig som det slipper gjennom litium-ioner. Dersom SEI er ufullstendig, kan ytterligere dekomponering eller kapasitetsreduksjon på grunn av forbruk av enda flere litium-ioner forekomme. [9]

Dette steget er også for kvalitetsstyringstiltak, det første tilfellet hvor anoden, katoden, separatoren og elektrolytten kan testes. Forming skjer i lading-utladingsenheter med en individuelt kontrollert kanal per enhet. Det er ulike metoder for forming, og hvilken som benyttes avhenger av produsenten. Den tryggeste metoden, som også er den tregeste, går gjennom to komplette lading-utlading sykluser. Først en formingssyklus, og deretter en for kvalitetssikring. Den raskeste metoden er ikke helt fullstendig, og slutter å lade ved spenningsnivået hvor SEI formes. Dette betyr også at formingsprosessen ikke fullføres, og det skjer ingen kvalitetssikring av komponentene. Det er derfor nødvendig med en overordnet forseggjort prosess. Formingsprosessen kan vare opptil to dager, hvilket er en tid produsentene etterstreber å redusere. Energien som benyttes i formingen er betydelig, og det er derfor ønskelig med gjenvinning av elektrisk kraft eller prosessvarme. Etter formingen sendes batteriene videre til testing, som er det siste steget av produksjonen. Dette for å sjekke at de når ønsket standard før de sendes ut på markedet. [9]

2.3 Tørrom

Tørrom er en essensiell del av batteriproduksjon. Hvert steg i produksjonen krever enn viss luftfuktighet for å redusere sikkerhetsrisiko, samt for å optimalisere celleytelsen. Under fyllingen av elektrolytten er det veldig viktig å holde luftfuktigheten så lav som mulig, fordi elektrolytten vil reagere med fuktigheten som vil skape giftige gasser. Denne reaksjonen kan også fortsette etter batteriet er satt sammen, og kan dermed føre til degradering av

batteriet[9]. Fuktighet i anoden vil også kunne blokkere tilgangen til litium-ionene, og dermed også redusere kapasiteten til batteriet. Av den grunn er det laget anbefalinger for fuktighetsnivå, vist i Tabell 2.3. [14]

Tabell 2.3: Luftfuktighetsnivåer i batteriproduksjon.

Produksjonssteg	Relativ fuktighet	Duggpunkt	Temperatur	Renrom / Omgivelser
Slurry miksing Anode	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert
Slurry miksing Katode	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert
Coating Anode	<15 %	-8°C	22°C ± 2K	ISO 7
Coating Katode	<15 %	-8°C	22°C ± 2K	ISO 7
Kalandrering Anode	<15 %	-8°C	22°C ± 2K	ISO 7
Kaladrering Katode	<15 %	-8°C	22°C ± 2K	ISO 7
Cellemontering	<1 %	-40°C	22°C ± 2K	ISO 7
Fylling med elektrolytt	<1 %	-40°C	22°C ± 2K	ISO 7
Celleforming	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert
Cellealdring	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert
Testing og klassifisering	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert
Batteripakke- montering	45 % ± 15 %		22°C ± 2K	Kontrollert

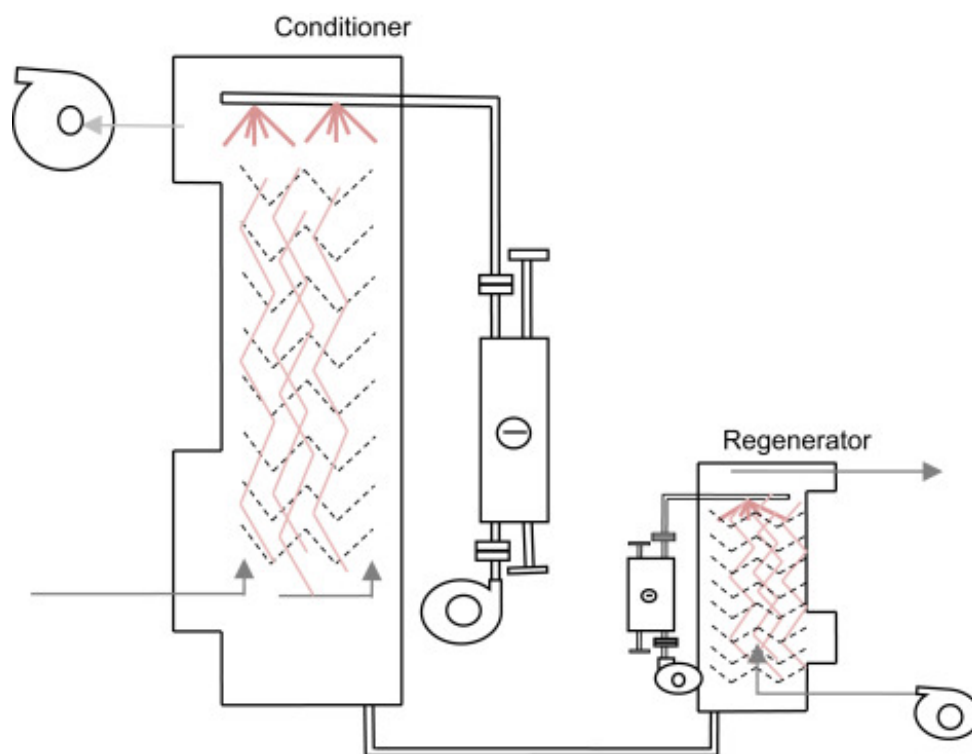
Tabell 2.3 viser at de to anbefalte nivåene er under 15 % for elektrodeproduksjon, og under 1 % for fyllingsprosessen. Disse nivåene er oppnådd ved å bruke renromsstandarden til ISO 7. Selv om det er ønskelig å ha så lav fuktighet som mulig for sikkerhet og cellekapasitet, er det også viktig å veie dette opp mot energien som må brukes for å tørke luften. Tørking av luft er en veldig energikrevende prosess, og ifølge Jinasena et al.[17] kan tørking av luft stå for opp mot halvparten av energiforbruket til batteriproduksjonen. Det er derfor ønskelig å optimalisere tørkingen av luft slik at det møter kravene til luftfuktighet, samtidig som det reduserer energiforbruket så mye som mulig. [14]

Det er flere variabler som må tas høyde for når et tørrom installeres. Først må alle vegger, tak og gulv tettes helt, slik at ingen luft kommer inn eller ut. Dette er viktig for å forhindre fuktig luft i å komme inn, men også for å forhindre den tørkede luften å lekke ut i og med at det er investert store mengder energi i å tørke den [9]. Det er også ønskelig å redusere antall personer i rommet til enhver tid over det som er høyst nødvendig. Dette er på grunn av fuktigheten et menneske vil ta med seg gjennom svette og pusting. Et menneske kan slippe ut 150g fuktighet i timen, og kan dermed påvirke hvor mye energi tørrommet

bruker [18]. Det finnes hovedsakelig to måter å tørke luft på: enten ved bruk av flytende tørkemiddel eller ved bruk av fast tørkemiddel. Sistnevnte brukes også ofte sammen med et roterende tørkemiddelhjul [19].

2.3.1 Tørkesystem for flytende tørkemiddel

Flytende tørkemiddel fungerer ved at luft pumpes inn i et rom hvor kaldt, flytende tørkemiddel blir sprayet over den fuktige luften. Dette gjør at det flytende tørkemiddelet tar til seg varme og fuktighet, og synker til bunnen. Samtidig blir den tørkede luften tatt ut i toppen. Tørkemiddelet som nå er varmere og fuktig, blir deretter sendt videre i et regeneratorkammer hvor det blir varmet opp for å fjerne vannet fra tørkemiddelet. Videre blir det igjen kjølt ned og transportert inn i det absorberingskammeret for å fullføre syklusen, som vist i Figur 2.2. [19]



Figur 2.2: Flytende tørkemiddelsystem

Dette designet inkluderer ofte en varmeveksler mellom absorberingskammeret og regeneratorkammeret, for økt energieffektivitet. Energibruken for et slikt system vil være avhengig av den nødvendige massestrømmen m_g av tørrluft som trengs, som igjen er avhengig av den ønskelige luftfuktigheten, samt omgivelsesluften. Utregning av energiforbruk kan gjøres ved å anta et flytende tørkemiddelsystem med motstrøms og «packed bed» design [20]. Varmeoverføringskoeffisienten blir da [17]:

$$h_d = \frac{d}{a} \cdot \dot{m}_1^e \cdot \dot{m}_g^f \quad (2.9)$$

Ligning 2.9 kan da brukes til å finne varmeoverføringskoeffisienten på gassiden h_g , eller koeffisienten for væskesiden h_l . For denne ligningen er d, e og f konstanter som er avhengige av hvilket tørkemiddel som brukes. a er grensflatearealet til tanken. m_l er massestrømmen til tørkemiddelet som vil være avhengig av hvilken massestrøm av tørr luft som er nødvendig. Massestrømmene er i dette tilfellet gitt i $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$. [17]

Ligning 2.10 brukes for å regne ut den termiske motstanden i prosessen. I dette tilfellet vil A_l og A_g være arealet som tørkemiddelet brukes over. Mens h_l og h_g vil være varmeoverføringskoeffisienten for henholdsvis gass -og væskesiden.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{h_l + A_l} + \frac{1}{h_g + A_g} \quad (2.10)$$

Den totale motstanden som ble regnet ut i Ligning 2.10 brukes deretter til å regne ut den totale effekten P_c , som trengs for å kjøle ned luften som vist i Ligning 2.11.

$$P_c = (T_{gi} - T_{li}) \cdot R_T \quad (2.11)$$

Her er T_{gi} omgivelsestemperaturen, og T_{li} er temperaturen på det nedkjølte tørkemiddelet. Tørkemiddeltemperaturen er i dette tilfellet bestemt ut i fra omgivelsestemperaturen og den ønskelig luftfuktigheten. Energien som trengs for å varme opp denne luften igjen kan finnes ved Ligning 2.12.

$$P_h = \dot{m}_g \cdot C_{pl} \cdot (T_{gr} + T_{go}) \quad (2.12)$$

For Ligning 2.12 er T_{gr} temperaturen inne i tørrommet, mens T_{go} er temperaturen på luften etter den er tørket, men før den skal inn i rommet. Denne temperaturen kan finnes ved bruk av Ligning 2.13.

$$T_{go} = T_{gi} - \frac{P_c}{h_g + A_g} \quad (2.13)$$

Den totale mengden energi kan deretter regnes ut ved å kombinere ligningene 2.11 og 2.12, vist i Ligning 2.14.

$$E_{torrom} = (P_c + P_h) \cdot t_{torrom} \quad (2.14)$$

Hvor t_{torrom} er tiden det tar å oppnå ønsket temperatur. Dette energibehovet tar ikke med energien som trengs for pumping, eller hvordan eventuelle tap i kjøling eller oppvarming vil se ut. Dette kan eventuelt korrigeres med en faktor for å justere ligningen etter reelle målinger.

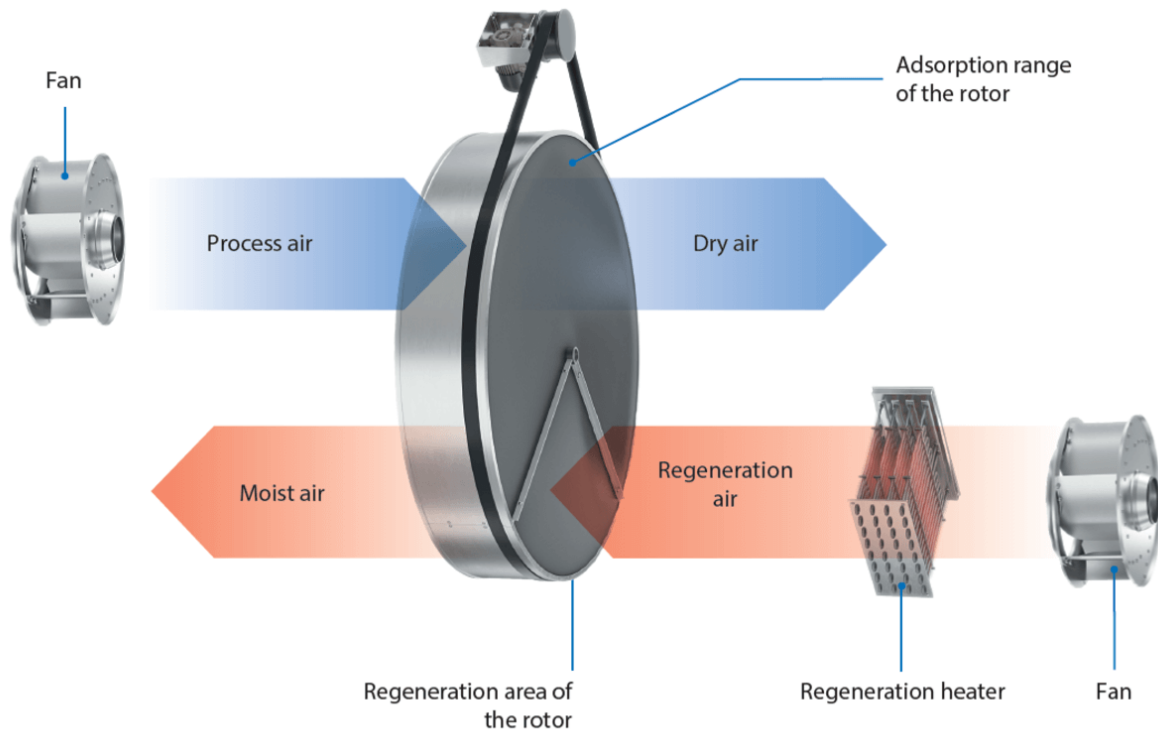
På grunn av at tørkemiddelet og luften er i direkte kontakt med hverandre, er det viktig når en bruker flytende tørkemiddel å bruke noe som ikke er skadelig for mennesker. Dette

er fordi rester av tørkemiddelet kan bli med i luften. En fordel med denne typen tørking er at det fjerner varme sammen med fuktigheten, og kan derfor være spesielt effektivt i varme og fuktige klima. For tørrere og kaldere klima vil det derimot være bedre å bruke fast tørkemiddel. En ulempe med flytende tørkemiddel er at det ikke klarer å oppnå like lav grad av luftfuktighet som faste tørkemiddel. [19]

2.3.2 Fast tørkemiddel

Det finnes flere typer tørksesystemer som utnytter faste tørkemiddel, avhengig av hva de skal brukes til. De tre vanligste typene er: «Solid packed tower system», «Multiple vertical bed system», og «Rotating desiccant wheel system». Her er sistnevnte den mest effektive på grunn av lavt trykkfall, lavt duggpunkt og kontinuerlig drift. Det kan også drives på forbrenning, spillvarme eller solvarme. Dette gjør at det er lettere å spare på energien, slik at man kan optimalisere energiforbruket til tørrommet. [19]

Et tørkehjul fungerer ved at den fuktige luften strømmer gjennom et hjul med fast tørkemiddel. Her adsorberes fuktigheten på overflaten til hjulet. Etter at luften er brukt blir den varmet opp, og deretter brukt til å fordampe fuktigheten som ligger igjen på hjulet. Denne tørkingen av hjulet kan kreve opp mot 150°C. Vanlige stoffer som blir brukt som tørkemiddel for roterende hjul er silikagel, zeolitt og litiumklorid. Av disse er det silikagel som er den mest optimale på grunn av at den har stor adsorberingskapasitet, samt at den ikke reagerer kjemisk med fuktigheten. Figur 2.3 viser hvordan et tørkehjulsystem kan se ut. [19]



Figur 2.3: Tørkehjulsystem
[21]

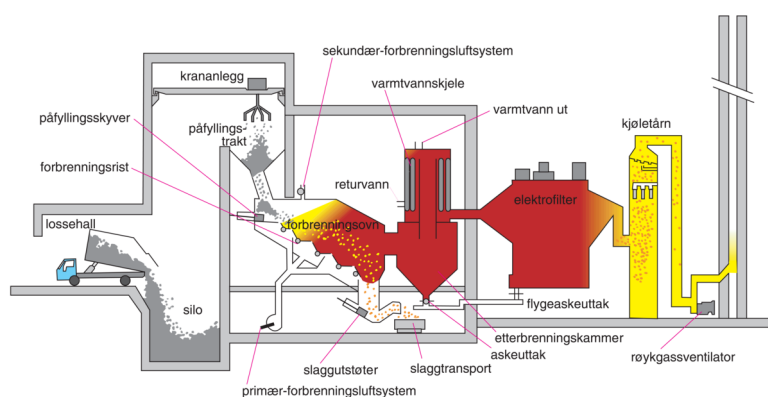
2.4 Forbrenningsanlegg

I Norge brukes forbrenningsanlegg for å kunne utnytte energien som ligger i restavfall, og bruke denne til å erstatte bruk av elektrisitet, olje og gass til oppvarming. Utnyttingen av restavfall er mer miljøvennlig enn deponering da det tar helse- og miljøskadelige stoffer ut av kretsløpet, mens deponering har et mye høyere utslipp av klimagasser. [22]

Under forbrenningsprosessen vil brenselet føres til en forbrenningsovn, hvor det blir fullstendig utbrent. Temperaturen i ovnskammeret kontrolleres for å unngå fordamping av tungmetaller og andre skadelige stoffer. Herfra går den opphetede røykgassen inn i kjelen, for å deretter kjøles ned. Denne prosessen produserer damp, hvilket ved hjelp av en turbin kan benyttes til å produsere strøm. Røykgassen blir filtrert for å renses for forurensninger som støvpartikler og tungmetaller, før den slippes ut av pipa. Ut av pipa kommer det vanndamp, i tillegg til gasser som karbon- og nitrogendioksid. Her er kretsløpet fullført, og forbrenningen resulterer i mulighet for utnyttelse av energi i form av varme og arbeid. [22]

2.4.1 Komponenter

Figur 2.4 viser en oversikt over et forbrenningsanlegg for avfall som benyttes i Norge og de ulike komponentene et slikt anlegg består av.



