

Bratland, Kirsti
Hubbuck, Maria Eileen
Austjord Vik, Andrea

Tilrettelegging for deltakelse i et fleksibilitetsmarked

Pirbadets rolle og mulighet til å delta i et fleksibilitetsmarked

Bacheloroppgave i Fornybar Energi

Veileder: Kristian Myklebust Lien

Mai 2020

Bratland, Kirsti
Hubbuck, Maria Eileen
Austjord Vik, Andrea

Tilrettelegging for deltakelse i et fleksibilitetsmarked

Pirbadets rolle og mulighet til å delta i et fleksibilitetsmarked

Bacheloroppgave i Fornybar Energi
Veileder: Kristian Myklebust Lien
Mai 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosesseteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: Tilrettelegging for deltakelse i et fleksibilitetsmarked	Innleveringsdato: 22.05.2020
Project title: Groundwork for participation in a flexibility market	Antall sider / vedlegg 69 / 10
Gruppedeltakere: Kirsti Bratland Maria Eileen Hubbuck Andrea Austjord Vik	Veileder: Kristian Myklebust Lien Førsteamanuensis, NTNU kristian.m.lien@ntnu.no +47 73412147
Studieretning: Ingeniør i Fornybar Energi	Prosjektnummer: FEN2007
Oppdragsgiver: TrønderEnergi AS	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Magnus Fure Runnerstrøm Magnus.Runnerstrom@tronderenergi.no

Åpen for publisering

Midlertidig båndlagt

Åpen for publisering etter

Forord

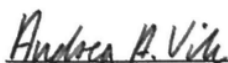
Denne bacheloroppgaven er skrevet i samarbeid mellom tre studenter ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, våren 2020. Studentene tilhører studieprogrammet Fornybar energi ved Institutt for energi- og prosesseteknikk, og danner gruppen FEN2007. Oppgaven teller 20 studiepoeng og tilhører emnet TFNE3001. I forbindelse med prosjektet +CityxChange er oppgaven utviklet i samarbeid med TrønderEnergi.

Vi ønsker i den anledning å takke Magnus Fure Runnerstrøm, ekstern veileder fra TrønderEnergi, for god hjelp og veiledning. Videre ønsker vi å takke vår interne veileder Kristian Myklebust Lien, førsteamanuensis ved Institutt for energi- og prosesseteknikk ved NTNU for gjennomgående veiledning, korrekturlesing og deltakelse.

I tillegg til våre to veiledere ønsker vi å takke driftsansvarlig ved Pirbadet, Trond Sigernes, for omvisning og godt samarbeid. Videre ønsker vi å takke arkitekt Leif Arne Skei ved Asplan Viak og Ole Øiene Smedgård ved SIAT for tilgang til plantegninger og relevant litteratur. For veiledning innen bruk av programvarene Aspen HYSYS og MATLAB ønsker vi å takke stipendiat Sayed Ebrahim Hashemi og vitenskapelig assistent Tor Hennem. Vi ønsker å rette en takk til overingeniør Bjørn Selnes-Volseth for utlån av måleutstyr fra instituttet.

Til slutt ønsker vi å takke førsteamanuensis og studieprogramveileder for Fornybar energi, Håvard Karoliussen, professor Odne Stokke Burheim og Morten Onsrud i NORSIRK for veiledning innen batterier.

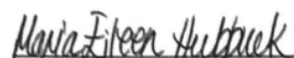
Trondheim, 22.05.2020



Andrea Austiord Vik



Kirsti Bratland



Maria Eileen Hubbuck

Sammendrag

Det norske kraftnettet står i dag ovenfor utfordringer som økende elektrisitetsbehov, uregulerbar fornybar energiproduksjon, endringer i forbruksmønster og desentralisert energiproduksjon. Smartby-prosjektet +CityxChange, med Trondheim og Limerick som fyrårnsbyer, etablerer smarte energiløsninger for å møte disse utfordringene og dekke den økende etterspørselen etter kraft.

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke den potensielle fleksibiliteten Pirbadet kan tilby for +CityxChange på Brattøra i Trondheim. Som Norges største innendørs badeanlegg er Pirbadet påvirket av både termiske og elektriske laster. Tidligere har studier blitt utført for å avdekke forbruksmønsteret for ulike laster på Pirbadet. Herunder er ikke fordampningstap i storhallen, energigjenvinning av avkastluft og det elektriske forbruket bak den bølge-genererende maskinen studert. Herav undersøker denne oppgaven de nevnte tilfellene med mulige løsninger innen laststyring, effektoppreduksjon og energieffektivitet.

Bruk av kjølebatteri i avkastkanalen og reduksjon av fordampningstap er relatert til den relative fuktigheten, ϕ , og forbruket av fjernvarme. På grunn av manglende målinger for temperatur og ϕ , ble beregninger og simuleringer basert på antakelser. Gjenvunnet varmemengde ble simulert for $\phi = 80\%$ og $\phi = 100\%$, som resulterte i en daglig energireduksjon på henholdsvis 955,4 kWh og 1480 kWh.

Videre studeres varmetapet fra fordampning for seks basseng på Pirbadet, hvor det antas at 50% av varmetapet kan reduseres ved å implementere bassengovertrekk. Følgelig fører dette til en reduksjon i totalt fjernvarmeforbruk på 0,71% for $\phi = 80\%$. For $\phi = 64,3\%$ kan bassengovertrekk redusere det totale fjernvarmeforbruket med 2,19%. Kostnadsanalysen avdekket at tildekking av boblebadene vil være den eneste økonomisk lønnsomme investeringen. Basert på reduksjon av fjernvarme for både kjølebatteriet og varmetap fra fordampning, anslås den totale energireduksjonen til omtrent 1495 kWh/døgn, avhengig av ϕ .

For å undersøke muligheten for laststyring av den bølge-genererende maskinen, har tre ulike driftssituasjoner av et ideelt NMC-batteri blitt simulert for å erstatte drift fra nettet. Basert på antatt investeringskostnad konkluderes det med, til tross for reduksjon av effektopper, at investeringen ikke vil være lønnsom uten økonomisk støtte.

Tidligere arbeid har konkludert med at det ikke er økonomisk lønnsomt for Pirbadet å delta som prosumert i et fleksibilitetsmarked. Basert på dette prosjektets resultat vil det heller ikke være lønnsomt for Pirbadet å benytte laststyring for aktiv deltakelse i markedet. Pirbadets rolle i et fleksibilitetsmarked vil da eventuelt være som passiv forbruker, hvor bygget i hovedsak vil kunne bidra ved reduksjon av eget forbruk.

Summary

The norwegian power grid is currently facing challenges such as growing electrification, variable renewable energy production, changes in consumption patterns and decentralised energy production. +CityxChange, a smart city project with Trondheim and Limerick as lighthouse cities, establishes smart solutions to meet the rising power demand.

The purpose of this study is to examine the potential flexibility Pirbadet can provide for +CityxChange at Brattøra in Trondheim. As Norway's largest indoor bathing facility, Pirbadet is influenced by both thermal and electric loads. Previous research has conducted the consumption patterns of various loads. Nevertheless, research on evaporation, energy recovery of exhaust air and the electric consumption behind the generated waves in the wave-pool are still to be investigated. Hence, this thesis investigates these scenarios with possible solutions within load shifting, peak shaving and energy efficiency.

The use of a cross heat exchanger in the exhaust duct and the reduction of evaporation losses are related to the relative humidity, ϕ , and the consumption of district heating. Due to lack of measurements within temperature and ϕ , all calculations are based on assumptions. The amount of heat exchanged is simulated for $\phi = 80\%$ and $\phi = 100\%$, which resulted in a daily energy reduction of 955,4 kWh and 1480 kWh.