Figur 2.4: Forbrenningsanlegg for avfall, med varmtvannsproduksjon og elektrofilter [22]

2.4.1.1 Forbrenningssovn

Formålet med en forbrenningssovn er å forbrenne en gjenstand eller en type brensel så komplett som mulig, i tillegg til å oppnå høyst mulig temperatur. I bunnen av forbrenningssovnene ligger det riller. Formålet med disse er at materialet som skal forbrennes skal falle nedover i ovnen for å skape lufttrom. I et søppelforbrenningsanlegg skjer dette ved at rillene roterer, mens i et bioforbrenningsanlegg brukes det ofte et stempel. Dette stempelet fungerer ved at det beveger seg frem og tilbake i ulike nivåer. Det er også en åpning i stempelet som tilfører luft, og kjøler ned ristene slik at de ikke får for høy temperatur. Dette er basert på informasjon fra ekstern veileder hos Eidsiva. Temperaturen

i en forbrenningssovn når vanligvis rundt 850-1000°C. Ved en temperatur på 850°C vil alt avfall bli fullstendig utbrent. Det er viktig å holde en kontrollert temperatur i forbrenningssovnene for å unngå fordamping av tungmetaller og andre skadelige stoffer. [23]

2.4.1.2 Elektrofilter

Elektrofilter benyttes for elektrostatisk gassrensing. Dette er en metode for å fjerne røyk- og støvpartikler, eller dråper fra industrielle gasser. De fleste benyttes for å redusere utslippet av forurensende gasser til atmosfæren, men det kan også benyttes til prosessformål. Det brukes også for gjenvinning av bly, sink, tinn og kadmium. [24]

Et elektrofilter består av jordede oppsamlingselektroder i form av tynne stålplater, og utladningselektroder. Elektrodene er plassert i et filterhus av stålplater. Gassen som

skal renses sendes gjennom dette elektrofilteret, hvilket også medfører en nedgang i trykk på grunn av motstand i filteret. Partiklene får negativ ladning ved negative utladningselektroder, og vil trekkes til de jordede oppsamlingselektrodene. Hvordan partiklene fjernes fra oppsamlingselektrodene avhenger av om elektrofiltrene er tørre eller våte. Ved våte elektrofiltre blir elektrodene rensed ved spyling med vann, og ved tørre blir platene banket automatisk med hammer. Dette gjør at støvet løsner, og videre faller ned i en beholder. [24]

2.4.1.3 Kjølletårn

Kjølletårnet er den delen av anlegget som overfører overskuddsvarmen til luft. Denne nedkjølingen kan gjøres på ulike måter, da med eller uten bruk av vann, eller med en kombinasjon. [25]

I konvensjonelle kjøletårn tilføres det vann direkte til luften. Her skiller vi mellom to typer: åpne og lukkede, også kalt evoporative kondensatorer og fordampningskondensatorer. I et åpent kjøletårn kjøles vannet ned direkte med uteluft. Varmt vann kommer inn på toppen av tårnet, hvor det fordeles over et fyllmateriale. Luften vil blåses gjennom nedenfra og kjøle vannet. Videre samles vannet opp i et basseng, og vil derfra pumpes tilbake til kondensatoren. I et lukket kjøletårn sirkuleres vannet i en lukket krets. I denne kjølingsprosessen er vannet ofte blandet med glykol. Blandingen kjøles ned ved at luft blåses over kretsen og ut til omgivelsene. Kjølevannet er i åpen kontakt med denne. I tillegg benyttes det kjølevann som risler over sløyfa for å øke kjøleeffekten. [25]

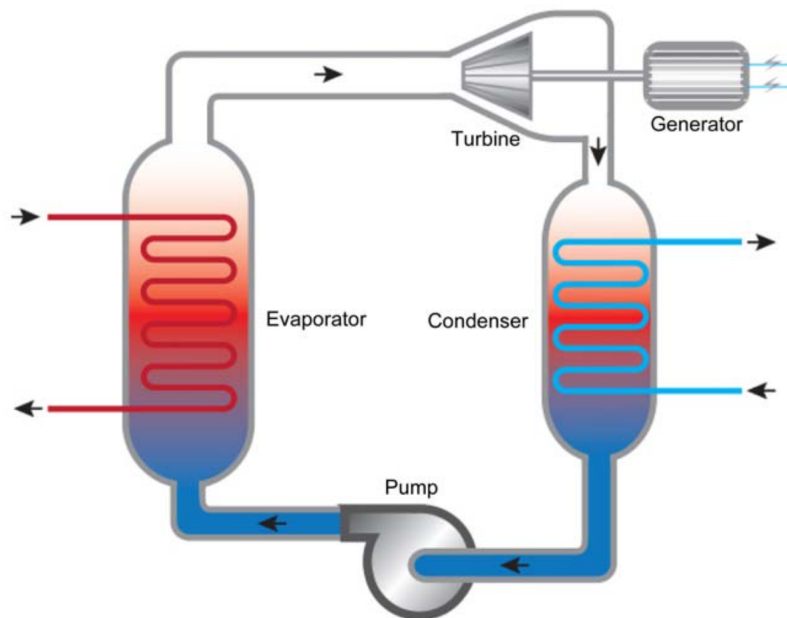
I tørrkjølere skjer nedkjølingen kun ved hjelp av luft, ikke av vann. Dette er dog mye mindre effektivt, hvilket innebærer at de er mer plass- og energikrevende enn konvensjonelle kjøletårn som benytter vann. De vil også lage mer støy da behovet for viftekapasitet er større. Noen tørrkjølere leveres med faste dyser som spyr vann inn i bunnen av viftene, mens andre må i flere tilfeller sprayes med vann. Dette er for at effekten skal øke. I disse tilfellene vil anlegget da ikke lengre betraktes som en tørrkjøler, men som et lukket kjøletårn. [25]

Adiabatisk kjøletårn er et kjøletårn som fungerer som en tørrkjøler i perioder med mindre kjølebehov, men som også benytter vann for å kjøle ned tilførselslufta dersom det er behov for det. [25]

2.4.2 Rankine syklus

I denne oppgaven fokuseres det på forbrenning av biomasse, ikke søppel. Forbrenningsanleggene er tilsvarende like, bortsett fra selve materialet som forbrennes.

Ved omdanning av varme til elektrisk energi i et biokraftverk benyttes ofte teknikken som omtales som en rankine-syklus, vist på Figur 2.5. Dette er en idealisert termodynamisk syklus, hvor tilført varme sørger for at ei væske, vanligvis vann, omdannes til damp under høyt trykk. Denne dampen vil via en turbin omdannes til arbeid, før dampen igjen blir nedkjølt og kondensert, og videre kan benyttes i en ny syklus. [26]



Figur 2.5: Illustrasjon av Rankine-syklus [27].

Ved beregning av arbeidet som utføres av turbinen, samt varmen som systemet produserer, benyttes verdier hentet fra termodynamiske tabeller [28]. Det er ikke mulig å hente ut alle verdiene direkte fra tabellen, noen må beregnes. Dette gjøres med ligningene 2.15 og/eller 2.16.

$$h = u_f(T) + p + v_f(T) \approx h_f(T) + v_f(T) \cdot (p - p_{sat}(T)) \quad (2.15)$$

Her er h entalpi, u_f er spesifikk indre energi i væskeform, p er trykk og v_f er spesifikt volum i væskeform, h_f er spesifikk entalpi i væskeform og p_{sat} er det mettede trykket til den gitte temperaturen T .

$$h = v \cdot \Delta p \quad (2.16)$$

Her er h også entalpi, v er spesifikt volum og Δp er endring i trykk.

Videre brukes disse verdiene til å finne mengden varme og arbeid som går ut og inn av det gitte anlegget. For å finne dette kan ligningene 2.17, 2.18, 2.19 og 2.20 under benyttes.

$$\dot{W}_t = (h_{inn} - h_{ut}) \cdot \dot{m} \quad (2.17)$$

Her er W_t arbeidet som går ut av turbinen, h_{inn} er entalpien før turbinen og h_{ut} er entalpien etter turbinen. \dot{m} er massestrømmen i systemet, denne er lik i alle prosessene.

$$\dot{Q}_{ut} = (h_{inn} - h_{ut}) \cdot \dot{m} \quad (2.18)$$

Her er Q_{ut} varmen som går ut av kondensatoren, h_{inn} er entalpien før kondensatoren og h_{ut} er entalpien etter kondensatoren.

$$\dot{W}_p = (h_{ut} - h_{inn}) \cdot \dot{m} \quad (2.19)$$

Her er W_p arbeidet som går inn i pumpa, h_{inn} er entalpien før pumpa og h_{ut} er entalpien etter pumpa.

$$\dot{Q}_{inn} = (h_{ut} - h_{inn}) \cdot \dot{m} \quad (2.20)$$

Her er Q_{inn} varmen som går inn i kjelen(e), h_{inn} er entalpien før den første kjelen, og h_{ut} er entalpien etter den siste kjelen.

2.5 Kombinert varme- og kraftsystem

Kombinerte varme- og kraftsystemer, forkortet til CHP, er systemer som utnytter både elektrisitet og varme fra en enkelt energikilde. Disse systemene vil, sammenlignet med enkle forbrenningsanlegg, oppnå en høyere virkningsgrad ettersom den også benytter varmen som produseres. Et CHP-anlegg vil kunne nå en virkningsgrad oppmot 90 %, mens et vanlig forbrenningsanlegg som benytter kull, olje eller restavfall vil nå 60 %. [29]

Elektrisitet kan relativt enkelt transporteres raskt og effektivt. Varmeenergi på den andre siden, kan ikke i samme enkelthet transporteres økonomisk og praktisk. Varme kan transporteres over større avstander, men det aller meste av varme benyttes nært stedet hvor den genereres. Dette er grunnlaget for ett av nøkkelementene i et systemdesign for et CHP-anlegg. Grunnleggende for å kunne oppnå optimal effektivitet er å kartlegge etterspørselen av varme, og deretter designe anlegget for å komme behovet i møte. Elektrisiteten som genereres ut i fra anlegget kommer også godt til nytte, men i denne forstand som et verdifullt bi-produkt. [29]

CHP-anlegg er en teknologi som benytter seg av ulike energikilder, da både fornybare og ikke-fornybare. Omtrent alle CHP-systemer baseres på bruk av varmemotorer for å generere elektrisk kraft. Disse motorene inkluderer dampturbiner, gassturbiner og en rekke stempelmotorer. Det skilles mellom to typer CHP-anlegg: toppsyklus og bunnsyklus. I førstnevnte benyttes det tilførte drivstoffet primært til generering av elektrisitet, og resterende varme etter generering blir en tilleggsapplikasjon. Denne varmeenergien kan

være varme av kvalitet som egnes til å skape damp, for direkte bruk i industrielle prosesser, eller det kan være av lavere kvalitet som kun egner seg for varmtvannsproduksjon og romoppvarming. Dette avhenger av hvilket type generasjonssystem som er i drift. Sistnevnte er gjenvinning av avfallsenergi, og er et system hvor drivstoffet først og fremst benyttes for å produsere varme. Varmen som er produsert vil vanligvis benyttes i en industriell prosess som krever svært høye temperaturer, eller enorme mengder varme. Videre vil all tilgjengelig energi fra prosessen som ikke utnyttes som varme, genereres til elektrisitet. Denne energien forekommer ikke bare i varme, men også i brennbare gasser. Bunnsyklussystemer har ikke behov for å forbruke ekstra drivstoff for å kunne produsere elektrisitet i tillegg til varme, hvilket gjør de til svært attraktive systemer. [29]

2.5.1 Dampturbin

En dampturbin utnytter høy temperatur og høytrykksdamp til å produsere kraft. Kraften som blir produsert vil i de fleste tilfeller være elektrisk kraft ved bruk av en generator. Denne dampen blir matet fra en koker som kan driftes på flere typer materiale. Det vanligste i verden i dag er kull, olje og gass, men også andre varmekilder kan brukes, slik som geotermisk energi eller biomasse. [29]

I en dampturbin vil dampen kunne nå veldig høye hastigheter som det ikke er mulig for kun én turbin å ta opp. Høy hastighet i turbinen vil gi lav virkningsgrad. Det settes derfor flere turbiner i serie slik at energien fordeles utover flere steg. For et vanlig kraftverk oppnås det best mulig effekt fra turbinen hvis temperatur- og trykkfallet er så stort som mulig. Derimot, hvis turbinen brukes i et CHP-anlegg er det hensiktsmessig at det fremdeles er noe energi i dampen ved turbinens utgang. Det er også mulig å ta ut damp ved en ønsket temperatur underveis i turbinløpet for å bruke til andre formål, for eksempel i industri. [29]

Det benyttes hovedsakelig tre typer dampturbiner: baktrykk dampturbin, uttaks dampturbin og kondenseringsturbin. Baktrykk dampturbin er en toppsyklusturbin hvor dampen fortsatt inneholder mye energi etter en har gått gjennom turbinen. Denne turbinen egner seg for prosesser som fortsatt skal gi høykvalitet termisk energi etter kraftproduksjon. Uttaks dampturbin er vanligvis en toppsyklus hvor det tas ut damp ved spesifikke temperaturer underveis. Hvor denne hentes ut er avhengig av hvilken temperatur en trenger. Kondenseringsturbin er en bunnsyklus hvor det allerede er hentet ut varme fra dampen før den går gjennom turbinen. Dette betyr at den kan hente ut all den varmen den klarer gjennom turbinløpet. Hvilken av disse turbinene som benyttes avhenger av hva det skal leveres energi til, og formålet til forbrenningsanlegget. I dag brukes dampturbiner i kombinasjon med CHP-anlegg hovedsakelig av industrien. De vanligste

industriene er papir-, kjemisk-, gjødsel- og petroleumsindustri. For større fjernvarmeanlegg er det vanligere å bruke en gassturbin ettersom denne har høyere virkningsgrad enn dampturbinen. [29]

2.5.2 Kjele, pumpe og kondensator

I tillegg til dampturbinen er det tre andre hovedkomponenter i et CHP-anlegg: fordamper, pumpe og kondensator. Her leverer pumpe flytende vann til kjelen som alt er oppvarmet. Denne omdanner vann til overopphetet damp, som igjen brukes til å drive turbinen [26]. Kondensator er et apparat som benyttes til generering av damp. Den gjør det mulig med varmeveksling mellom to væske- eller gasstrømmer med ulik temperatur. Overføring av varme skjer ved at den ene strømmen ledes gjennom rør som overstrømmes av den andre, enten på langs eller på tvers. Rask og turbulent strøm gir god varmeveksling. Dersom komponentene ikke er blandbare, kan de strømme forbi hverandre i direkte kontakt. [30]

2.6 Biomasse

Forbrenningsanlegg kan også driftes på forbrenning av biomasse. Biomasse er en fellesbetegnelse på brensel som stammer fra trær og planter, gjødsel, skogsavfall som bark og flis, og annet biologisk avfall. Biomasse er, sammenlignet med fossilt avfall, dannet i sanntid. Det er utgangspunktet til bioenergi, som da på grunn av opprinnelsen sees på som en fornybar energikilde. [31]

Frem til utnytting av vannkraft og fossile energikilder har biomassen vært verdens viktigste energikilde. Per dags dato har de fleste industriland en bioenergiandel på oppmot 15 %. I Norge dekker energien som kommer fra biomasse omtrent 4 % av det totale energibehovet. Den aller største andelen av biomasse som benyttes i Norge i dag er i form av forbrenning av ved i private husholdninger, men det er i nyere tid etablert flere biokraftverk. Disse er hovedsaklig tilknyttet trefordelingsindustrien og avfallshåndtering. [32]

I Norge er det store mengder tilgjengelig skog. Hele 37,4 % av landet er dekket. Ut av denne andelen er 68,4 % økonomisk drivverdig, altså skog hvor minst 0,1 m³ med tømmer kan produseres per dekar [33]. Rått tømmer hogges til flis. Denne kan videre bli tørka med varme, finmalt i ei hammermølle, for så å bli presset sammen til pellets under høyt trykk. [34]

Ligning 2.21 brukes til å finne energitettheten i biomassen.

$$H_e = 5,32 - 0,06 \cdot F_r \quad (2.21)$$

Her er 5,32 nedre brennverdi for absolutt tørt brensel, og 0,06 en konstant[35]. F_r er

fuktighetsprosenten i biomassen.

2.6.1 GROT

GROT er en samlebetegnelse for greiner og topper fra hogstavfall. GROT kan ha et fuktnivå på over 50 %, og på grunn av dette blir ofte store deler av greinene og toppene fra hogsten lagt igjen i hogstfeltet. Ifølge et estimat gjort av NIBIO [36] blir omtrent 6 millioner faste kubikkmeter liggende igjen etter hogst, av dette utgjør GROT omtrent 3,7 millioner. Dette antas å utgjøre omtrent 25 % av den totale hogstmassen. Dette er da energi som per i dag ikke blir utnyttet, eller som blir utnyttet i svært liten grad. [37]

2.6.1.1 Tørkesystemer

De våte trerestene tørkes ved hjelp av ulike tørkesystemer for biomasse. Vi skiller hovedsaklig mellom fem ulike systemer: båndtørker, roterende tørker, dampdreven roterende tørker, tørker med fluidisert lag under trykk og pneumatisk damptørker. Aktuelt system for tørking av GROT er hovedsaklig pneumatisk damptørker, men båndtørker kan også benyttes dersom det foreligger et overskudd av lavverdig damp eller varmt vann tilgjengelig på anlegget. [38]

For å beregne nødvendig mengde energi som trengs for å tørke GROTeT, må en vite hvor mye vann brenselet består av. Dette beregnes ut i fra Ligning 2.22.

$$\frac{\text{torrvekt}[kg/m^3] - x}{\text{torrvekt}[kg/m^3]} = F_r \quad (2.22)$$

Her tilsvarer x mengden vann i brenselet, og F_r tilsvarer den totale fuktighetsprosenten.

3 Metode

Denne delen tar for seg tilnærmingene og ulike data som er brukt, basert på den underliggende teorien som ble gitt i Avsnitt 2. Som basis for denne oppgaven ble det tatt utgangspunkt i produksjon av 5 GWh EV batteri i året med tolv celler i hver modul, og åtte moduler per batteripakke. Batteriet som det ble valgt å ta utgangspunkt i er NMC333 ettersom dette er et batteri det er gjort omfattende undersøkelser på tidligere, hvilket gir et godt datagrunnlag.

3.1 Systembeskrivelse

Opgaven er hovedsaklig basert på to systemer: batterifabrikken og forbrenningsanlegget. For å produsere et LIB må først slurryen for elektroden mikses. Dette skjer ved å blande aktivt materiale, konduktivt materiale, tilsetningsstoffer, bindemiddel og løsemiddel. Dette løsemiddelet vil i dette tilfellet bestå av NMP for katoden, og vann for anoden. Deretter smøres dette utover strømlederne som består av aluminium for katoden, og kobber for anoden. Deretter må elektroden tørkes. Her fordampes vann og NMP slik at det ikke er noe løsemiddel igjen i elektroden. Denne prosessen er beskrevet mer detaljert i Avsnitt 3.2.2. Videre går elektroden gjennom en kalandreringsprosess hvor elektroden presses for å redusere tykkelsen, men samtidig beholde porøsiteten. Batteriet legges deretter i pakken sin hvor det fylles opp med elektrolytt. Strøm kjøres gjennom batteriet for å etablere en SEI. Deretter går batteriet til lagring og testing. Her er hovedfokuset lagt på oppsamlingen av NMPen og drifting av tørrrommet, i og med at det er disse som har det største energibehovet. Da spesielt med tanke på termisk energi. Forbrenningsanlegget er basert på et allerede eksisterende søppelforbrenningsanlegg, som driftes av Eidsiva. Her er hovedfokuset på brenselet som går inn i forbrenningsovnen, hvor mye kraft som skal produseres av turbinen og termisk energi fra kondensatoren. Det er og lagt fokus på typen biomasse som skal brukes, da hovedsaklig flis og GROT.