Furthermore, the heat loss from evaporation is studied for six pools at Pirbadet. It was found that 50% of the heat loss could be reduced by implementing pool covers. Followingly, this leads to a reduction in total district heating of 0,71% for $\phi = 80\%$. For $\phi = 64,3\%$, pool covers could reduce the total district heating with 2,19%. It was found that covering the hot tub would be the only profitable investment. Based on the reduction of district heating for both the cross-heat exchanger and heat loss from evaporation, the total energy reduction is estimated to approximately 1495 kWh, depending on ϕ .

In order to investigate the possibility of load management of the wave-generating machine, an ideal NMC battery has been simulated to substitute operation from the grid. Three different operating situations, defined by opening hours at Pirbadet, have been simulated. Based on the assumed investment cost, it is concluded that the investment will not be profitable without financial support.

Previous studies have concluded that it is not financially profitable for Pirbadet to participate as a prosumer in a flexibility market. Neither will load management for active participation result in a profitable solution. Pirbadet will most likely function as a passive consumer in a flexibility market, where the building will mainly contribute by reduction of its own consumption.

Begrepsliste

<i>Alkalimetall</i>	Grunnstoff i gruppe 1 i det periodiske system. Har et eller to elektroner i ytterste elektronskall.
<i>Duggpunktstemperatur</i>	Temperaturen luft må avkjøles til ved konstant trykk for at metning inntreffer og vanndampen i luften kondenserer.
<i>Fluid Package</i>	Termodynamisk modell for beregning av verdier i Aspen HYSYS.
<i>Fri overflate</i>	Overflaten til en væske som er utsatt for null parallell skjærspenning, eksempelvis grensesnittet mellom flytende vann og luft ved atmosfærisk trykk.
<i>Gråvann</i>	Betegnelse på alt avløpsvann eksklusiv kloakk.
<i>Inkompressibelt fluid</i>	Fluid med konstant tetthet.
<i>Isotermisk</i>	En termodynamisk prosess som foregår ved konstant temperatur.
<i>Kuldebro</i>	En del av bygningskonstruksjonen med høy varmeledningsevne. Leder varme fra konstruksjonen til omgivelsene.
<i>Latent varme</i>	Energi som er bundet opp i vanndamp. Energien frigjøres ved kondensasjon.
<i>Normalår</i>	Et gjennomsnittlig år for kraftproduksjon definert fra et tidsintervall gitt forholdene i en tredveårsperiode.
<i>Prosumert</i>	Bygg som både produserer og forbruker elektrisitet.
<i>Termisk masse</i>	Material med god varmeledningsevne eller konduktivitet. Materialet kan harmonere med døgnsyklus og temperatur.

Forkortelser

<i>AMS</i>	Avanserte måle- og styringssystemer
<i>BMS</i>	Battery Management System
<i>DoD</i>	Depth of charge [%]
<i>LBE</i>	Luftbehandlingsenhet
<i>LCO</i>	Litium-kobolt-oksidi
<i>LFP</i>	Litium-ferrofosfat
<i>LMO</i>	Litium-mangan-oksidi
<i>LTO</i>	Litium-titan-oksidi
<i>NCA</i>	Litium-nikkel-kobolt-aluminium
<i>NMC</i>	Litium-nikkel-mangan-oksidi
<i>SEI</i>	Solid Electrolyte Interface
<i>SoC</i>	State of charge [%]

Symbolliste

A	Overflateareal [m^2]
C_p	Spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk [kJ/kgK]
C_v	Spesifikk varmekapasitet ved konstant volum [kJ/kgK]
E	Energikapasitet [Wh]
e	Energitetthet [Wh/kg]
h	Spesifikk entalpi [kJ/kg]
h_{ford}	Fordampningsentalpi til mettet vann [kJ/kg]
I	Strømstyrke [A]
k	Konstant brukt i beregning av fordampningsmassestrøm [–]
M	Molar masse [$kg/kmol$]
m	Masse [kg]
\dot{m}	Massestrøm [kg/s]
P	Effekt [W]
p	Totalt lufttrykk [Pa]
Q	Varmeenergi [W], Batterikapasitet [Ah]
\dot{Q}	Energioverføring [kJ/s]
\dot{q}	Volumstrøm [m^3/s]
\bar{R}	Universell gasskonstant 8.314 [$J/Kmol$]
R_w	Gasskonstant for vanndamp [J/kgK]
T	Temperatur [K]
t	Tid [h]
U	Spenning [V]
u	Hastighet [m/s]
V	Volum [m^3]
v	Spesifikt volum [m^3/kg]

Greske symboler

ε	Fordampningskoeffisient [kg/m^2Pas]
ρ	Tetthet [kg/m^3]
ϕ	Relativ fuktighet [%]
ω	Spesifikk fuktighet [kg_{vann}/kg_{luft}]

Indekser

a	Tørr luft
atm	Tilstand ved atmosfærisk trykk, 1 atm
b	Tilstand ved bassengtemperatur
cv	Definert kontrollvolum
g	Mettet tilstand
l	Tilstand ved romluftstemperatur
r	Kjølemedie
v	Vanndamp
w	Kondens

Innhold

Forord	ii
Sammendrag	iii
Summary	iv
Begrepsliste	v
Forkortelser	vii
Symbolliste	viii
Figurliste	xiii
Tabelliste	xv
1 Innledning	1
1.1 TrønderEnergi og +CityxChange	1
1.2 Pirbadet	2
1.3 Tidligere arbeid	3
1.4 Pirbadets laster	4
1.5 Problemstilling og avgrensninger	6
1.6 Rapportens struktur og oppbygging	7
1.7 Programvare	8
2 Kraftmarked og fleksibilitet	9
2.1 Dagens kraftmarked	9
2.1.1 Fakturering av strøm	10
2.2 Fremtidens kraftmarked	11
2.3 Fleksibilitet i bygninger	12
2.4 Kategorisering av laster	13
3 Effektforkbruk og lastprofiler	14
3.1 Pirbadets effektforkbruk	14
3.1.1 Effektforkbruk av bølge-genererende maskin	16
3.2 Effektforkbruk og lastprofil for Brattøra	17
4 Energilagring	18
4.1 Galvaniske celler	18
4.2 Batteriterminologi	20
4.3 Batteriteknologier	20
4.4 Litium-ion batteri	21

4.4.1	Aldring av batteri	24
5	Energiflyt i storhallen	25
5.1	Fuktig luft og fordampning	25
5.1.1	Fuktig luft	26
5.1.2	Kjøling av fuktig luft	27
5.1.3	Fordampning	28
5.1.4	Reduksjon av fordampningstap	32
5.2	Trykkforskjeller i storhallen	33
5.3	Ventilasjonssystem	34
6	Metodikk	37
6.1	Ventilasjonssystem	37
6.2	Kjølebatteri	38
6.2.1	Modellering i Aspen HYSYS	39
6.3	Varmetap fra fordampning	41
6.4	Valg og simulering av batteri	44
6.4.1	Dimensjonering av batteriet	44
6.4.2	Batteriets opp- og utlading	46
6.5	Økonomi	48
7	Resultat	49
7.1	Reduksjon av fjernvarmeforbruk	49
7.1.1	Kjølebatteri	49
7.1.2	Fordampningstap	50
7.1.3	Total reduksjon i fjernvarmeforbuk	51
7.2	Batteri	52
8	Diskusjon	55
8.1	Kjølebatteri	55
8.2	Fordampningstap	57
8.3	Batteri	59
8.4	Helhetlig vurdering	61
9	Konklusjon	62
10	Videre arbeid	63
	Referanser	69
	Tillegg A Pirbadet	A-1
A.1	Pirbadets åpningstider	A-1
A.2	Plantegning	A-2