Som basis for beregningene av mengde NMP og kostnader knyttet til batteriproduksjonen ble det brukt et excel spreadsheet som heter Batpac. Batpac er et modelleringsprogram som brukes for å beregne kostnadene knyttet til produksjon av LIB [39]. Det brukes også for å se på hvordan effekt og energi påvirker kostnadene for produksjonen. For denne rapporten brukes Batpac hovedsakelig som et verktøy for å danne en basis for materialsammensetningen av et LIB, samt materialbruken som trengs for en produksjon på 5 GWh. Beregningene som blir gjort på energibruken under produksjonen vil videre legge grunnlaget for dimensjoneringen av bioforbrenningsanlegget.

3.2 Litium-ion batteri

Som nevnt tidligere er det antatt en stor økning i produksjonen av LIB i fremtiden. Denne veksten er derfor avhengig av å forbedre blant annet kostnadene, energieffektiviteten og bærekraften til batteriene. Dette gjelder både under selve produksjonen og til det ferdige produktet. Små endringer i produksjonen av elektroden i et LIB kan ha en stor betydning på egenskapene til det ferdige batteriet. Derfor er det viktig å studere de ulike mulighetene som finnes, slik at man benytter det som er best egnet for det ønskelige produktet. [40]

3.2.1 Blanding av elektrodeslurry

Når man velger løsemiddel som skal brukes i et batteri er det flere viktige faktorer som må bli tatt i betraktning. Ifølge MacKeen [41] er noen av disse: innvirkning på viskositet av belegg, fordampningshastighet og damptrykk, løselighet av polymerer, stabilitet ved spredning, overflatespenning, brennbarhetsgrense og sikkerhet, samt kostnad og miljøpåvirkning. Noen alternativer til løsninger som kan brukes er N-Metyl-2-pyrrolidon (NMP), Dimetylformamid (DMF), Dimetylacetamid (DMAC) og Dimetylsulfoksid (DMSO). Et annet alternativ er også vann, som er det løsemiddelet som er brukt i de fleste prosesser [40]. Tabell 3.1 under viser de ulike løsemidlene og deres egenskaper.

Tabell 3.1: Kjemiske og fysiske egenskaper til ulike løsningsmidler ved $T=20^{\circ}C$ [40].

Løsemiddel	Smeltepunkt [$^{\circ}C$]	Kokepunkt [$^{\circ}C$]	Dipolemoment	Dielectric konstant	Densitet [g/cm^3]	Viskositet [$10^{-3}Pas$]	Flashpoint [$^{\circ}C$]
Vann	0	100	1,9	80,1	1	0,89	N/A
NMP	-24	202	4,1	32	1,033	1,85	96,67
DMF	-61	153	3,8	37	0,944	0,80	58
DMAC	-20	166	3,7	38	0,942	2,14	63
DMSO	18,4	189	3,9	47	1,092	2,00	95

Vann er et løsemiddel som både kan brukes i produksjon av anoden og katoden. CMC, Karboksymetylcellulose, er et bindemiddel som kan brukes i anodeproduksjon med høy vann-blandbarhet [42]. I katodeproduksjonen brukes hovedsakelig NMP som løsemiddel og et PVDF-bindemiddel med dårlig vann-blandbarhet [40].

3.2.1.1 Vann

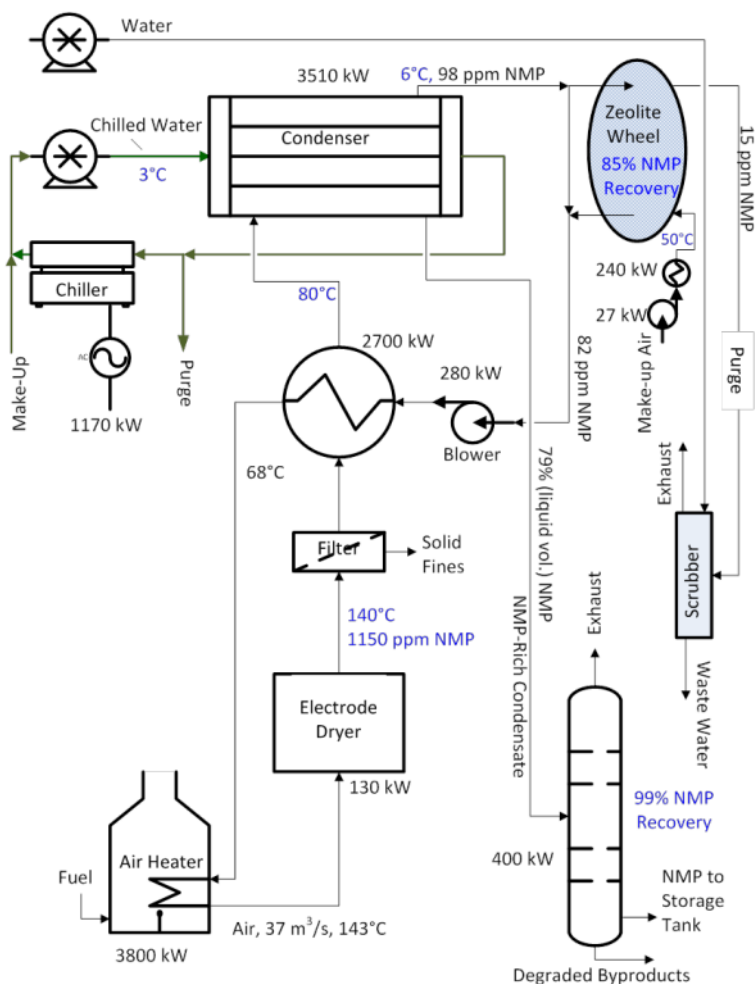
Hovedproblemene med å bruke en blanding av vann i katodematerialet har vært følgende: lekkasje av litium-metall [43], dårlig fukting av hydrofobt karbon [43, 44], korrosjon av aluminium-strømleder [45, 46], reaksjoner med nikkel [40] og agglomerasjoner [40]. Katodene med LFP har ofte færre problemer i kontakt med vann på grunn av deres beskyttende karbon-belegg og deres olivinstrukturer som gjør det mulig å kunne re-interkalere utlutet litium-metall [43].

3.2.1.2 NMP

NMP er brannfarlig, hvilket introduserer ytterligere produksjons- og sikkerhetsbegrensninger. I tillegg er det potensielle helsefarer og toksitetsproblemer med stoffet. På grunn av dette er industrien forpliktet til å implementere et kostbart NMP-gjenopprettingstrinn etter fordamping. Dette har forårsaket omfattende forskning på den vandige behandlingen av forskjellige katodematerialer og bindemidler. [40]

3.2.2 Tørking av NMP

For tørking og oppsamling av NMP ble det valgt å bruke konvektiv tørking. Grunnen til dette er at kombinasjonen av forbrenningsanlegget og batterifabrikken vil gi stor tilgang på termisk energi. Dette gjør at det er ønskelig å bruke direkte termisk energi der det er mulig for å redusere kostnader. Som basis for beregningene av tørking ble det tatt utgangspunkt i et anlegg likt det Ahmed et al.(a) brukte som vist i Figur 3.1.



Figur 3.1: System for tørking og samling av NMP [14]

Dette systemet er beskrevet i Avsnitt 2.2.3, og tar utgangspunkt i et konvektivt

tørkesystem. Her vil variablene være temperaturer, areal på varmevekslere, samt volum av luftstrøm og konsentrasjon av NMP. Selv om det i en artikkel fra Emil Oppedgaard et al. [47] ble vist at å bruke trestegs konvektiv tørking ga lavere energiforbruk, er det for simplisitetens skyld kun brukt en-stegs tørking som basis for denne oppgaven. Den avgjørende faktoren for størrelsen på dette anlegget er mengden NMP som må fordampes. Denne mengden er basert på beregninger gjort av Batpac, som ved en produksjon på 5 GWh vil kreve fordampning av 4,6 millioner kg NMP. Tabell 3.2 viser tallene som ble brukt for beregningene ved dette anlegget.

Tabell 3.2: Parametere for utregning av energibehov til tørking

\dot{m}_{NMP} [kg/år]	4,617
C_{NMP} [ppm]	1150
$C_{p_{vann}}$ [J/g·K]	4,182
C_{p_l} [J/g·K]	1,007
$C_{p_{NMP}}$ [J/mol·K]	180,650
$U_{varmeveksler}$ [W/m ² ·K]	5,373
$U_{kondensator}$ [W/m ² ·K]	13,673
T_{ute} [°C]	15,000
$T_{torrluft}$ [°C]	143,000

For å kunne regne på effekt- og energibruken til tørkingen er det gjort noen antagelser. Den første er at varmekapasiteten til vann, luft og NMP ikke forandrer seg med temperatur. Varmekapasiteten til disse stoffene baseres på gjennomsnittet mellom den høyeste og laveste temperaturen i systemet. Det antas også at fuktigheten i omgivelsesluften ikke påvirkes av temperatur, slik at fuktigheten ved 15°C er den samme som ved 25°C. Videre antas det at varmeveksleren som brukes er lik den brukt i Ahmed et al.(a) [14], og har derfor også samme varmeoverføringskoeffisient. Etersom de mindre komponentene ikke utgjør veldig mye av det totale behovet, samt at de er vanskeligere å regne på, blir det brukt en faktor for å beregne disse. For nedkjøleren og destilleringstanken blir faktoren basert på forholdet mellom kondensatoren i Figur 3.1 og kondensatoren i denne oppgaven. Blåseren ganges med en faktor basert på størrelsen til varmeveksleren. Disse faktorene er gitt ved symbolet α .

Den definerende faktoren for størrelsen på tørkeanlegget er mengden NMP som skal fordampes. Basert på denne mengden brukes Ligning 2.6 for å finne mengden vann og luft som må varmes opp for å oppnå ønsket konsentrasjon av NMP i luften. Videre dimensjoneres varmeveksleren slik at luften som varmes opp blir 68°C. Basert på data fra Ahmed et al.(a)[14] så vil 93 % av energien som trengs for å kjøle ned luften i kondensatoren gå til sensibel varme, mens 7 % da vil brukes til latent varmekjøling. Dette brukes for å regne ut den totale størrelsen på kondensatoren.

3.2.3 Tørking av vann

Ved å bruke vann som løsemiddel i anoden spares det mye energi i tørkeprosessen. Basert på data fra Susarla et al.[48] vil det kreve ti ganger mindre energi å tørke vann enn det krever å tørke NMP. Det antas at dette er basert på en lik mengde vann og NMP. For å tilpasse dette til dette anlegget må det derfor tas høyde for at det brukes mindre løsemiddel for anoden enn det gjør for katoden. For å finne energimengden som kreves for å tørke anoden deles derfor katodetørkingen på 10, og ganges med forholdsfaktoren mellom mengde NMP og mengde vann.

3.3 Tørrom

Tørrom er en essensiell del av batteriproduksjonen. Uten å først fjerne fuktigheten i luften vil det være stor sikkerhetsrisiko knyttet til bruk av elektrolytt, samt batteriet vil degraderes raskere. For å oppnå denne tørre luften blir det tatt utgangspunkt i et flytende tørkemiddelsystem likt det som ble beskrevet i Avsnitt 2.3.1. Her vil det for enkelthetens skyld kun bli sett på energien som kreves for å varme opp luften og tørkemiddelet, samt kjøle ned tørkemiddelet igjen. Reelt sett vil det også være elektrisitet som kreves for å drifte dette systemet, blant annet ved en vifte, men dette blir neglisjert. Data for dette systemet blir basert på en rapport fra Guddingsmo et al.[49]. I denne rapporten så de på bruken av varmevekslere og varmpumper i tørkesystemene og tørrommet for å redusere den nødvendige termiske energien. Deres rapport brukte et MER nettverk for å redusere energibruken i hele anlegget, men for denne rapporten blir det tatt utgangspunkt i at den eneste varmeveksleren for tørrommet går mellom den kalde og varme strømmen med flytende tørkemiddel. Rapporten til Guddingsmo et al.[49] var på 530 MWh årlig. For å dimensjonere det til å passe til et anlegg på 5 GWh blir det brukt en skaleringsfaktor på 9,434 for størrelsen på strømmene. Alle beregninger for dette anlegget er basert på ligningene i Avsnitt 2.3.1. Luftstrømmen er dimensjonert for volumet som skal dekkes samt antall ansatte som skal jobbe på anlegget. Tørkemiddelet som blir brukt er kalsiumklorid. Data for denne utregningen er vist i Tabell 3.3

Tabell 3.3: Tørrom parametre

Strøm	Volumstrøm [kg/s]	Varmekapasitet [kJ/kgK]	Temperaturrendring [°C]
Tørkemiddel kald strøm	5,241	3,710	6-100
Tørkemiddel varm strøm	5,241	3,710	78-25
Luftstrøm tørrom	83,857	1,007	5-23

3.4 Energibehovet ved LIB-produksjon

Tørkeprosessen og energien som går til tørrommet er de mest energikrevende prosessene i LIB-produksjonen. Derfor vil hovedberegningen på energibehovet rundt produksjonen av et LIB være innad de stegene som skjer under tørking og opprettholding av tørrommet. De resterende stegene, som står for om lag 4 % av det totale energibehovet, vil bli basert på tidligere tall fra en artikkel av Jinasena et al.[17]. Disse tallene er presentert i Tabell 3.4 under.

Tabell 3.4: Tall om energibehovet til de ulike prosessen i en LIB-produksjon.

Komponenter	Prosessteg	Energibehov [Wh/ Wh_{bat}]
Anoden	Miksing	0,036
	Belegg	0,008
	Tørking	5,246
	Kalandrering	0,001
	Spalting	0,00
Katoden	Miksing	0,066
	Belegg	0,008
	Tørking	16,337
	Kalandrering	0,001
	Spalting	0,00
Celle	Winding	0,00
	Fylling	0,001
	Forming	1,473
	Tørrom	21,305
	Gulvvarme	0,128

3.5 Kostnader

Kostnadene for materialene knyttet til batteriproduksjonen hentes ut i fra Batpac, og dimensjoneres for å passe til dette anlegget. Det regnes kun på materialkostnadene og strømkostnadene, ettersom materialkostnadene antas å være like over alt og strømkostnadene er tilpasset lokale priser. Kostnader for lønninger, arealbruk og diverse antas å variere med lokasjon og er derfor ikke med i beregningene. Tallene vist i tabell 3.5 viser kostnadene for innkjøp av materiale. Disse tallene er hentet 08.03.22 fra Batpac.

Tabell 3.5: Materialkostnader

Materialkostnader	Pris [NOK]
NMC333 [Kr/kg]	235,875
Carbon black [Kr/kg]	64,75
PVDF [Kr/kg]	138,75
NMP [Kr/kg]	24,975
Grafitt [Kr/kg]	92,5
Anode konduktivt materiale [Kr/kg]	64,75
CMC/SBR [Kr/kg]	92,5
Aluminiumsfolie [Kr/m ²]	1,85
Kobberfolie [Kr/m ²]	11.1
Separator [Kr/m ²]	8,325
LiPF6 [Kr/L]	92,5

Kraftprisene vist i Tabell 3.6 er basert på norske kraftpriser fra 2021 hentet fra SSB [50]. Disse prisene er et gjennomsnitt basert på kraftprisene fra hvert kvartal. Prisene for kraft til industrien skilles i to kategorier: vanlig industri og kraftintensiv industri. For SSB sine data er kraftintensiv industri hovedsakelig bestående av papir, kjemi og metallindustri. Kraftintensiv industri for SSB ligger mellom 675 og 272 MWh/MNOK, som er basert på tall fra 2007 [51]. I og med at produsert verdi er ukjent, ble det valgt å bruke begge kraftprisene.

Tabell 3.6: Kraftkostnader

Kraftkostnader	Pris [Øre/kWh]
Industri	67,225
Kraftintensiv industri	37,750

For beregningene av kostnadene knyttet til energiforbruket i løsemiddeltørking og oppsamling blir det antatt at kondensatoren ikke har noen kostnader knyttet til drift annet enn nedkjølingen av vann, som ligger under nedkjølingskomponenten. For initielle kostnadsberegninger antas det at den termiske energien blir supplert av kraftnettet, ikke bioforbrenningsanlegget. Tallene i Tabell 3.6 er basert på nasjonale tall, men vil i realiteten variere fra fylke til fylke.

Tabell 3.7: Materialforbruk per år

Materiale	Mengde/år
NMC333 [kg]	9 041 045
Carbon black [kg]	384 725
PVDF [kg]	192 363
NMP [kg]	4 665 743
Grafitt [kg]	483 936
Carbon additive anode [kg]	100 828
CMC/SBR [kg]	100 828
Vann [kg]	2 419 861
Aluminium [m ²]	15 885 886
Kobber [m ²]	16 676 954
Separator [m ²]	28 121 582
Elektrolytt [L]	2 653 304

Mengden materiale vist i Tabell 3.7 ble hentet ut fra Batpac. Dette er tilpasset en årlig produksjon på 5 GWh, med 100 000 batteripakker produsert, hvor hver pakke består av 96 celler.

3.6 Bio

I oppgaven skal varmen som produseres i et bio-forbrenningsanlegg benyttes til batteriproduksjon, samtidig som det skal levere høytrykksdamp og energi til et anlegg som tørker GROT. Forbrenningsanlegget baseres på bioenergi, hvor det tas utgangspunkt i at det brennbare materialet som benyttes hovedsaklig er GROT etter tørkeprosessen, samt noe flis. Pellets er også en mulig energikilde, men ikke førsteprioritert da det er dyrt sammenlignet med GROT og flis[52].

3.6.1 Tilgjengelig materiale

For at forbrenningsanlegget skal kunne produsere nok varme er det avhengig av tilstrekkelig med brennbart materiale. I Norge er det store mengder tilgjengelig skog. Hele 37,4 % av landet er dekket. Ut av denne andelen er 68,4 % økonomisk drivverdig, altså skog hvor minst 0,1 m³ tømmer kan produseres per dekar. Det tas utgangspunkt i at materialet som forbrennes i anlegget kommer fra nærtliggende pellets- og flisproduksjon. I Innlandet ble det i 2019 avvirket 4,4 millioner m³ tømmer, hvilket gir et godt utgangspunkt for kortreist biomasse. [33, 53]

Pellets og flis har en energitetthet på 5.3 kWh/kg for bartrevirke, og 5.25 kWh/kg for lauvtrevirke. Det tas derfor et anslag, og antas en total energitetthet lik 5.28 for biomassen som benyttes som utgangspunkt i denne oppgaven [54]. Pellets har et fuktinnhold på under 10 %, mens flis som benyttes i større forbrenningsanlegg kan ha en fuktighet på over 50

% [55, 56]. I Tabell 3.8 er det gitt en oversikt over energitettheten til de ulike biomassene ut i fra andelen fukt.

Tabell 3.8: Oversikt over energitettheten for de ulike benyttede biomassene

Biomasse	Energitetthet[MJ/kg]
Pellets	17,30[56]
Flis (50 % fukt)	8,40[55]
Flis (35 % fukt)	11,20[55]
GROT(50 % fukt)	8[57]
GROT (15 % fukt)	16,56[35]

I tillegg til forbrenning av flis, skal den mengden GROT som tørkes av anlegget videre benyttes som biobrensel. Som nevnt i Avsnitt 2.6.1, regnes GROT som det hogstavfallet som blir liggende igjen i skogen etter avvirkning, altså etter produksjon av tømmer. Avvirkningen av tømmer i Innlandet i 2019 vil i teorien etterlate 1,1 millioner m³ tilgjengelig GROT. Det meste av dette GROTet blir liggende igjen i skogen etter hogst. Dette kommer av ulike årsaker, men hovedårsaken er at det ikke er praktisk mulig å ta ut 100 % av trerestene. Kvister, flisrester og lignende blir liggende igjen på bakken og vil være praktisk krevende, samt lite økonomisk gunstig, å plukke opp for videre bruk. Av bærekraftige årsaker skal minst 30 % av GROTet bli liggende igjen i skogen. Det antas ut i fra disse argumentene en mulighet for uttak av 30 % av tilgjengelig GROT til dette anlegget, hvilket gir 330 000 m³ med GROT som kan benyttes. [58, 53]

3.6.2 Forbrenning

Ved forbrenning av biomasse frigjøres energi i form av varme. Det er ønskelig at så mye som mulig av energiinnholdet i biomassen blir nyttet, hvilket betyr at en vil oppnå en så høy virkningsgrad som mulig.

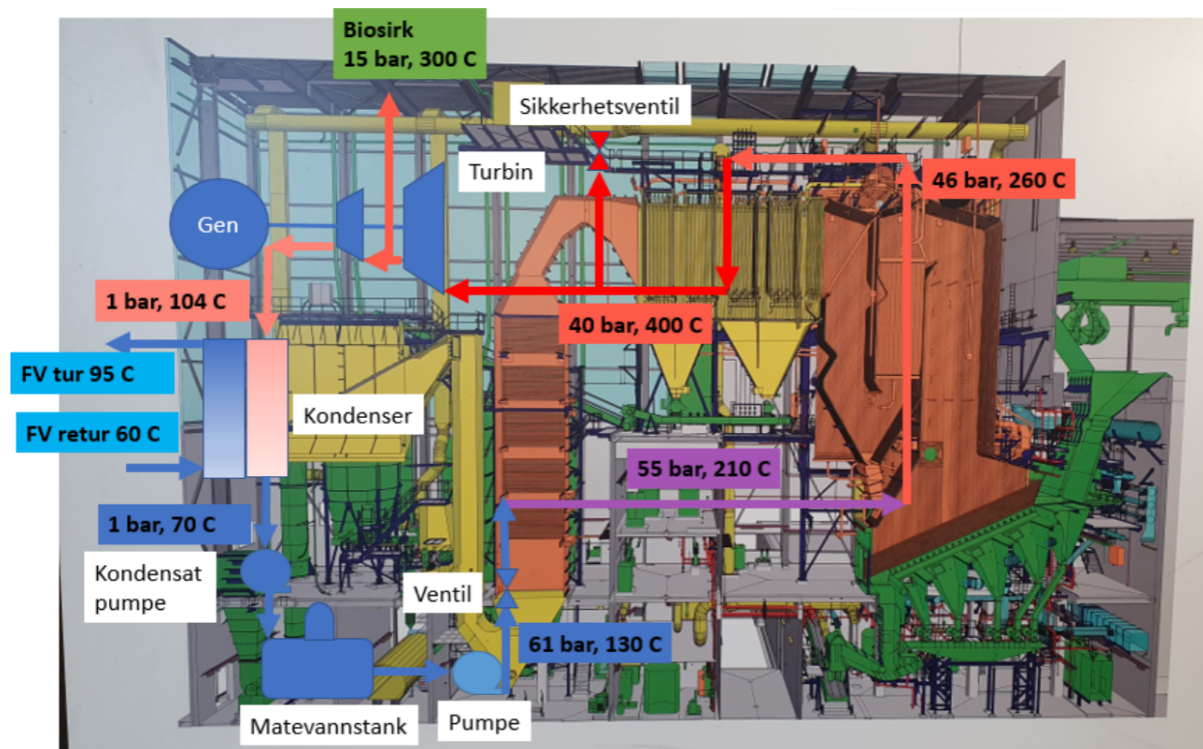
For å kunne oppnå optimal forbrenning er det faktorer som må tas i betraktning:

- Tilstrekkelig forbrenningstemperatur
- Tørt brensel, lav fuktprosent
- Tilstrekkelig, samt riktig tilførsel av luft
- Optimalt fungerende varmeuttak

Det antas at CHP-anlegget fungerer optimalt til en hver tid, og eventuelle komplikasjoner som kan forekomme tas ikke med i betraktning i denne oppgaven. For å få høyst mulig energiutnyttelse må anleggene driftes med minst mulig lufttilførsel. I en ideell forbrenningsprosess vil oksygeninnholdet være null i røykgassen, men i praksis vil ikke dette være mulig da en vil få ufullstendig forbrenning og store mengder CO i røykgassen.

Eidsivas forbrenningsanlegg driftes derfor typisk med et oksygeninnhold i røykgassen på 6 %. Selv om avfallet vil bli fullstendig forbrent ved ca. 850°C, vil forbrenningstemperaturen i ovnen ligge på 1050°C i dette anlegget for å oppnå riktig mengde oksygen.

Under, i Figur 3.2, er det presentert en oversikt over forbrenningssyklusen som det tas utgangspunkt i når det gjøres beregninger i denne oppgaven.



Figur 3.2: Illustrasjon av sirkulasjonsstømmen i CHP-anlegget som det er tatt utgangspunkt i.

Figur 3.2 viser hvordan vannet beveger seg i anlegget. I matevannstanken blir vann matet inn i syklusen for å oppnå ønsket volum. Mediet går videre inn i ei pumpe som øker trykket før vannet igjen går inn i kjelen. Her blir det varmet opp til 260°C, og varmes i neste steg opp til damp ved 400°C. Her synker også trykket noe på grunn av at det går gjennom porene i elektrofilteret. Dampen går videre inn i turbinen, hvor både trykket og temperaturen synker. I kondensatoren blir dampen kjølt ned til vann ved 70°C.

Ut i fra Figur 3.2 er det videre laget en forenklet tostegs rankine-syklus. Denne kan sees i Avsnitt 2.4.2, Figur 2.5. Det gjøres beregninger ut i fra trykk og temperatur i de ulike stegene i syklusen: hvor 1 er ut av kjelen, 2 er ut av andre oppvarming, 3 er ut av turbinen, 4 er ut av kjelen og 5 er ut av pumpa. For å finne de termiske verdiene på blant annet entalpi og indre energi, som videre skal brukes til å gjøre beregninger, er tabellene fra “Property tables and chart (SI units), Appendix 1 [28]” benyttet.

Utgangspunktet for anlegget er et rent forbrenningsanlegg som brenner restavfall, vist

på Figur 3.2. Dette anlegget er koblet til et fjernvarmeanlegg, i tillegg til at det sender noe damp ut av turbinen. Det er også koblet sammen med noen andre interne prosesser som leverer spillvarme og sørger for oppvarming av vannet i matevannstanken. Ettersom det i denne oppgaven dimensjoneres et fiktivt CHP-anlegg med biomasse som brensel med utgangspunkt i et allerede eksisterende søppelforbrenningsanlegg, vil resultatene som følger av denne oppgaven avvike noe fra et reelt anlegg.

Eidsiva ønsker å sjekke muligheten for at hele anlegget primært kan driftes på GROT. Sekundært kommer en blanding av flis og GROT. Det antas at anlegget ikke driftes på noen deler pellets, men at dette kan være et alternativ dersom det blir høyst nødvendig. Det gjøres derfor ingen beregninger på pellets som brensel i anlegget.

3.6.3 Tørking av GROT

I praksis inneholder all ved noe vann. Godt tørket ved inneholder 15-25 % fukt, mens ferskt virke inneholder rundt 50 %. Når fuktig brensel forbrennes blir deler av energien som frigjøres benyttet til å fordampe vannet som er i brenselet. Vann gjør opp store deler av det ferdige materialet, som gjør at mengden brennbart materiale blir betydelig mindre[59]. Det er derfor essensielt for energiproduksjonen at GROTeT som skal benyttes som brensel tørkes for å kunne oppnå en større virkningsgrad.

I denne oppgaven er det bestemt at deler av varmen som utvinnes fra prosessen skal benyttes til tørking av GROT. GROT som benyttes til forbrenning i varmesentraler i dag har ofte lav energitetthet. Dette skyldes en høy fuktprosent, rundt 50 %, som skyldes mangelfull tørking. Dårlig tørket GROT som dette har energitetthet på omtrent 8 MJ/kg. Det er ønskelig å oppnå en høyere verdi, ved å senke fuktprosenten i GROTeT ved å benytte metoder for tørking. Det er ønskelig å oppnå et fuktinnhold på 15 %, som har en energitetthet på omtrent 16,56 MJ/kg, vist i Tabell 3.8.

I utgangspunktet kan et forbrenningsanlegg benytte seg av brensel som har like høy fuktprosent som GROT uten at det vil være nødvendig å gjennomgå en tørkeprosess. Forskjellen er at i for eksempel flis så er fuktprosenten lik i alle deler av brenselet. GROT vil til sammenligning ha høyere fuktighetsprosent noen steder enn andre, hvilket er ugunstig for forbrenningsanlegget. Målet med å tørke GROT er å kunne oppnå en jevn fuktprosent slik at den kan benyttes som brensel uten å være til skade for forbrenningsanlegget.

For å kunne tørke GROT antas det at det benyttes et pneumatisk tørkeanlegg, forklart i Avsnitt 2.6.1.1. Alternativt vil en bånd-tørker være mulig å benytte, men det antas at det vil kunne plasseres et uttak for lavtrykksdamp i forbrenningsanlegget så det vil derfor

ikke være nødvendig. Ytelsesdata for begge de nevnte tørkesystemene kan sees i Tabell 3.9.

Tabell 3.9: Oversikt over ytelsesdataene til to ulike tørkesystemer for biomasse[38].

Type tørker	Pneumatisk	Bånd
Tilførsel	Sagflis, bark og skogrester	Sagflis, spon og flis
Tilførselsstrøm [t/h] (tørt)	25	8-9
Fuktinntak [wt%]	50-60	50-60
Fuktuttak [wt%]	10-15	10-15
Tørkemedium	Resirkulert lavtrykksdamp (0,3 - 0,4 MPa)	Luft, røykgass (90-120 °C)
Oppvarmingsmedium	Høytrykksdamp (0,7-2,6 MPa)	Varm luft
Fordampningskapasitet [t/h H ₂ O]	25	10
Fordampningsenergibehov [MJ/kg H ₂ O]	2-3 0,5-0,7 (energigjenvinning)	4-5

Under, i Tabell 3.10 er det gitt en oversikt over de ulike verdiene for GROT som benyttes i videre beregninger for tørking.

Tabell 3.10: Vekt på GROTen med ulik fuktprosent.

Fuktprosent	Vekt [kg/m ³]	Energitetthet [kWh/kg]	Energitetthet [kWh/fm ³]	Vekt vann [kWh/m ³]
0 %	382,5	5,32	2035	0
15 %	450	4,6	2070	67,5
50 %	765	2,22	1700	382,5

Energitettheten til GROT er omtrent 826 kWh per løse kubikkmeter (lm³) [58]. Dette er energitettheten ved 50 % fukt. Her er Ligning 2.21 blitt brukt. Etter tørking, når fuktprosenten er endret til 15 %, vil det antas at GROT har en energitetthet på omtrentlig 2070 kWh per faste kubikkmeter (fm³) [35].

3.6.4 Kostnader

Det tas utgangspunkt i at flis som benyttes til forbrenning i anlegget kommer fra nærtliggende områder, det samme gjelder GROTet som skal tørkes. Det er mye billigere å benytte GROT som brensel sammenlignet med for eksempel flis og pellets, vist i Tabell 3.11 nedenfor. Her er ikke diverse kostnader, som for eksempel transport, medregnet.

Tabell 3.11: Prisoversikt på forbrenning av biomasse [52].

Biomasse	Pris[øre/kWh]	Pris[øre/MJ]
Pellets	40,4	11,22
Flis (50 % fukt)	26	7,22
Flis (35 % fukt)	28	7,77
GROT (50 % fukt)	17	4,72

Som nevnt er det ønskelig at hele anlegget skal kunne driftes på det billigste alternativet, GROT. Det antas som usannsynlig at dette vil være et alternativ ved oppstart. Det har ikke vært noe uttak av GROT i Norge de siste syv årene, og dersom det skal være en begynnende prosess må det ansettes noen til å stå for uttak, rensing for grus, stein og lignende, samt transport av trerestene fra uttaksområdet til anlegget [35]. I tillegg til dette skal anlegget benyttes til å tørke GROTTet som videre skal brukes som brensel. Det antas derfor en oppstartsfase hvor det benyttes 100 % flis med en overgang til bruk av kun GROT.

4 Resultater

Beregninger og resultater fra simuleringer som er gjort er basert på tallene som ble presentert i Del 3.

4.1 Tørkeprosessen

Tørkeprosessen baseres på mengden NMP som er vist i Tabell 3.2. Resultater fra initielle beregninger er vist i Tabell 4.1. Disse resultatene er brukt som grunnlag for videre beregning av komponentenes effektbehov.

Tabell 4.1: *Initielle resultater*

\dot{m}_{luft} [mol/s]	1282,390
\dot{m}_{vann} [mol/s]	13,928
\dot{m}_{NMP} [mol/s]	1,493
Luftstrøm [m^3/s]	30,327
Varmeveksler areal [m^2]	5585,051
Kondensator areal [m^2]	2927,116
$\alpha_{Varmeveksler}$	0,833
$\alpha_{Kondensator}$	0,878

Tabell 4.1 viser at det kreves et betydelig areal med varmevekslere, spesielt til luft-luft varmeveksleren for oppvarming av luftstrømmen. Dette kommer av at volumstrømmen til varmluften må være såpass høy for å holde konsentrasjonen av NMP nede.

Tabell 4.2: *Energibehov for tørkekomponenter*

Komponenter	Effekt [MW]	Energibehov [Gwh/år]	kWh/ kg_{NMP}
Vifte	0,256	2,243	0,481
Varmeveksler	2,251	19,719	4,226
Luftvarmer	3,407	29,845	6,400
NMP fordamping	0,118	1,034	0,222
Kondensator	3,082	26,998	5,786
Vannkjøler	1,028	9,005	1,930
NMP tank	0,351	3,075	0,659
Liten luftvarmer	0,200	1,752	0,376
Tørking vann	0,300	2,624	-
Oppvarming	3,959	34,677	7,430
Elektriske komponenter	1,050	9,200	1,972
Nedkjøling	3,087	26,000	5,573

Som vist i Tabell 4.2 er det største energibehovet i tørkeprosessen fra luftvarmeren, som trengs for å varme opp luftstrømmen med $75^{\circ}C$. Videre er kondensatoren den nest største, men dette vil ikke påvirke det totale varmebehovet til tørkingen ettersom luften kjøles ned i en vann-luft varmeveksler.

4.2 Tørrom

Resultatet i Tabell 4.3 er basert på tallene hentet fra Tabell 3.3. Her ble det beregnet effekt og energibehov for de ulike strømmene i tørkeprosessen.

Tabell 4.3: *Energibehov for tørrommet*

Komponenter	Effekt [MW]	Energibehov [Gwh/år]
Oppvarming tørkemiddel	1,828	16,013
Nedkjøling tørkemiddel	1,031	9,032
Oppvarming luftstrøm	1,509	13,219
Varmeveksler	1,031	9,032
Totalt effektbehov oppvarming	2,307	20,206

Tabell 4.3 viser at det kreves mest energi for oppvarming av tørkemiddelet. Med en implementering av varmeveksler er derimot ikke dette tilfellet ettersom varmeveksleren står for 56 % av denne oppvarmingen. Det antas at hele nedkjølingen av tørkemiddelet kan gjøres av varmeveksleren. Totalt energibehov for ett år med drift blir 20 GWh. Dette tallet kunne vært større hvis en hadde regnet med de elektriske komponentene i systemet.

4.3 Batteriproduksjon

Energibehovet til de ulike stegene i batteriproduksjonen er basert på Tabell 3.4. Her er tallene til tørking av anode og katode, samt drifting av tørrom beregnet selv.

Tabell 4.4: *Nødvendig energibehov for de ulike stegene i en LIB produksjon.*

Komponenter	Prosessteg	Energibehov [Wh/Wh _{bat}]	Energibehov [GWh]	% av totalt energibehov
Anoden	Miksing	0,020	0,101	0,140
	Belegg	0,005	0,023	0,031
	Tørking	0,525	2,625	3,570
	Kalandrering	0,001	0,003	0,004
	Spalting	0,000	0,000	0,000
Katoden	Miksing	0,037	0,186	0,252
	Belegg	0,005	0,023	0,031
	Tørking	9,185	45,930	62,440
	Kalandrering	0,006	0,003	0,004
	Spalting	0,000	0,000	0,000
Celle	Winding	0,000	0,000	0,000
	Fylling	0,001	0,003	0,004
	Forming	0,828	4,141	5,630
	Tørrom	4,040	20,200	27,460
	Gulvvarme	0,072	0,360	0,500
Cellen	Total	14,720	73,600	100

Tabell 4.4 er en oversikt over hvor energi som kreves for å kunne utføre de ulike stegene i en LIB-produksjon. Her er noen av tallene basert på tidligere tall [17], mens de tallene som går under tørking og tørrom er beregnet. Dette er på grunn av at de beregnede verdiene utgjør om lag 96 % av det totale energibehovet til LIB produksjonen. Det betyr at de andre tallene utgjør en så liten andel av totalen at det brukes tidligere beregnede verdier. Disse skaleres ned til et batteri som passer til beregningene gjort i denne oppgaven. Her er forholdstallet 0,5622 brukt, som er et estimat funnet ved å bruke den oppgitte verdien til tørkning av katoden fra rapporten [17] og den beregnede verdien til tørking av katoden.