Tillegg B Kjølebatteri	B-1
B.1 Dataark	B-1
B.2 Rådata fra ventilasjonssystemet	B-2
Tillegg C Tabulerte verdier	C-1
Tillegg D Batteri	D-1
D.1 Økonomisk analyse	D-1
D.2 Flytskjema	D-2
Tillegg E Psykometrisk diagram	E-4

Figurer

1.1	Definert systemgrense. Tilgang på plantegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigernes. Figuren er redigert for bedre kvalitet, originalfiguren er vist i vedlegg A.2.	2
2.1	Illustrasjon av overført strøm fra kraftprodusent til husholdning via strømmnett. [15]	10
2.2	Illustrasjon av overgangen fra det tradisjonelle distribusjonsnettverket til et flytende distribusjons- system. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [24] . . .	11
2.3	Kategorisering av ikke-lagringsdyktige laster. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [30]	13
3.1	Årlig energiforbruk inndelt i kvartiler og uker ved Pirbadet 2019-2020. Figuren er hentet fra Optima Energy.	14
3.2	Pirbadets dagsforbruk av elektrisitet f.o.m mandag 2. mars 2020 t.o.m søndag 8. mars 2020 og Pirbadets dagsforbruk 5. mars.	15
3.3	Viser variasjoner i maksimal, minimal og gjennomsnittlig effektforbruk av den bølge-genererende maskinen med 10 minutters intervall og målinger hvert tredje sekund. [18]	16
3.4	Viser variasjoner i maksimal, minimal og gjennomsnittlig effektforbruk av den bølge-genererende maskinen i løpet av en driftsperiode på 10 minutter. [18] . .	17
3.5	Effekt levert til Brattøra uken 2. - 8. mars 2020 og 24 timer for 5. mars 2020. .	17
4.1	En galvanisk celle med kobber Elektrode som katode og sinkelektrode som anode. Elektronføringen går fra anoden til katoden via den ytre kretsen. Bildet er redigert for bedre kvalitet. [38]	19
4.2	Ragone-plot for ulike batteriteknologier. Bildet er redigert for bedre kvalitet. [51]	21
4.3	Grafisk fremstilling av ione- og elektrontransport for opplading og utlading av LIB. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [53]	22
4.4	Radar-plot for ulike LIB-teknologier. [55]	23
5.1	Viser en forenklet skjematisk illustrasjon av et kjølebatteri, hvor varm og fuktig luft avgir varme til et sirkulerende kjølemedie [62, s. 668]. Stiplet linje angir kontrollvolumet.	27
5.2	Illustrasjon av varmetap fra basseng. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [66]	30
5.3	Viser plassering av luftbehandlingsenhetene (LBE) innenfor systemgrensen. Tilgang til plantegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigernes.	34
5.4	Viser oppbygningen av LBE 36.01A. Tilgang til systemtegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigernes.	35
5.5	Illustrasjon av luftstrømmene under normal friskluftsdrift. I denne driftsmodusen stenges omluftspjeldene, mens avkast- og friskluftspjeldene varieres etter behov.	36