Tabell 4.5: Temperaturstrømmer

Strøm	Temperaturendring [$^{\circ}C$]	Effekt [MW]
Tørkemiddel kald strøm	6-100	1,828
Tørkemiddel varm strøm	78-25	1,031
Luftstrøm tørrom	5-23	1,509
Forvarmer tørking	15-50	0,200
Oppvarming tørking	68-143	3,407
Kondensator	80-6	3,082

Tabell 4.5 viser de forskjellige temperaturendringene som foregår i batteriproduksjonen. På grunn av de store effektbehovene til kjøling og oppvarming er det gode muligheter for implementering av varmevekslere.

4.3.1 Kostnader ved batteriproduksjon

Kostnadene til batteriproduksjonen er delt opp i materialkostnader og energikostnader. Materialkostnadene er hentet fra Batpac, og antas som konstante globalt.

Tabell 4.6: Totale utgifter til innkjøp av materiale for produksjon av 5 GWh batteri

Materiale	MNOK/år
NMC333	2132,556
Carbon black	24,911
PVDF	26,690
NMP	1,165
Grafitt	44,764
Carbon additive anode	6,529
CMC/SBR	9,327
Vann	-
Aluminium	29,389
Kobber	185,114
Separator	234,112
Elektrolytt	245,431
Total	2939,988

Tabell 4.6 viser kostnadene knyttet til innkjøp av nytt materiale i løpet av ett år. Det er tydelig at den største kostnaden kommer fra innkjøp av NMC333 til katoden. Dette utgjør ca. 73 % av de totale utgiftene. Ellers vil også separator, elektrolytt og strømledere utgjøre en god del av utgiftene.

Kostnadene for tørrommet er delt inn i vanlig industri og kraftintensiv industri. Effekt- og energibehovet for oppvarming av tørkemiddel er basert på at det allerede er varmet opp av varmeveksleren, effektbehovet der er altså basert på varmebehovet fra 59°C til 100°C. Disse kostnadene er gitt i Tabell 4.7 under.

Tabell 4.7: Utgifter av drifting av et 6038 m² tørrom

Kostnader	Vanlig industri [MNOK/år]	Kraftintensiv industri [MNOK/år]
Oppvarming tørkemiddel	4,693	2,635
Oppvarming Luftstrøm	8,886	4,990
Varmeveksler	-6,072	-3,410
Totalt	13,579	7,625

Kostnadene for tørkeprosessen er basert på tallene fra Tabell 4.4 og prisene fra Tabell 3.6.

Tabell 4.8: Kostnader for tørking av 4666 tonn NMP

Kostnader	Kraftintensiv industri [MNOK]	Vanlig industri [MNOK]
Oppvarming	13,091	23,312
Elektrisitet	4,245	7,560
Totalt forbruk	17,336	30,871
NMP oppsamling	6,069	10,807
Tørking uten oppsamling	11,267	20,064
Innkjøp av NMP uten oppsamling	116,527	116,527
Kr spart ved oppsamling	109,293	104,554

Tabell 4.8 viser at oppvarmingen av luft står for ca. 76 % av de totale kostnadene knyttet til energibehovet. Videre ser en at selv om oppsamling av NMPen er en dyr prosess, så vil det å forbrenne NMPen være langt mindre økonomisk, ettersom kostnadene for å kjøpe inn NMP er 20 ganger høyere enn kostnadene til oppsamlingsprosessen.

Tabell 4.9: Totale årlige kostnader for produksjon av 5 GWh batterier

Kostnader	Kraftintensiv industri [MNOK]	Vanlig industri [MNOK]	GROT [MNOK]
Tørking	17,336	30,871	7,459
Tørrom	7,625	13,579	3,435
Andre komponenter	1,906	3,395	0,859
Materialkostnader	2939,998	2939,998	2939,998
Totalt	2966,865	2987,843	2951,751

Tabell 4.9 lister opp de totale utgiftene knyttet til materialinnkjøp og energiutgifter. Her ser en at ved å brenne GROT istedenfor å kjøpe kraft fra kraftnettet kan en enten spare 15 eller 36 millioner kroner i året, avhengig av hvilken kraftpris en bruker.

4.4 Forbrenningsanlegget

Som nevnt i Avsnitt 3.6.2, er forbrenningsanlegget forenklet til en tostegs rankine-syklus. For å kunne beregne varme og arbeid som går inn og ut av anlegget, er det nødvendig med ulike verdier. For å finne disse er det benyttet tabeller fra [28], og de er presentert i Tabell 4.10 under. Hvor de ulike stegene i syklusen er beskrevet i Avsnitt 3.6.2. Noen av verdiene har det vært mulig å hente direkte fra tabellen, mens andre er funnet gjennom interpolering for en mest mulig nøyaktig verdi.

Tabell 4.10: Verdier tilhørende de ulike stegene i forbrenningsanlegget

Steg	Temp [°C]	Trykk [bar]	Entalpi [kJ/kg]	Indre energi [kJ/kg]	Spesifikt volum [m ³ /kg]	Tilstand	Tabell[28]
1	260	46	1134,8	0,001276	674,79	Vann	A4
2	400	40	3214,5	0,07343	2920,8	Damp	A6
3	104	1	2684,86	1,71	2512,34	Damp	A6
4	70	1	293,1	0,001023	293,04	Vann	A4
5	130	61	604,73	0,001023	-	Vann	A4
6	210	55	897,61	0,001173	-	Vann	A4

Disse verdiene brukes videre i ligningene 2.17, 2.18, 2.19 og 2.20 for å finne energien som går inn og ut av de ulike delene i syklusen. Nødvendig i disse utregningene er også massestrømmen som går i anlegget. Denne finnes ved bruk av de samme ligningene som over, men da må det tas utgangspunkt i at en har en bestemt energimengde.

I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i to ulike massestrømmer, hvor den ene er basert på å dekke det termiske energibehovet til batterifabrikken, mens den andre er basert på å dekke det elektriske energibehovet.

Den første massestrømmen (m_1), som er basert på det termiske energibehovet i anlegget, er funnet ved å bruke Ligning 2.4. Her er $Q_{kondensator}$ mengden termisk energi som trengs i batterifabrikken. Massestrømmen i anlegget ble funnet til å være 2,64 kg/s. Tallene som ble kalkulert ut i fra denne massestrømmen er presentert i Tabell 4.11 under.

Tabell 4.11: Energien som går inn og ut av forbrenningsanlegget med m_1 lik 2,64 kg/s.

Steg	Hva som skjer	Ligning	Energimengde [GWh/år]
Ut av turbin	Ekspansjon i turbin	2.17	12,23
Ut av kondensator	Kondensering i kondensatoren	2.18	55,23
Ut av pumpa	Kompresjon i pumpa	2.19	6,76
Inn i kjel 1 og 2	Oppvarming i kjel	2.20	53,5
Total energimengde:			60,70

Den totale energimengden som blir presenter i Tabell 4.11 er ikke inkludert energien som går inn i de to kjelene. Grunnen er at dette er energi i form av brensel, som flis og GROT. Her er det tatt utgangspunkt i at energien som går inn i anlegget er negative verdier, mens energien som går ut er positive verdier. Tabellen gir at anlegget produserer 82 % termisk energi og 18 % elektrisk energi.

Den andre massestrømmen (m_2) er basert på det elektriske energibehovet i anlegget. Denne ble funnet ved å bruke Ligning 2.17, hvor W_{turbin} er mengden elektrisk energi som trengs i batterifabrikken. Massestrømmen i anlegget ble funnet til å være 3,96 kg/s. Tallene som ble kalkulert ut i fra denne massestrømmen er vist i Tabell 4.12 under.

Tabell 4.12: Energien som går inn og ut av forbrenningsanlegget med m_2 lik 3,96 kg/s.

Steg	Hva som skjer	Ligning	Energimengde [GWh/år]
Ut av turbin	Ekspansjon i turbin	2.17	18,35
Ut av kondensator	Kondensering i kondensatoren	2.18	82,87
Ut av pumpa	Kompresjon i pumpa	2.19	10,15
Inn i kjel 1 og 2	Oppvarming i kjel	2.20	80,28
Total energimengde:			91,07

I Tabell 4.12 er også total energimengde regnet uten at energien inn i kjelen er inkludert. Denne massestrømmen gir en mye større produksjon enn m_2 .

4.5 Biomasse

Ved å bruke nødvendig energimengde i batterifabrikken, presentert i Tabell 4.11, så får en at det er nødvendig med 35 556 m³ GROT/år for å kunne dekke behovet til anlegget. Dette tallet ble funnet ved å bruke energimengden fra anlegget og dele den på energitettheten til GROT, 2070 kWh/m³, som er gitt i Avsnitt 3.6.3.

I Tabell 4.13 og 4.14 under, er det presentert en oversikt over total pris for brenselet som benyttes i anlegget ved ulike mengder av GROT med 15 % og flis ved 35 % og 50 % fukt. Dette er funnet i sammenheng med antagelsen om en gradvis overgang fra flis til GROT som brensel i anlegget.

Tabell 4.13: Sammenligning mellom energien som fås fra ulike andeler av flis ved 35 % fukt og GROT ved 15 % fukt

Andel flis (35 % fukt)	Andel GROT	GWh fra flis	GWh fra GROT	Total pris [MNOK]
0 %	100 %	0	73,6	12,50
25 %	75 %	18,4	55,2	14,54
50 %	50 %	36,8	36,8	16,56
75 %	25 %	55,2	18,4	18,58
100 %	0 %	73,6	0	20,61

Tabell 4.14: Sammenligning mellom energien som fås fra ulike andeler av flis ved 50 % fukt og GROT ved 15 % fukt.

Andel flis (50 % fukt)	Andel GROT	GWh fra flis	GWh fra GROT	Total pris [MNOK]
0 %	100 %	0	73,6	12,5
25 %	75 %	18,4	55,2	14,17
50 %	50 %	36,8	36,8	15,8
75 %	25 %	55,2	18,4	17,48
100 %	0 %	73,6	0	19,0

4.5.1 Tørking av GROT

Innlandet har i teorien en kapasitet til å levere $330\,000\text{ m}^3_{GROT}/\text{år}$ med 50 % fuktighet, forklart i Avsnitt 3.6.1. I Tabell 4.15 under er det presentert en oversikt over nødvendig mengde GROT, gitt i m^3 , fra brensel med ulik fuktprosent, samt mengden vann som finnes i dette brenselet.

Tabell 4.15: Nødvendig mengde som må leveres til anlegget for å oppnå ønsket effekt på 73,6 GWh/år.

Fuktprosent	Nødvendig mengde GROT [$\text{m}^3/\text{år}$]	Mengde vann [kg/m^3]
0 %	36 167	0
15 %	35 556	67,5
50 %	43 294	382,5

I Tabell 4.15 er det tatt høyde for at anlegget skal levere tilstrekkelig mengde GROT til anlegget for å kunne produsere 73,6 GWh/år. Dette er mengde energi som ble presentert i Tabell 4.4. Ut i fra denne tabellen ble det funnet at det må fordampes $315\text{ kg}_{vann}/\text{m}^3$ som tilsvarer 11 200 tonn vann per år for å få GROTet fra en fuktprosent på 50 % ned til 15 %. Selve fordampningsprosessen i tørkeanlegget vil da totalt kreve en energimengde på 1,87 GWh/år. Denne mengden ble funnet ved at mengden vann som skal fordampes

ble multiplisert med fordampningsenergibehovet til tørkesystemet, 0.6 MJ/kg_{H_2O} , som er presentert i Tabell 3.9.

5 Diskusjon

Denne delen tar for seg diskusjonen av resultatene presentert i Del 4. Konklusjoner knyttet til oppgaven er basert på diskusjonen som blir presentert i de følgende avsnittene.

5.1 Batterifabrikken

LIB-teknologien er den teknologien som er mest utbredt. Det er derfor enklest å basere batterifabrikken på disse batteriene. LIB kommer mest sannsynlig til å bli mer og mer ettertraktet, og derfor vil det å produsere slike typer batterier trolig være det mest lønnsomme [60]. Det er derfor bestemt at det er dette batteriet som skal produseres i fabrikken.

Litium er lett og gir et batteri med høy energitetthet. Som nevnt i Avsnitt 2.1.2 egner denne type batteri seg godt til bærbare elektriske enheter, som det er forventet økt produksjon av. I tillegg er det stor teknologisk utvikling rundt større LIB som kan brukes i større utstyr. Batteriene har høy levetid og kan lades opp igjen raskt etter utlading, hvilket er ønskede egenskaper.

På den andre siden er det også noen negative aspekter ved disse batteriene, som også ble nevnt i Avsnitt 2.1.2. Selv om batteriene har lav self-charge rate, begynner de nedgradering så snart de er ferdigstilte. Batteriene er også avhengig av å ha en beskyttende innpakning før de kan tas i bruk. Selv om LIB i dag brukes mest i mindre enheter, blir de i økende grad tatt i bruk i større enheter. Dette er en relativt ny teknologi som det er knyttet usikkerhet til. Et eksempel er å finne en effektiv måte å kunne resirkulere batteriene på. I tillegg er de større batteriene svært kostbare.

Det er ingen tvil om at det fortsatt er forbedringspotensiale med LIB, men batteriene har et godt utgangspunkt og teknologien er svært aktuell i dag. Behovet for denne type batteri vil stadig øke, og fordelene overveier ulempene [60].

De neste tre avsnittene: 5.1.1, 5.1.2 og 5.1.3 er tatt med i denne delen da disse har vært nødvendige for å kunne gjøre videre beregninger, slik som tørking av anoden og katoden, samt kostnadsberegninger knyttet til materialbruk.

5.1.1 Katodemateriale

Katodematerialet i et LIB har fortsatt stort forbedringspotensiale. Som nevnt i Avsnitt 2.1.4.1 er ofte katodematerialet basert på litiumbaserte metall-ioner. I Tabell 2.1 er det listet fem ulike egnede alternativer. I tabellen kan en blant annet se at LiMn_2O_4 er stabilt

og har en ganske høy gjennomsnittlig ladning, men at den også er svært dyr og har en del lavere kapasitet enn de andre alternativene. LiCoO_2 har høy kapasitet, er stabilt og har en stabil temperatur, men denne er ikke like sikker som de andre metallene, samt at den koster mer. $\text{Li}[Ni_xCo_xMn_x]\text{O}_2$ er et alternativ til katodemateriale som er i den øvre delen av gjennomsnittlig spenning, har den beste kapasiteten, er sikkert og stabilt, og det ligger på midten i prisklasse.

Et aspekt som bør være en prioritet når en velger katodemateriale er sikkerheten ved bruk av materialet. Dette i form av skadelige stoffer for miljøet, arbeiderene på fabrikken og forbrukerne, i tillegg til brannfarlighet. LiNiO_2 er rangert som lite sikkert i forhold til flere av de andre katodematerialene i Tabell 2.1, samt at dette materialet er en del dyrere. Dette er derfor utelukket i denne oppgaven. En ønsker også å ha et materiale som kan yte godt og gi batteriet best mulig egenskaper. Her har både den gjennomsnittlige spenningen og kapasiteten noe å si. Batteri som fungerer ved kald start er nødvendig flere steder. Eksempelvis kan det i Norge, hvor det blir ganske kaldt om vinteren, være essensielt med muligheter for kald start selv ved de laveste temperaturene. Dette kriteriet oppfyller både LiCoO_2 , LiNiCoAlO_2 og $\text{Li}[Ni_xCo_{x0}Mn_x]\text{O}_2$.

Ved å bruke Tabell 2.1 til se på de ulike fordelene og ulempene materialene har, er det besluttet at det batteriet som skal produseres i batterifabrikken er $\text{Li}[Ni_xCo_xMn_x]\text{O}_2$.

5.1.2 Anodemateriale

Det er ikke samme utfordring å bestemme anodemateriale ettersom det allerede finnes et godt alternativ til dette. Grafitt brukes allerede i de fleste LIB, og det har vist seg at dette er godt egnet som anodemateriale.

Som vist i Tabell 2.2 er det flere andre materialer som også kan brukes. Deriblant litium-metall som er relativt billig og har en god kapasitet. Dog er denne også ustabil og regnes som et usikkert materiale. Litiumtitanat har høy spenning, regnes som sikkert og er stabilt. Samtidig har dette materialet lav kapasitet i forhold til de andre materialene, i tillegg til at det er litt dyrere. Litiumlegering kan bruke både silisium og tinn som materiale. Dette gir litt ulik kapasitet, som vist i Tabell 2.2, men begge kapasitetene er relativt høye. Legeringen er også sikker, men er litt dyrere og har en noe lavere spenning.

Amorf karbon er det alternativet som kan sammenlignes best med grafitt. Dette materialet har både høy spenning, regnes som sikkert og er stabilt. I tillegg er det billigere enn grafitt, men har noe lavere kapasitet. Ved å se på Tabell 2.2 ser en at grafitt er det materialet som kommer best ut. Dette fordi det oppnår en relativ høy spenning og kapasitet, det er sikkert

og stabilt, og det er regnet som noe billigere enn for eksempel amorf karbon, litiumoksider og litiumtitanat. I tillegg er det vist i praksis å være et godt egnet anodemateriale. Det er derfor tatt høyde for at fabrikken skal benytte dette materialet.

5.1.3 Løsemiddel

Tabell 3.1 viser noen av de ulike løsemidlene som kan brukes på elektrodene, der i blant vann, NMP, DMF, DMAC og DMSO. NMP er en svært energikrevende når det kommer til tørking, og det er derfor nedgang i bruk av det som løsemiddel. I dette tilfellet er det tilgang på store mengder termisk energi fra anlegget, hvilket gjør det mulig å benytte seg av NMP som løsemiddel, tross ulempen med tørkeprosessen. På anoden kan vann benyttes som løsemiddel. Dette fordi bindemiddelet på anoden er lett løselig i vann, i tillegg til at anoden ikke inneholder andre materialer som vil reagere med vannet. Vann er også mest ønskelig ovenfor de andre løsemidlene, da vann er naturlig og ikke inneholder giftige stoffer.

På katoden kan ikke vann benyttes som løsemiddel. Dette er fordi vannet reagerer med materialene i katoden og gjør at det kan oppstå lekkasjer av litiummetaller. Det er derfor bestemt å heller bruke NMP som løsemiddel på katoden. Dette til tross for at det er brannfarlig og er et giftig materiale både for arbeidere ved produksjonsfabrikken og for miljøet rundt. Hovedgrunnen er at materialet har vist seg å være godt egnet som løsemiddel på katoden da det løser godt opp PVDF ved katoden og danner en jevn slurry som er godt egnet til sitt formål.

5.1.4 Tørking av NMP

Prosessen rundt tørking av NMP starter ved at luft på 15°C mates inn i viften ved 0,02 MW. Videre varmes den opp til 50°C og går inn i zeolitt hjulet hvor den plukker opp NMP, og kjøles ned til 9°C. Deretter går den gjennom en vifte på 0,2 MW, og videre gjennom varmveksleren. Denne dimensjoneres til å være 5585 m², som overfører 2,3 MW med energi. Etter varmeveksleren er temperaturen 68°C, og må varmes opp til 143°C. Denne prosessen krever 3,4 MW. Luften kjøles deretter ned i kondensatoren som bruker nedkjølt vann ved 3°C som kjølemedium. Nedkjøleren krever 1 MW og kondensatoren tar 3,1 MW. NMPen som nå er flytende, lagres deretter i en NMP-tank som krever 0,4 MW før den gjøres klar til ny bruk. Dette er basert på Tabell 4.2 som viser effektbehovet som trengs for de forskjellige komponentene.

Det er mengden NMP i slurrien som avgjør størrelsen på luftstrømmen, og indikerer også størrelsen på anlegget. Det er derfor valgt å vise mengden energi som kreves per kg NMP i tabell 4.2. Dette summeres til totalt 4 MW til oppvarming, og 1 MW til

elektriske komponenter. Nedkjølingsbehovet antas å ikke påvirke energibehovet, ettersom vann brukes som kjølemedium. Dette fordi vannet allerede har blitt nedkjølt, og regnes med i de elektriske komponentene. Det eneste som må vurderes på kondensatoren er størrelsen, ettersom en så stor effekt vil trenge et betydelig overføringsareal. Det er verdt å merke den store forskjellen mellom størrelsen på de termiske og elektriske komponentene, ettersom de elektriske kun utgjør 20 % av det totale effektbehovet. Dette betyr at det er betydelige kostnader å spare hvis en klarer å produsere termisk energi billigere enn det vil koste å kjøpe elektrisk strøm fra nettet.

Den eksisterende litteraturen på dette feltet viser stor variasjon. Schunemann[61] har rapportert så lavt forbruk som 11,44 Wh/Wh_{bat}, mens Thomitzek et al.[62] har rapportert så høyt som 133,3 Wh/Wh_{bat}. Dette tyder på at det er stor usikkerhet knyttet til tørkestadiet. Det er verdt å merke at Thomitzek et al.[62] brukte et anlegg på 0,7 GWh, mens Schunemann sitt var på 48 kWh [61]. Dette betyr at energibruken ikke bare er avhengig av teknologi og materiale, men også størrelsen på anlegget. I og med at tørkeanlegget som ble brukt er det samme som i Ahmed et al.(a)[14], er det naturlig å sammenligne resultatene fra denne rapporten med denne oppgaven. Resultatene der viste at tørkeprosessen krevde 10 kWh/kg_{NMP}. Dette stemmer godt overens med funnene i denne oppgaven som viste at det krevde totalt 9,4 kWh/kg_{NMP}. Der funnene divergerer fra hverandre er størrelsen på komponentene sammenlignet med total mengde produsert batteri. For å produsere 1 GWh med batteri trenger Ahmed et al.(a) 3752 kW for luftvarmeren [14]. Dette er betydelig mer enn det denne oppgaven viser, hvor en produksjon på 5 GWh batteri kun krever 3407 kW. En kunne antatt at tallet ville blitt fem ganger så stort ettersom utgangspunktet for anlegget er det samme, men det er ikke tilfellet. Dette kommer av at mengden NMP som brukes ikke er proporsjonal med størrelsesforskjellen. Altså brukes det i dette tilfellet 4,6 millioner kg NMP for 5 GWh produksjon, mens det brukes 4,1 millioner kg NMP for 1 GWh produksjon. Det er også forskjell på den operative tiden til anlegget. Hvor det i hos Ahmed et al.(a) ble antatt en driftstid på 300 dager i året, ble det her antatt en driftstid på 365 dager i året. Dette vil gi likt total energibruk, men på grunn av høyere tidsbruk vil anlegget beskrevet her trenge mindre effekt.

5.1.4.1 Endring i tørkeparametre

Ut i fra Ligning 2.8 ser en at det er mulig å øke mengden energi overført i varmeveksleren, og dermed redusere størrelsen på luftvarmeren som kommer senere. Dette er en vurdering som må gjøres opp mot tilgjengelig areal. Det kan også være hensiktsmessig å sammenligne kapitalkostnaden med kostnadene knyttet til produksjon av termisk energi, enten fra

biobrensel eller fra elektrisitet fra kraftnettet. Ahmed et al.(a)[14] gjorde undersøkelser knyttet til økning av areal for å redusere energien som kreves for å varme opp luften. Disse undersøkelsene viser at en optimalisering av kostnader knyttet til varmeveksleren er mulig. Ved å redusere inngangstemperaturen til kondensatoren vil en øke effekten til varmeveksleren og redusere kostnadene ved luftoppvarming. Dette vil dog gå på bekostning av arealet som måtte økes med 63 %. En slik økning ville gitt varmeveksleren et areal på 9103 m². Men, ettersom strømprisen i Norge er annerledes enn den brukt i denne rapporten, kan en anta at den økonomiske gevinsten vil være lavere og derfor vil også arealøkningen være ulik.

En annen måte å redusere kostnadene knyttet til oppvarmingen vil være å redusere temperaturen som luftvarmeren må oppnå. Ved en tørketemperatur på 100°C vil effektbehovet til luftvarmeren reduseres til 2,38 MW, og størrelsen på varmeveksleren til 1884 m² [14]. Dette er da med en antagelse om at inngangstemperaturen til kondensatoren ligger på konstant 80°C. Dette fører også med seg at tørketiden øker betraktelig, hvilket gjør at mer energi kreves og prosessen tar lenger tid. Det kan likevel være ønskelig å redusere tørketemperaturen av andre grunner. I følge Susarla et al. [48] vil økt temperatur og tørkerate føre til større sjanse for defekter og ødelagt struktur i elektroden, sammenlignet med tørking ved lave temperaturer og lavere hastigheter. Likevel er det verdt å merke seg at en økning i temperatur på 40°C resulterte i en fem ganger lavere tørketid. I følge Jaiser et al. [63] vil bruk av varierende temperaturer kunne gi optimalisert mikrostruktur og tørketid. Dette kommer av at halvparten av tørketiden går til å tørke de siste 10 % av løsemiddelet. Det vil derfor være hensiktsmessig å bruke lav temperatur i starten til det første tørkesteget, for deretter å bruke høy temperatur mot slutten for å få ut det siste uten å skade elektroden [63]. Dette ble for enkelthetens skyld sett bort ifra i dette tilfellet, ettersom det også vil kreve mer kompleksitet å hente ut forskjellige temperaturer fra forbrenningsanlegget.

Hvis en forandrer den tillatte konsentrasjonen av NMP i den tørre luften vil en også kunne redusere energibruken. Som vist i Ligning 2.6 vil en økning i NMP-konsentrasjon i luften redusere luftstrømmen. Ved en økning av konsentrasjonen til 2000 ppm vil luftstrømmen reduseres til 17,4 m³/s, som igjen vil redusere størrelsen på luftvarmeren til 2 MW. Dette vil mest sannsynlig gi et NMP-nivå over den nedre brennbarhetsgrensen, og kan derfor ikke gjennomføres. Dette viser imidlertid at det definitivt er energi å spare på å holde konsentrasjonen så høy som mulig, så lenge en er innenfor sikkerhetsgrensene.

5.1.5 Tørking av vann

Bruk av vann som løsemiddel har flere fordeler. Den største er at det ikke må implementeres komplekse oppsamlingsprosesser for giftig materiale. Prisen er også en fordel ettersom vann er lett tilgjengelig. Det er viktig å påpeke at vannet som skal brukes må være destillert, altså må det enten kjøpes fra en ekstern kilde eller renses på fabrikken før bruk. Vann har en varmekapasitet som er over to ganger høyere enn NMP, samt en fordampningsentalpi på 4,5 ganger mer enn NMP. Det er derfor naturlig å anta at det trengs mer energi for å fordampe vann enn NMP, men dette er ikke tilfellet. Dette er på grunn av at vann har 35 ganger høyere damptrykk, som gjør at en lik volumstrøm kan transportere 35 ganger mer vann enn NMP [48]. På grunn av dette ble det antatt at det totale tørkebehovet til vann er ti ganger lavere enn behovet for tørking av NMP. Data fra Batpac viser også at det krever nesten dobbelt så mye NMP i katoden som det kreves vann i anoden. Totalt vises dette i Tabell 4.2 hvor tørking av vann på anoden kun utgjør 5 % av energien det tar å varme opp luften brukt til katodetørking. En svakhet med denne utregningen er at det antas en identisk volumstrøm av luft, hvilket ikke nødvendigvis er tilfellet ettersom NMP krever en høy volumstrøm for å holde konsentrasjonen nede. Likevel vil dette veies opp for ved at vann krever en større tørkeeffekt på grunn av lavere tørketid. Det er heller ikke spesifisert om dette gjelder kun tørkingen, eller tørking kombinert med oppsamling av NMP. For beregninger brukt i dette tilfellet ble det antatt at det kun gjaldt tørking.

Det er stor usikkerhet knyttet til energibruken ved bruk av vann som løsemiddel. I en undersøkelse gjort av Wood et al.[64] ble det funnet at tørking av vann tok opp mot 75 % av energien som trengs for å tørke NMP. Dette, kombinert med at NMP trenger oppsamling etterpå, gjorde at vannbasert løsemiddel kun var to ganger billigere enn NMP. Denne store forskjellen mellom resultatene fra Susarla et al.[48] og Wood et al.[64] viser at det trengs flere undersøkelser på dette feltet. Det anbefales derfor at det gjøres ekstensive undersøkelser opp mot effektbehovet for tørking av vann som løsemiddel.

5.2 Tørrom

Som vist i Tabell 4.3 er drifting av tørrom en energikrevende prosess. Dette kommer hovedsakelig av den store luftstrømmen som er nødvendig for å kunne drive anlegget. Men, det er også gode muligheter for å kunne spare energi. Ved å integrere en varmeveksler mellom den varme og kalde strømmen med tørkemiddel, er det mulig å redusere energibehovet for tørrommet med 31 %. Totalt sett vil da tørrommet kreve $4,04 \text{ Wh/Wh}_{bat}$. Det er verdt å merke at det reelle tallet kan være noe mindre, ettersom anlegget er direkte skalert fra anlegget brukt av Guddingsmo et al[49]. Vanligvis vil

en økning i produksjon ikke nødvendigvis gi en proporsjonal økning i energibruk eller kostnader, ettersom energibehovet per batteri synker med økt produksjon på grunn av effektivisering [40].

For et tørromsystem i Norge kan det være hensiktsmessig å bruke et fast tørkemiddelsystem istedenfor et flytende. Faste tørkemiddelsystem vil gjerne være bedre tilpasset det tørre og kalde klimaet som kan oppstå i Innlandet [65]. I en annen rapport fra Ahmed et al.(b)[18] ble det gjort undersøkelser på energibruken i tørromssystem med zeolithhjul. Anlegget ble der dimensjonert til produksjon av 1 GWh. Volumstrømmen av tørrluft ble satt til 24 kg/s. Hvis dette skulle skaleres opp til 5 GWh ville det kreve 120 kg/s, men dette er ikke tilfellet. Dette tyder på at det å skalere opp størrelsen på anlegget ikke nødvendigvis gir en proporsjonal økning i volumstrøm. Videre viste resultatene at det krever totalt 398 kW å drifte anlegget. Dette er en kombinasjon av termiske og elektriske komponenter med en implementert varmeveksler. Effektbehovet er derfor delvis redusert. Med 100 % driftstid i løpet av året vil dette gi 3,48 Wh/Wh_{bat}. Altså vil denne typen tørking ha et lavere energibehov enn for et flytende tørkesystem. Dette er også inkludert elektriske komponenter, som ble ekskludert fra denne rapporten. Det betyr at den reelle forskjellen mellom det faste tørkemiddelsystemet og det flytende vil være en god del høyere. For dette anlegget trengs det også en temperatur på 146°C for å regenerere zeolithhjulet. Dette betyr at det er gode muligheter for kombinerings med bioforbrenningsanlegg. Det er verdt å merke at sammenlignet med annen litteratur er energibruken i rapporten til Ahmed et al.(b)[18] betydelig lavere enn hva andre har rapportert. Eksempelvis rapporterte Thomitzek et al.[62] at tørkeprosessen for et 48 kWh anlegg krevde 448,7 Wh/Wh_{bat}. Dette viser at det er betydelig energi å spare ved å skalere anlegget opp, men også at det er stor variasjon i litteraturen når det kommer til energibruk.

5.2.1 Tørromsparametre

Hovedsaklig er det tre faktorer som bestemmer energibruken til systemet. Det er fuktigheten til luften som går inn, temperaturen på denne luften, samt bruken av varmevekslere [18]. De to hovedkildene til fukt i rommet er luftfuktighet i uteluften og fuktighet fra personene som jobber der. Personene som jobber der er ikke en faktor som kan forandres og regnes derfor som konstant. Luftfuktigheten rundt Hamar varierer hovedsakelig mellom 65 % til 90 %, mens temperaturen varierer mellom -9°C, og 20°C [65]. Dette betyr at tørromsystem må være i stand til å tåle store variasjoner i vær og klima. Oppvarmings- og nedkjølingsprosessen til tørkemiddelet kan også effektiviseres ved bruk av varmevekslere hvor varmevekslerene kombineres med resten av anlegget. På

denne måten er det mulig å redusere energibruken enda mer, men dette vil igjen føre til et mer komplekst system med høyere kapitalkostnader. Dette må derfor veies opp mot energibesparelsene det gir.

5.3 Varmeveksler

Bruken av varmevekslere vil være essensielt for å holde energibruken så lav som mulig. I rapporten til Guddingsmo et al.[49] ble besparingseffekten ved bruk av varmpumpe og varmeveksler hovedsakelig i tørke- og tørringsprosessen undersøkt. Resultatet av denne rapporten var at energibehovet for fabrikk ble redusert med 37 Wh/Wh_{bat}, fra 52 Wh/Wh_{bat} ned til 15 Wh/Wh_{bat}. Det bruker altså mindre enn 30 % av det originale anlegget. Dette er med implementering av den mest energieffektive MER simuleringen, samt varmpumpe for å utnytte varmelommer. Å overføre dette til denne fabrikk vil redusere den nødvendige energien fra 55,2 GWh til 15,9 GWh. Dette kan selvfølgelig ikke overføres direkte ettersom det er forskjellige tørkesystem med forskjellige volumstrømmer, NMP oppsamling og tørketemperaturer. Likevel er det tydelig at det er energi å hente i å gjennomføre en slik analyse, og det anbefales derfor at videre undersøkelser gjøres.

Det vil være nødvendig med en varmeveksler mellom forbrenningsanlegget og batterifabrikk for å overføre den termiske energien. I skissen for bioanlegget, vist i Figur 3.2, er det tatt utgangspunkt i kun én varmeveksler som skal overføre hele det termiske behovet til batterifabrikk. Dersom dette direkte implemteres må det settes opp flere mindre varmevekslere etter denne for de forskjellige luftstrømmene, med forskjellig effekt og temperatur. Denne varmeveksleren vil også måtte være ekstremt stor. Eksempelvis vil størrelsen på varmeveksleren være over 26 000 m² for å varme opp luft eller vann fra 20°C til 90°C. For luft ville dette krevd en volumstrøm på over 97 m³/s, mens vann ville krevd en volumstrøm på 0,03 m³/s. Det vil da også være nødvendig med en industriell varmpumpe for å få temperaturen på luften opp til den høyeste nødvendige temperaturen, som er 143°C. Et alternativ til dette vil være å hente ut hver enkelt strøm der den finnes i forbrenningssyklusen. Dette vil gjøre syklusen mer komplisert, men vil også spare inn areal på varmevekslere, samt mulige kapitalkostnader.

5.4 Kostnader ved batteriproduksjon

Som nevnt i Avsnitt 3.5 blir kostnadene basert på materialbruk gjennom året, samt energibruk. Det regnes ikke med kapitalkostnader, lønninger for arbeidskraft eller andre kostnader. Som vist i Tabell 3.5 vil det aktive materiale stå for 73 % av materialutgiftene. Uten NMP oppsamling ville NMP vært en betydelig utgift, men som en ser i Tabell 4.8 sparer oppsamlingsprosessen bedriften for nesten 110 millioner kroner. Dette er basert på

en resirkuleringsgrad på 99 %, hvilket kan være urealistisk høyt. Likevel er forskjellen på med og uten oppsamling av NMP så høy at det er tydelig at dette er en ønsket prosess. Som nevnt i Avsnitt 5.1.4 varierer mengden NMP mye med hvilket batteri en velger å produsere og hvilke kilder en bruker. I rapporten til Ahmed et al.(a)[14] brukes det nesten like mye NMP som i denne rapporten, men med fem ganger lavere produksjon. Dette vil påvirke både kostnadene for innkjøp av NMP, samt besparelsene som gjøres. I Tabell 4.6 er det antatt at vann ikke har noen kostnad. Dette er ikke realistisk ettersom vannet som brukes som løsemiddel må være destillert, og vil derfor enten ha kostnad for innkjøp eller kostnad for rensing. Totalt sett utgjør innkjøp av materialer 98-99 % av utgiftene. Slik sett vil den reduserte kraftprisen ved å bruke GROT ikke utgjøre en stor besparing med tanke på at den desidert største utgiften ikke påvirkes av kraftprisene.

5.5 CHP-anlegget

I Tabell 4.11 er det massestrøm m_1 som er brukt. Denne er funnet ved å ta utgangspunkt i det termiske energibehovet til batterifabrikken. Ut i fra denne tabellen kan en se at anlegget produserer for lite elektrisk energi, basert på energibehovet til batterifabrikken i Tabell 4.4. I tillegg skal anlegget dimensjoneres til å kunne produsere nok energi til å tørke GROTet som skal forbrennes i anlegget. Denne ble funnet til å være 1,87 GWh/år, som nevnt i Avsnitt 4.5.1. m_1 er ikke dimensjonert til å kunne møte begge disse behovene. Anlegget det er tatt utgangspunkt i er dimensjonert til å produsere 3/4 deler termisk energi og 1/4 del elektrisk energi. Ved å bruke denne massestrømmen produserer anlegget 82 % termisk energi og 18 % strøm. For å produsere mer strøm må entalpien inn i turbinen endres, og turbinen dimensjoneres etter dette behovet.

Anlegget produserer nok termisk energi til å dekke batterifabrikkens oppvarmingsbehov. Det produserer derimot ikke nok elektrisk energi til å dekke batterifabrikkens elektriske behov. I tillegg, dersom anlegget også skal levere energi til å tørke GROTet, vil det ikke være tilstrekkelig med energi til begge formål. Alternativet her kan være å skalere anlegget annerledes slik at det blir produsert en større andel elektrisk energi. Ved å øke produksjonen og massestrømmen vil det bli produsert mer energi slik at det også kan dekke behovet til tørking av GROTet.