5.6	Illustrasjon av luftstrømmene under redusert friskluftdrift. I denne driftsmodusen åpnes omluftspjeldet OL_o ved behov.	36
5.7	Illustrasjon av luftstrømmene under omluftdrift. I denne driftsmodusen åpnes omluftspjeldene OL_o og $OL_{a,v}$ normalt 100%. Friskluftspjeldet stenges, mens avkastspjeldet holder en spjeldåpning på omtrent 20%.	36
6.1	Kjølebatteri av type CW. [72]	38
6.2	Flytskjema for det modellerte kjølebatteriet.	39
6.3	Den modellerte varmeveksleren.	40
6.4	Illustrasjon av separatoren som inngår i modellering av kjølebatteriet.	41
6.5	Utvalgte basseng for analyse av fordampningstap. Boblebadene er merket med X. Originalfiguren er vist i vedlegg A.2.	42
6.6	Varmetap fra fordampning fra idrettsbassenget ved ulike metoder.	43
6.7	Varmetap fra fordampning som funksjon av bassengtemperatur ved ulik relativ luftfuktighet.	43
6.8	SoC-kurver for torsdag. Batteriet opplades kontinuerlig på 35 minutter ved 1C, og kontinuerlig på 138 minutter ved 0,25C.	47
6.9	SoC-kurver for fredag. Batteriet opplades kontinuerlig på 42 minutter ved 1C, og kontinuerlig på 168 minutter ved 0,25C.	47
6.10	SoC-kurver for lørdag. Batteriet opplades kontinuerlig på 31 minutter ved 1C, og over tre ladeperioder på totalt 123 minutter for 0,25C.	47
6.11	SoC-kurve for normal utlading og opplading i form av nødlading.	48
7.1	Overført varmemengde fra luft til isvann ved varierende lufttemperatur.	49
7.2	Endring i belastningen på det lokale nettet for batteri av ulik C-rate for opplading.	52
7.3	Endring i det elektriske forbruksmønsteret for Pirbadet med batteri av ulik C-rate for opplading.	53
7.4	Endring i kostnad tilknyttet effektleddet for ulike driftstilfeller med og uten batteri.	53
A.1	Plantegning av storhallen og omliggende rom.	A-2
B.1	Dataark fra kjølebatteri.	B-1
D.1	Flytskjema for utlading av batteriet.	D-2
D.2	Flytskjema for opplading av batteriet.	D-3
E.1	Psykometrisk diagram for fuktig luft. [62, s.856]	E-4

Tabeller

1.1	Oversikt over Pirbadets laster og tilhørende mulighet for laststyring- og reduksjon, basert på tidligere arbeid.	4
2.1	Effekttariff for lavspent næringskunder fra Tensio. [22]	10
3.1	Gjennomsnittlig fjernvarmeforbruk per kvartil, basert på verdiene fra figur 3.1.	15
4.1	Oversikt over ulike katodematerialer. [48, 49, 54, 55]	22
5.1	Oversikt over ulike bassengkategorier og tilhørende temperaturintervaller [10, s.183].	28
5.2	Metoder for beregning av fordampningsmassestrøm. [63, 67]	32
6.1	Beregnete gjennomsnittlige verdier basert på parameterenes minuttmålinger i friskluftsdrift.	37
6.2	Temperatur og areal for utvalgte basseng.	42
6.3	Driftsverdier for induksjonsmotoren i den bølge-genererende maskinen.	44
7.1	Energibesparelse for 12 °C og ulik relativ fuktighet.	50
7.2	Fordampningsvarmetap fra idrettsbasseng, bølgebasseng og boblebad.	50
7.3	Energitap, besparelse og nåverdi ved investering i overtrekk.	50
7.4	Besparelse ved bruk av overtrekk på boblebad	51
7.5	Prosentvis reduksjon i fjernvarmeforbruk.	51
7.6	Nåverdi for NMC batteri med C-rate lik 1C og 0,25C	54
A.1	Pirbadets åpningstider.	A-1
B.1	Oversikt over ventilasjonssystemets driftstid i friskluftsmodus for 28. og 29 februar.	B-2
C.1	Tabulerte verdier for vann.	C-1
C.2	Tabulerte verdier for luft.	C-2
D.1	Reduksjon i strømutfgifter ved bruk av batteri.	D-1

1 Innledning

Verdens energibruk er i stor vekst og med dette har fokuset på elektrifisering av kraftproduksjonen økt kraftig. Med elektrifisering kommer utfordringer som perioder med økt effektforbruk, uregulert kraftproduksjon fra fornybare energikilder og desentralisert kraftproduksjon. For å kunne møte de nevnte utfordringene og samtidig unngå store investeringer i sentralnettet, er det avgjørende at forbedringer og lokale utbygginger blir gjort i det tradisjonelle distribusjonsnettverket. [1, 2]