For den andre massestrømmen, som er presentert i Tabell 4.12, er anlegget dimensjonert til å kunne dekke det elektriske energibehovet til batterifabrikken. Tabellen viser at dette gir en betraktelig større massestrøm enn m_1 , hvilket resulterer i at anlegget også produserer betraktelig mer termisk- og elektrisk energi. Beregningene til m_2 viser at ved å skalere anlegget etter det elektriske energibehovet til batterifabrikken, produserer anlegget større mengder termisk energi enn nødvendig for de to formålene.

5.5.1 Dimensjonering

Formålet med anlegget som dimensjoneres i denne oppgaven er først og fremst produksjon av varme til bruk i batterifabrikken, deretter kommer produksjon av elkraft som et biprodukt. For å oppnå en optimal produksjon av elkraft vil det være nødvendig med et så lavt trykk ut av turbinen som mulig. Dette er fordi trykktapet gjennom turbinen regulerer mengden elkraft det er mulig å produsere. Desto større trykktap, desto større potensiale for elkraftuttak, forklart i Avsnitt 2.5.1. I anlegget som dimensjoneres er det ønskelig å beholde temperaturen så høy som overhodet mulig, samtidig som det må forekomme et stort nok trykktap til at det kan genereres tilstrekkelig med energi.

Anlegget dimensjoneres ut i fra en energibalanse. Det fokuseres på å skulle ta ut både nødvendig mengde termisk energi, hvilket tilsvarer omtrent 75 % av anleggets kapasitet, og nødvendig mengde elektrisk energi, hvilket tilsvarer omtrent 25 %. Temperaturene i det allerede eksisterende søppelforbrenningsanlegget synker fra 400°C til 130°C, hvilket er et større temperaturfall enn ønskelig. Sammen med temperaturen synker også trykket, men det er et forholdsvis lite trykkfall sammenlignet med andre anlegg som har primært fokus på elkraftgenerering [66].

Massestrømmen som sendes ut av turbinen på 15 bar og 300°C påvirker mengden varme og arbeid som kan tas ut av systemet etter turbinen, vist på Ligning 2.17 og 2.19. Det er dog tatt utgangspunkt i en konstant massestrøm når beregningene i denne oppgaven er gjennomført, ettersom vi ikke vet mengden på massen som blir tatt ut av systemet i utgangspunktet. Denne massestrømmen som sendes ut kan benyttes til tørking av GROtet, forklart lengre ned i Avsnitt 5.5.2. Mengden masse som benyttes i systemet kan reguleres av mengden vann som mates inn i matevannstanken, så dette vil være mulig å dimensjonere etter ønskelig uttak.

Under dimensjonering av anlegget må det velges en turbin. I utgangspunktet er det en to-steps uttaks dampturbin, forklart i Avsnitt 2.5.1, med toppsyklus hvor det tas ut damp ved spesifikke temperaturer underveis - i dette tilfellet 300°C. Denne turbinen benyttes videre også i det nye anlegget, da turbinens størrelse kan dimensjoneres ut i fra ønskede forhold og uttak. Teoretisk sett kan dette anlegget defineres som en bunnsyklus ettersom det først og fremst fokuseres på uttak av varme fremfor generering av elektrisitet, forklart i Avsnitt 2.5. Det er ikke høye temperaturer det jobbes med i dette tilfellet. Det varmeste uttaket har en temperatur lik 143°C som er vist i Avsnitt 3.2.2. Dette gjør at anlegget i utgangspunktet kan driftes som en toppsyklus, hvor fokuset vil ligge på generering av elkraft, og det fremdeles vil være mulig å ta ut ønsket mengde temperatur til batterifabrikken. Det er dog snakk om store mengder effekt som skal ut av anlegget.

Ved 143°C er det nødvendig med en effekt lik 3,4 MW, og ved et uttak på 23°C trengs det 1,5 MW, presentert i Tabell 4.5. Dette gjør det vanskelig å påpeke om anlegget best vil driftes som en toppsyklus eller en bunnsyklus, da effektuttaket vil påvirke mengden energi som kan genereres. Dersom det skulle være nødvendig med uttak av en langt høyere temperatur, ville det beste alternativet vært en bunnsyklus og dermed også utskifting av turbinen til en kondenseringsturbin.

Under beregningene som er gjort på energimengden som skal leveres fra CHP-anlegget er det antatt 100 % driftstid, hvilket utgjør 365 dager i året. Dette er ikke realistisk da det for eksempel er behov for renhold av anlegget 1-2 dager i måneden, som da krever at anlegget stopper opp. Både bio- og søppelforbrenningsanleggene produserer store mengder røykgass. Denne er med på å senke effekten til for eksempel kjeler og varmevekslere da de blir for skitne for optimal funksjon. I forbrenningsanlegget som er utgangspunktet for oppgaven er det en sammenkobling med et fjernvarmesystem. Denne sammenkoblingen gjør at det er et større effektbehov om vinteren sammenlignet med sommeren, da behovet for oppvarming er større når temperaturen ute er lavere. Dette medfølger også et større behov for rengjøring av anlegget, da behovet for konstant optimal effekt er større. Et typisk søppelforbrenningsanlegg hos Eidsiva stopper vanligvis opp to uker om sommeren, hvilket ikke vil være tilfellet for dette anlegget ettersom batterifabrikken krever tilnærmet konstant produksjon av varme og arbeid. En mer realistisk driftstid ville vært på 93 %. Oppkoblingen med batterifabrikken skaper også et behov for et mer robust bioanlegg enn det som er koblet til et fjernvarmeanlegg. Vanlige forbrenningsanlegg som driftes på biomasse er gjerne noe billigere bygd, og vil derfor ha et større behov for rengjøring og tilsvarende.

5.5.2 GROT

Et forslag fra Eidsiva er at forbrenningsanlegget skal driftes 100 % med GROT som biomasse. Det er ikke gjort noe uttak av GROT i Norge på flere år, som fortalt i Avsnitt 3.6.1. Dersom det skulle bli tatt ut nok GROT til å drive hele forbrenningsanlegget, hadde det vært behov for 16 000 tonn GROT. Dette er vekten etter tørking, hvilket tilsvarer 27 200 tonn GROT før tørking, altså 35 556 m³ med trerester. Tørking av denne mengden krever 1,36 GWh. Det er ikke usannsynlig å kunne foreta et uttak av denne mengden GROT da det er antatt et mulig uttak på 330 000 m³ fra Innlandet. Eidsiva importerer allerede deler med biomasse fra blant annet Stora Enso i Sverige, og det vil derfor ikke være usannsynlig med import av deler GROT fra andre områder. Det som derimot sees på som usannsynlig, er at GROT-uttaket skal gå fra ingenting til flere tusen m³ i sammenheng med oppstarten av denne batterifabrikken. Anlegget vil derfor driftes på flis og GROT i

oppstartsfasen, og bevege seg mot kun bruk av GROT.

Når det forklares at energi fra CHP-anlegget skal benyttes til tørking av GROT, som videre igjen skal inn i anlegget å benyttes som brensel, kan det oppfattes som en syklus hvor utfallet er at GROTTet blir brent uten noe særlig energiutbytte. Dette er ikke tilfellet, og teorien bak er at når fuktigheten reduseres med 35 %, hvilket er utgangspunktet i denne oppgaven, så øker også energitettheten med 2,8 MJ/kg. Deler av denne energien vil igjen benyttes til tørking av ny GROT. Ettersom det er nødvendig med 0,5-0,7 MJ/kg_{H₂O} som skal fordampes i dette anlegget, og det er 382,5 kg_{H₂O}/m³ GROT, vil energiforskjellen være på 317,5 kWh/m³ ved å benytte seg av tørket GROT. Her er det ikke beregnet med nødvendig elektrisk kraft til å drive selve tørkeanlegget. Det antas at denne energiforskjellen vil omtrent nulles ut. Dette på grunn av at energien som totalt benyttes til tørking av GROT vil være lik energien en får ut av forbrenningen.

Forbrenningsovnen er avhengig av et jevnt fuktighetsinnhold i brenselet, og det er derfor viktig at GROTTet tørkes dersom det skal benyttes. GROT har generelt ujevn fuktprosent ettersom at delene i brenselet er av ulik størrelse, hvilket kan skape komplikasjoner i anlegget. Det tas i sammenheng med dette utgangspunkt i at det benyttes et pneumatisk tørkesystem, hvilke ytelsesverdier er vist i Tabell 3.9, for tørking av denne massen. Dette tørkesystemet er valgt fordi det er det som hovedsaklig benyttes til tørking av GROT, i tillegg til at det er mulighet for uttak av damp i anlegget. Det andre alternativet ville vært båndtørker da det er gode muligheter for integrering av uttak til denne i det allerede eksisterende anlegget. Uttaket for det pneumatiske tørkesystemet er antatt å være plassert i to-stegsturbinen, likt som i systemet som er benyttet som utgangspunkt. Dampen som går ut vil være tørkesystemets oppvarmingsmedium, hvilket er høytrykksdamp ved 0,7-2,6 MPa, og i dette tilfellet 1,5 MPa ved 300°C.

I følge en rapport av Ranius et al. [67] hvor det ble gjort et studie på veksteffekt i skog ved uttak av GROT, viste 31 % negativ effekt, mens 66 % viste ingen effekt. Det er for det meste granskogen som påvirkes negativt av høstingen av GROT. Andelen uten noen effekt er over dobbelt så stor som den uten, men samtidig er andelen med negativ effekt over ti ganger så stor som andelen med positiv effekt. Det kan derfor verken antas at tilveksten i Innlandet vil ha positiv eller negativ effekt av uttaket av GROT. Det bør derfor begynnes med et moderat uttak, etterfulgt av en økende mengde hvis det viser seg å ha ingen eller positiv effekt på tilveksten av nye trær.

5.5.3 Kostnader

I tabellene 4.13 og 4.14 er det presentert en oversikt over totale kostnader for benyttning av flis og GROT som brensel. Dersom GROT ikke hadde vært en del av systemet, og anlegget driftes på flis med en fuktandel på 50 %, ville prisen for biobrenselet vært 19 millioner kroner. Ved å gjøre GROT til 25 % av brenselet, vil den totale kostnaden for brensel reduseres med omtrent 1,5 millioner kroner. Total utskifting av flis med GROT gir en forskjell på 6,5 millioner kroner. Dersom en sammenligner flis med 50 % og 35 % fukt, hvor forholdet flis og GROT er 1:1, vil prisforskjellen være på 0,76 millioner kroner. Det er derfor økonomisk gunstig å benytte flis med 50 % fukt. Den store forskjellen mellom flis og GROT er at GROT er mye billigere å brenne. Mengden energi som er nødvendig for tørkingen av GROT kommer fra overskuddsdamp i CHP-anlegget, og det vil derfor ikke medføre ekstra kostnader å tørke massen.

Ut i fra Tabell 3.11 ser man at pellets er den formen for biomasse som er desidert dyrest. Pelletsen er nesten dobbelt så dyrt som flis med 50 % fuktinnhold, som gjør at det ikke er økonomisk lønnsomt å benytte seg av det. Dersom en kun ser på utgifter for biomasse, vil det være billigere å benytte seg av for eksempel fossilt brensel fremfor pellets [68]. Dette vil dog ha miljøkonsekvenser som det er ønskelig å unngå. I tillegg er det, ut i fra Tabell 3.11, tydelig at GROT er det brenselet med billigst forbrenningspris. Det er derfor ønskelig med konstant tilgang på flis og GROT som brensel, slik at det ikke vil være nødvendig å ta i bruk noe annet.

5.6 Integrering av bioanlegg og batterifabrikk

For å kunne se realiseringsmulighetene til dette kombinerte anlegget blir det sett på dimensjonering, økonomi, utfordringer og muligheter for både forbrenningsanlegget og batterifabrikken.

5.6.1 Dimensjonering

Hensikten til Eidsiva med å kombinere forbrenningsanlegget med batterifabrikken er å få et jevnere forbruk av termisk energi. Behovet for termisk energi i husstander varierer, for eksempel for de ulike årstidene. Eidsiva har allerede etablerte fjernvarmeanlegg i område som dekker dette behovet, derfor trengs det ikke mer termisk energi til dette formålet. Det er likevel potensiale for å produsere mer termisk energi i området, og ideen til Eidsiva er å finne andre bruksområder for denne energien. Et totalt termisk behov på 57,07 GWh vil være passelig for et bioforbrenningsanlegg for Eidsiva, basert på at deres nåværende bioanlegg ligger mellom 30 GWh og 60 GWh [69]. Videre ser en at det elektriske

energibehovet kun ligger på 25 % av det totale. Dette betyr at det må foretas en evaluering av hva forbrenningsanlegget skal driftes for. Hvis hensikten med forbrenningsanlegget kun er å forsyne batterifabrikken med energi vil det totale energibehovet bli 75,47 GWh, hvor tørking av GROT er medregnet. Dette vil være mulig, men krever at trykkfallet over turbinen økes slik at den kan produsere de nødvendige 18 GWh med elektrisitet som kreves. På den andre siden kan det være ønskelig at forbrenningsanlegget produserer mer energi enn fabrikken trenger. Hvis dette er tilfellet burde andelen elektrisk energi øke. Det antas at fjernvarmebehovet i området er dekt, og at det derfor ikke vil være hensiktsmessig å produsere mer termisk energi. CHP-anlegg med fokus på elektrisitet vil hovedsakelig produsere 1/3 termisk energi og 2/3 elektrisk energi. Hvis et slikt anlegg implementeres vil det øke den elektriske produksjonen til 151 GWh, og den totale produksjonen til 226 GWh. Dette vil kreve ekstensiv utbygging av infrastruktur, og det antas at dette vil være et urealistisk scenario. Det er anbefalt med 2/3 termisk energi og 1/3 elektrisk energi, hvilket vil gi en total energiproduksjon på 113 GWh. Dette vil være et mer realistisk scenario og gi et overskudd på 19 GWh elektrisk energi som kan selges på kraftnettet. Den nødvendige mengden tørket GROT for å drive en slik produksjon vil være over 24 000 tonn i året. Realiseringen av dette anlegget vil være avhengig av prisen på strøm i Innlandet. Ettersom det i dag antas at kraftprisene kommer til å øke fremover kan dette være en god løsning som Eidsiva burde se mer på [70].

5.6.2 Total økonomi

Ut i fra Tabell 4.9 er det tydelig at GROT er det billigste alternativet. Dette er tilfellet både når en ser på kjøp av kraft fra kraftnettet, samt hvis en ser på bruk av flis i forbrenningsanlegget. Selv om flis benyttes fremfor GROT, vil det fortsatt være billigere enn å kjøpe fra kraftnettet. Her er det tatt utgangspunkt i null kapitalkostnader, og dersom dette regnes med vil det hovedsakelig ikke være noen grunn til bruk av flis til forbrenning, ettersom differansen per kWh vil være såpass liten. Pellets vil være økonomisk gunstig kun hvis en sammenligner det med kraftprisen for vanlig industri. Det vil derfor ikke i noen scenarioer være hensiktsmessig å fyre med pellets. Selv om det i teorien vil være mulig å spare 9 øre/kWh på å benytte GROT over flis, kan det hende at prisen på GROT må øke for å skape insentiv til å hente det ut. Et annet alternativ vil være å importere GROT fra Sverige eller Finland, ettersom det alt tas ut GROT her[71]. Eventuelle bivirkninger av dette vil være økt klimaavtrykk, samt mulig prisøkning på grunn av kostnader til transport.

5.6.3 utfordringer

En stor utfordring når det kommer til kombinasjonen av anleggene er hvordan varmeoverføringen skal skje. I og med at det er varmluft som brukes i batteriproduksjon og ikke damp, vil det være nødvendig med én vann-luft varmeveksler. Dette vil enten kreve et komplekst system av enkeltstrømmer, eller en stor kondensator som videre må gå til enkeltstrømmene. Den store effekten, kombinert med relativt lave temperaturer, gjør at det vil være nødvendig med store volumstrømmer med luft. Hvordan slike varmevekslere burde implementeres er ikke vurdert her, og det anbefales at det gjøres videre undersøkelser på dette området. Det vil også være utfordringer knyttet til klima. Innlandet har stor variasjon i klima, både i luftfuktighet og temperatur. De nødvendige systemene for tørking og tørrom må tåle stor variasjon i omgivelsesluft. Dette kan gjøre at effektbehovet varierer, og dermed må forbrenningsanlegget dimensjoneres for større variasjon i levert effekt.

5.6.4 Fremtidige muligheter

Som vist i rapporten til Guddingsmo et al. vil det være gode muligheter for å redusere effektbruken til komponentene i batterifabrikken ved bruk av varmevekslere og varmpumper. I Tabell 4.5 er de forskjellige varme og kalde strømmene som kan brukes i en MER-analyse listet opp for å se mulighetene for energibesparelse. Dette kan også kombineres med de varme og kalde strømmene i forbrenningsanlegget til å videre effektivisere hele prosessen. Hvis alle strømmer blir vurdert vil dette mest sannsynlig kreve et veldig stort areal med varmevekslere, kompliserte beregninger og store kapitalkostnader. Videre undersøkelser anbefales for å se på mulighetene for å optimalisere dette for best mulig utnytting av energi uten at kostnadene øker. Generelt sett vil det være store muligheter for å etablere en næring basert på GROT i Innlandet. Det vil være utfordringer knyttet til dette, men som vist i rapporten fra NIBIO er det potensialet der [72]. Slik sett kan en si at GROTet vil være en stor mulighet, men også en utfordring.

6 Konklusjon

Å produsere batterier krever en stor mengde energi. Dette vil hovedsakelig gå til to prosesser: tørrom og tørking. For produksjon av 5 GWh med NMC333 batteri vil disse to prosessene kreve 68,8 GWh av det totale energibehovet på 73,6 GWh. Av dette vil 75 % gå til oppvarming. Dette viser at det er gode muligheter for å forsyne batterifabrikken med termisk energi direkte fra et forbrenningsanlegg.

For å produsere 5 GWh med batteri trengs det 4,6 millioner kg NMP. For å fordampe og samle opp denne NMPen trengs det 45,9 GWh, 30,3 m³/s med luft og en makstemperatur på 143°C. Tørromssystemet som trengs for å holde luftfuktigheten nede vil ikke kreve høye temperaturer, men trekker likevel høy effekt på grunn av den nødvendige luftstrømmen. Energibruken i tørrommet og tørkingen vil kunne reduseres stort ved implementering av varmevekslere og varmepumper. Dette vil bli et komplekst system hvor arealbruk og kapitalkostnader må veies opp mot effektbesparelser. Det vil være muligheter for å dimensjonere anlegget til å produsere overskuddsstrøm som kan selges på kraftnettet. Dette vil bestemme størrelsen på forbrenningsanlegget, og det må foretas en vurdering opp mot kraftkostnadene for å se om dette er lønnsomt. Det vil være nok GROT i Innlandet til å drive storstilt brenning. Totalt vil det kreve 16 000 tonn tørket GROT i året, som krever en energimengde på 1,86 GWh å tørke. Den begrensende faktoren for GROTet blir å etablere en næring fra bunnen av.