Det er derfor kritisk å utvikle det tradisjonelle distribusjonsnettet til et aktivt system mellom prosumenter og forbrukere, der fleksibilitet, lagring og smartmålere skal kontrollere tilbud og etterspørsel. Prosumenter er husholdninger som både produserer og forbruker elektrisitet, og vil være essensielle ved etablering av fleksibilitetsmarkeder. I dag er det en rekke prosjekt og energiselskap som jobber med planlegging og utbygging av aktive kontrollsystem for kraftnettet, deriblant TrønderEnergi med sin aktive rolle i prosjektet +CityxChange. [3]

1.1 TrønderEnergi og +CityxChange

TrønderEnergi er et energikonsern med base i Midt-Norge og med kjernevirksomhet innen energiproduksjon fra vann- og vindkraft. Selskapet har også bidratt til å etablere Norges nest største nettselskap gjennom fusjoneringen av TrønderEnergi Nett AS og Tensio Trøndelag Nord AS [4]. Med dette som bakgrunn utgjør TrønderEnergi én av totalt 32 partnere i +CityxChange-prosjektet. [5]

+CityxChange er et smartby-prosjekt som har fått støtte fra EUs Horizon 2020 forsknings- og innovasjonsprogram, og ledes av Norges teknisk-vitenskapelige universitet (NTNU). Formålet med prosjektet er å etablere smarte og positive energiløsninger i urbane miljøer i Europa for å møte utfordringene som medføres av økt uregulerbar kraftproduksjon og økt energibehov. Av landene som inngår i prosjektet er Irland og Norge ledende med henholdsvis Limerick og Trondheim som fyrtårnsbyer. Suksessfulle prosjekter gjennomført i fyrtårnsbyene vil bli replikert i følgerlandene. I Trondheim er prosjektet geografisk inndelt i tre områder, herunder Sluppen, Campus Gløshaugen og Brattøra. Denne rapporten vil fokusere på svømmeanlegget Pirbadet som ligger på Brattøra, lokalisert ved Trondheims havn.

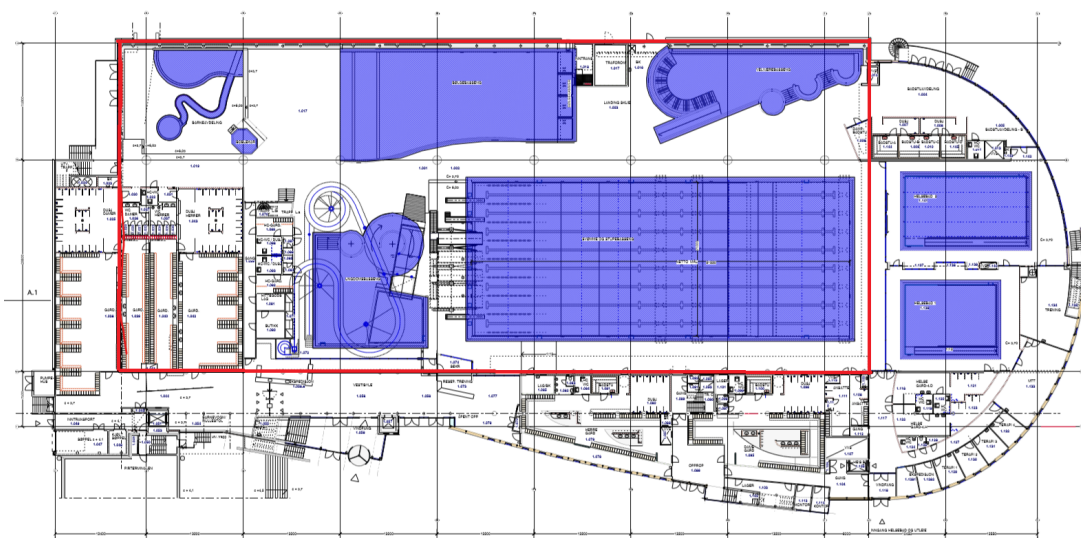
Resterende bygg som inngår fra Brattøra er hovedsakelig hotell og kontorbygg, deriblant Powerhouse. Dette er Norges største og verdens nordligste plusshus. +CityxChange sitt mål for Brattøra er å redusere belastningen på distribusjonsnettet gjennom etablering av et fleksibilitetsmarked. Fleksibilitetsmarkedet vil fungere slik at prosumenter og forbrukere utveksler overskudd av elektrisk energi (f.eks. overskuddsenergi fra sol- og vindkraft) og elektrisk energi som frigjøres på distribusjonsnettet. Dette gjør Powerhouse til en svært viktig deltaker i fleksibilitetsmarkedet da bygget består av 2867 m² med solceller, som i gjennomsnitt produserer 458 457 kWh/år. Dette er mer enn dobbelt så mye som byggets totale energibehov. [6–8]