Å kombinere forbrenningsanlegg med batteriproduksjon er både mulig og ønskelig å gjennomføre. Usikkerhetsmomentene er energibruken til batterifabrikken, samt den tekniske implementeringen av varmeoverføring. Prosjektet er økonomisk bærekraftig i forhold til kraftpriser, men de økonomiske mulighetene vil i høy grad være avhengig av kapitalkostnadene som ikke ble vurdert i denne oppgaven.

7 Videre arbeid

Det anbefales at det gjøres videre undersøkelser på systemer for energioppsamling av NMP, ettersom dette står for store deler av energibruken. Det kan også være hensiktsmessig å unngå NMP, og heller bruke et bindemiddel i katoden som ikke trenger oppsamling. Eksempelvis er vann lite energikrevende, men da må blandingen til elektroden tilpasses dette, og undersøkelser må gjøres på kjemiske bindemiddel som kan brukes med vann.

Det vil også være hensiktsmessig å gjøre videre undersøkelser på energibruken i tørrommet. Her er det store variasjoner i litteraturen, basert på forskjellig teknologi og størrelse. Det vil også være nødvendig å se på hvordan endringer i temperatur og luftfuktighet vil påvirke tørrommet, ettersom klima i Innlandet varierer stort.

Hvordan varmevekslere og varmepumper implementeres vil ha mye å si for kapitalkostnadene, samt den tekniske gjennomføringsevnen til prosjektet. Dette krever ekstensive undersøkelser i arealoptimalisering, teknisk implementering, geografiske begrensninger og kostnadsoptimalisering. Effektiv bruk av varmevekslere vil derfor være essensielt for realiseringsmulighetene til prosjektet, og det anbefales at det gjøres videre undersøkelser på potensialet som ligger i varmevekslere.

Det anbefales å gjøre undersøkelser på modellering av gigafabrikker for å se hvordan skalering av produksjonen påvirker energibehovet. De økologiske konsekvensene fra uttak av GROT er usikre. For å unngå uforutsette miljøskader er det nødvendig med mer forskning på konsekvensene av GROT-uttak, og hvilken påvirkning det har på økosystemet.

Referanser

- [1] Knut A. Rosvold. *oppladbare batterier*. I: SNL, 1. jan. 2020. URL: https://snl.no/oppladbare_batterier (sjekket 29.03.2022).
- [2] OECD. *Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?* Paris: Organisation for Economic Co-operation og Development, 2020. URL: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/global-ev-outlook-2020_d394399e-en (sjekket 30.03.2022).
- [3] A Kampker. «Think big, start small». I: (), s. 221.
- [4] *Hvordan fungerer batterier? - Kjemisk institutt*. URL: <https://www.mn.uio.no/kjemi/forskning/tema/batterier/artikler> (sjekket 28.03.2022).
- [5] Tom Carruthers. *The memory effect of rechargeable batteries*. Curious. 1. nov. 2017. URL: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/memory-effect-rechargeable-batteries> (sjekket 28.04.2022).
- [6] *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources - 1st Edition*. URL: <https://www.elsevier.com/books/encyclopedia-of-electrochemical-power-sources/garclhe/978-0-444-52093-7> (sjekket 19.04.2022).
- [7] *Hydrovolt har startet byggingen av verdensledende gjenvinningsanlegg for batterier i Norge*. URL: <https://www.hydro.com/no-NO/media/news/2021/hydrovolt-has-started-to-construct-world-leading-battery-recycling-plant-in-norway/> (sjekket 19.04.2022).
- [8] Ruihan Liu. *Perspective: Current and future lithium-ion battery manufacturing*. Tekn. rapp. iScience. (Sjekket 04.04.2022).
- [9] Reiner Korthauer, red. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 978-3-662-53069-6 978-3-662-53071-9. DOI: 10.1007/978-3-662-53071-9. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9> (sjekket 24.02.2022).
- [10] Geir Martin Haarberg. *katode*. I: *Store norske leksikon*. 13. sep. 2021. URL: <http://snl.no/katode> (sjekket 14.05.2022).
- [11] Jakob Sandstad og Geir Martin Haarberg. *elektrode*. I: *Store norske leksikon*. 7. nov. 2021. URL: <http://snl.no/elektrode> (sjekket 31.03.2022).
- [12] *anode*. I: *Store norske leksikon*. 13. sep. 2021. URL: <http://snl.no/anode> (sjekket 31.03.2022).
- [13] *Understanding Graphene Batteries*. AZoNano.com. Section: Nanotechnology Article. 21. des. 2016. URL: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4326> (sjekket 19.04.2022).

- [14] Shabbir Ahmed mfl. «Energy impact of cathode drying and solvent recovery during lithium-ion battery manufacturing». I: *Journal of Power Sources* 322 (2016), s. 169–178. ISSN: 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.102>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531630475X>.
- [15] Bruno Scrosati og Jürgen Garche. «Lithium batteries: Status, prospects and future». I: *Journal of Power Sources* 195.9 (1. mai 2010), s. 2419–2430. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309020564> (sjekket 30.03.2022).
- [16] Ivar Gunvaldsen, Steinar Mathiesen og Knut A. Rosvold. *batteri*. I: *Store norske leksikon*. 1. jan. 2022. URL: <http://snl.no/batteri> (sjekket 30.03.2022).
- [17] Asanthi Jinasena, Odne Stokke Burheim og Anders Hammer Strømman. «A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing». eng. I: *21* (2021). Accepted: 2021-11-25T08:06:20Z. ISSN: 2313-0105. DOI: 10.3390/batteries7010014. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2831376> (sjekket 26.04.2022).
- [18] Shabbir Ahmed, Paul A. Nelson og Dennis W. Dees. «Study of a dry room in a battery manufacturing plant using a process model». en. I: *Journal of Power Sources* 326 (sep. 2016), s. 490–497. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.107. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775316308199> (sjekket 10.05.2022).
- [19] R. Narayanan. «Chapter Seven - Heat-Driven Cooling Technologies». I: (2017). Red. av Mohammad G. Rasul, Abul kalam Azad og Subhash C. Sharma, s. 191–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805423-9.00007-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128054239000077>.
- [20] *Chemical Engineering Volume 1 - 6th Edition*. URL: <https://www.elsevier.com/books/chemical-engineering-volume-1/chhabra/978-0-08-050101-7> (sjekket 14.05.2022).
- [21] *How do Desiccant Dehumidifiers Work*. en-CA. Apr. 2020. URL: <https://www.ode1lassoc.com/how-do-desiccant-dehumidifiers-work/> (sjekket 15.05.2022).
- [22] LOOP-Stiftelsen for Kildesortering og Gjenvinning. *forbrenningsanlegg*. nb. Jul. 2018. URL: <http://snl.no/forbrenningsanlegg> (sjekket 21.04.2022).
- [23] *Slik fungerer forbrenningsprosessen*. Fortum.no. URL: <https://www.fortum.no/be-drift/avfall-og-energigjenvinning/energigjenvinning-og-avfallshandtering/slik-fungerer-forbrenningsprosessen> (sjekket 05.05.2022).
- [24] Ivar Nestaas. *elektrofilter*. nb. Jul. 2018. URL: <http://snl.no/elektrofilter> (sjekket 21.04.2022).

- [25] Line Ødegård Angeloff, Vidar Lund og Fredrik Jordhøy. *Kjøletårn*. no. URL: <http://www.fhi.no/nettpub/legionellaveilederen/temakapitler/kjoletarn2/> (sjekket 21.04.2022).
- [26] Knut Hofstad. *Rankine-syklus*. nb. Des. 2021. URL: <http://snl.no/Rankine-syklus> (sjekket 21.04.2022).
- [27] Hüseyin Topal. «Thermal design of fluidized bed steam boiler using refuse derived fuel (rdf) in organic rankine cycle». I: *gazi university journal of science* 5 (2018), s. 173–189.
- [28] «Property tables and charts (SI UNITS) Appendix 1». I: URL: https://homepages.wmich.edu/~cho/ME432/Appendix1Udated_metric.pdf (sjekket 26.04.2022).
- [29] *Combined Heat and Power*. URL: https://web.p.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook?sid=aaa187ef-4960-4a9e-985b-2420887949b9%40redis&ppid=pp_33&vid=0&format=EB (sjekket 21.04.2022).
- [30] Bjørn Pedersen. *varmeveksler*. nb. Sep. 2017. URL: <http://snl.no/varmeveksler> (sjekket 05.05.2022).
- [31] Knut A. Rosvold. *biomasse – bioenergi*. nb. Jan. 2021. URL: http://snl.no/biomasse_-_bioenergi (sjekket 02.05.2022).
- [32] Tore J. Brænd og Knut Hofstad. *bioenergi*. nb. Sep. 2020. URL: <http://snl.no/bioenergi> (sjekket 02.05.2022).
- [33] *Skogeiendommer*. nb. URL: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogeiendommer> (sjekket 21.04.2022).
- [34] Publisert: 11.08.2017. *Pellets*. no. URL: <https://www.nibio.no/tema/skog/bruk-av-tre/bioenergi/pellets> (sjekket 02.05.2022).
- [35] Simen Gjølshjøl. *Skog*. Forelesningsnotater. Mai 2022.
- [36] Gry Alfredsen mfl. «Sekundærråstoff fra trebaserte verdikjeder i Norge». no. I: (), s. 40.
- [37] Knut Hofstad. «GROT – hogstavfall». nb. I: *Store norske leksikon* (nov. 2019). URL: http://snl.no/GROT_-_hogstavfall (sjekket 05.04.2022).
- [38] L. Fagernäs mfl. «Drying of biomass for second generation synfuel production». en. I: *Biomass and Bioenergy* 34.9 (sep. 2010), s. 1267–1277. ISSN: 0961-9534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.04.005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410001297> (sjekket 27.04.2022).
- [39] *BatPaC: Battery Manufacturing Cost Estimation | Argonne National Laboratory*. en. URL: <https://www.anl.gov/partnerships/batpac-battery-manufacturing-cost-estimation> (sjekket 05.05.2022).
- [40] Silje Nornes Bryntesen mfl. «Opportunities for the State-of-the-Art Production of LIB Electrodes—A Review». I: *Energies* 14.5 (jan. 2021). Number: 5 Publisher:

- Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 1406. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14051406. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1406> (sjekket 19.04.2022).
- [41] *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook - 2nd Edition*. URL: <https://www.elsevier.com/books/fluorinated-coatings-and-finishes-handbook/mckeen/978-0-323-37126-1> (sjekket 11.04.2022).
- [42] Zhongli Wang mfl. «CMC as a binder in LiNi_{0.4}Mn_{1.6}O₄ 5V cathodes and their electrochemical performance for Li-ion batteries». I: *Electrochimica Acta* 62 (15. feb. 2012), s. 77–83. ISSN: 0013-4686. DOI: 10.1016/j.electacta.2011.11.094. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468611017683> (sjekket 02.05.2022).
- [43] Wenjia Zhang mfl. «Effect of slurry preparation and dispersion on electrochemical performances of LiFePO₄ composite electrode». I: *Ionics* 17.5 (1. jun. 2011), s. 473–477. ISSN: 1862-0760. DOI: 10.1007/s11581-011-0560-4. URL: <https://doi.org/10.1007/s11581-011-0560-4> (sjekket 16.04.2022).
- [44] Chia-Chen Li og Yu-Sheng Lin. «Interactions between organic additives and active powders in water-based lithium iron phosphate electrode slurries». I: *Journal of Power Sources* 220 (15. des. 2012), s. 413–421. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.125. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312012670> (sjekket 16.04.2022).
- [45] Jianlin Li mfl. «Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries». I: *JOM* 69.9 (1. sep. 2017), s. 1484–1496. ISSN: 1543-1851. DOI: 10.1007/s11837-017-2404-9. URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2404-9> (sjekket 16.04.2022).
- [46] Dominic Bresser mfl. «Alternative binders for sustainable electrochemical energy storage – the transition to aqueous electrode processing and bio-derived polymers». I: *Energy & Environmental Science* 11.11 (7. nov. 2018). Publisher: The Royal Society of Chemistry, s. 3096–3127. ISSN: 1754-5706. DOI: 10.1039/C8EE00640G. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ee/c8ee00640g> (sjekket 16.04.2022).
- [47] Emil Oppegård mfl. «Study of an Industrial Electrode Dryer of a Lithium-Ion Battery Manufacturing Plant: Dynamic Modeling». en. I: mar. 2021, s. 77–84. DOI: 10.3384/ecp2017677. URL: https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=ecp&issue=176&Article_No=11 (sjekket 09.04.2022).
- [48] «Modeling and analysis of solvent removal during Li-ion battery electrode drying | Elsevier Enhanced Reader». en. I: (). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.007. URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S037877531830007>

7?token=E35FF836105AC132CD74B55B65D7ED7F4F23CAC194EB4D1793A810796D7574328D9E53E18A3B39C2628FC9525ED557E9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220502095842 (sjekket 02.05.2022).

- [49] Håkon Guddingsmo mfl. «Energy Reduction in Lithium-Ion Battery Manufacturing using Heat Pumps and Heat Exchanger Networks». en-US. I: *Scandinavian Simulation Society* (mar. 2022), s. 211–218. ISSN: 1650-3740. DOI: 10.3384/ecp21185211. URL: <https://ecp.ep.liu.se/index.php/sims/article/view/347> (sjekket 07.05.2022).
- [50] *09364: Kraftpriser i sluttbrukermarkedet, etter kontraktstype, statistikkvariabel og kvartal. Statistikkbanken.* no. URL: <https://www.ssb.no/system/> (sjekket 27.04.2022).
- [51] *Kraftintensiv industri - Avgrensning av begrepet.* no. URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/kraftintensiv-industri> (sjekket 27.04.2022).
- [52] Tekniske Nyheter AS. *Energirapporten.* Tekn. rapp. 33. Tekniske Nyheter AS, nov. 2020. (Sjekket 25.04.2022).
- [53] *Produksjon av tømmer.* no-NO. URL: <https://www.skogbruk.nibio.no/produksjon-av-tommer> (sjekket 21.04.2022).
- [54] *Brennverdi og energimengde.* no. URL: <https://www.nibio.no/tjenester/brennverdi-og-energimengde> (sjekket 21.04.2022).
- [55] Publisert: 10.08.2017. *Flis.* no. URL: <https://www.nibio.no/tema/skog/bruk-av-tre/bioenergi/brenselflis> (sjekket 21.04.2022).
- [56] *Veiledning om montering og drift av fyringsanlegg for brensel av trepellets / Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.* URL: <https://www.dsb.no/lover/brannvern-brannvesen-nodnett/veiledning-til-forskrift/veiledning-om-montering-og-drift-av-fyringsanlegg-for-brensel-av-trepellets/#tekniske-data-for-trepellets> (sjekket 21.04.2022).
- [57] Knut Hofstad. *energivare.* nb. Aug. 2019. URL: <http://snl.no/energivare> (sjekket 28.04.2022).
- [58] Kjersti Simen Gjølsjø Holt Hanssen. *GROT - muligheter og utfordringer.* Tekn. rapp. Mai 2019. URL: <https://skogogtre.files.wordpress.com/2019/06/gjc3b81sjc3b8-hanssen-2019-grot.pdf> (sjekket 27.04.2022).
- [59] Publisert: 08.08.2017. *Trevirkets brennverdi.* no. URL: <https://www.nibio.no/tema/skog/bruk-av-tre/bioenergi/trevirkets-brennverdi> (sjekket 21.04.2022).
- [60] *Three battery technologies that could power the future.* Saft | Batteries to energize the world. 3. apr. 2017. URL: <https://www.saftbatteries.com/media-resourc>

- es/our-stories/three-battery-technologies-could-power-future (sjekket 15.05.2022).
- [61] Jan-Hinnerk Schünemann. «Modell zur Bewertung der Herstellkosten von Lithiumionenbatteriezellen». Ph.d.-avh. Apr. 2015.
- [62] «Elsevier Enhanced Reader». en. I: (). DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.097. URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S221282711930099X?token=31103A355C409047B75227D132B581421C632FFE1811423EDFD9E7BC05A9B0586111460E6C2BF5188F7A42F4CAD2C0BA&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220504120803> (sjekket 04.05.2022).
- [63] Stefan Jaiser mfl. «Investigation of film solidification and binder migration during drying of Li-Ion battery anodes». en. I: *Journal of Power Sources* 318 (jun. 2016), s. 210–219. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.04.018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316303561> (sjekket 03.05.2022).
- [64] David L. Wood mfl. «Technical and economic analysis of solvent-based lithium-ion electrode drying with water and NMP». en. I: *Drying Technology* 36.2 (jan. 2018), s. 234–244. ISSN: 0737-3937, 1532-2300. DOI: 10.1080/07373937.2017.1319855. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2017.1319855> (sjekket 04.05.2022).
- [65] *Klima av Hamar: Vanntemperatur, Temperaturer, klima grafer, klima tabeller for Hamar - Climate-Data.org*. URL: <https://no.climate-data.org/europa/norge/hedmark/hamar-9411/> (sjekket 10.05.2022).
- [66] Howard N. Boettner Moran Michael J. Shapiro. *Principles of Engineering Thermodynamics*. (Sjekket 14.05.2022).
- [67] Thomas Ranius mfl. «The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis». en. I: *Journal of Environmental Management* 209 (mar. 2018), s. 409–425. ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.048. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717312288> (sjekket 05.05.2022).
- [68] *Bioenergi – Biomasse som energikilde*. Fjordkraft. URL: <https://www.fjordkraft.no/bedrift/fornybar-energi/bioenergi/> (sjekket 14.05.2022).
- [69] *Våre lokasjoner*. no. URL: <https://www.eidsivabioenergi.no/om-oss/vare-lokasjoner/> (sjekket 11.05.2022).
- [70] *Forsterket klimapolitikk påvirker kraftprisene | Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)*. no. URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/forsterket-klimapolitikk-pavirker-kraftprisene?publisherId=89280&releaseId=17918449> (sjekket 11.05.2022).

- [71] *Skog som biomasseressurs*. 2011. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/2762/ta2762.pdf> (sjekket 19.05.2022).
- [72] Aksel Granhus. «Potensial for uttak av GROT fra sluttavvirkninger i Innlandet». no. I: (), s. 12.