Overskuddsenergi fra Powerhouse benyttes blant annet i nærliggende bygg, i tillegg til opplading av elektriske busser, biler og båter i Brattøra-området. Resterende overskuddsenergi lagres i byggets lokale energilagringssystemer, og kan frigjøres ved behov. Den frigjorte elektriske energien vil følgelig være et resultat av laststyring, optimalisert bruk av fornybare energikilder og innovative energiløsninger som skaper grunnlag for fleksibilitet. [7–9]

1.2 Pirbadet

Svømmeanlegg er designet for deres spesielle inneklime med høy temperatur og luftfuktighet. Dette krever avanserte og energikrevende systemer, som gjør anleggene til svært energikrevende bygg. Energibruken avhenger av flere faktorer, blant annet brukernes komfort, utetemperatur og anleggets besøkstall.

Sammenlignet med flertallet av norske svømmeanlegg er Pirbadet, som åpnet i 2001, et relativt nytt anlegg. Pirbadet er Norges største innendørs badeanlegg med rundt 400 000 årlige besøkende. Bygget kjennetegnes blant annet av sitt store vindusareal på 5000 m². Svømmeanlegg inndeles generelt i tørr og våt sone med et klimaskille mellom ute- og inneklime [10, s.69]. På Pirbadet inkluderer tørr sone resepsjon, treningssenter, kjøkken, kontor og garderobe. Anleggets våtareal tilsvarer 10 000 m², som inkluderer garderobe, bølge-, terapi- og idrettsbasseng, i tillegg til tre vannsklier og en strømkanal. Sirkulerende vannmengde tilsvarer omtrent 3,5 millioner liter og ventilasjonssystemet behandler 370 000 kg luft per time. I denne rapporten er det valgt å fokusere på energibruken i våt sone, ekskludert påbygg av opplæringsbasseng, vist i figur 1.1. [11]



Figur 1.1: Definert systemgrense. Tilgang på plantegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigeres. Figuren er redigert for bedre kvalitet, originalfiguren er vist i vedlegg A.2.

1.3 Tidligere arbeid

Det er tidligere skrevet litteratur om energibruk i svømmeanlegg, hvor flere av rapportene omhandler Pirbadet spesifikt. Disse oppgavene er skrevet i samarbeid med Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) ved NTNU. Oppgavene som presenteres i dette kapitlet har vært essensielle for forståelsen av energibruk i svømmeanlegg, og danner grunnlag for valg av fokusområder. Disse er nærmere beskrevet i kapittel 1.6.

I Ingvild Skaftuns masteroppgave ”*Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)*”(2019) kartlegges Pirbadets forbruk. Dette benyttes videre i analyser av Pirbadets laster, for å undersøke mulighet for effektreduksjon og laststyring. Det utføres også en undersøkelse av lønnsomheten ved bruk av batteri og installasjon av solceller.

Marianne Ruud har i sin masteroppgave ”*Pressure controlled ventilation of the swimming pool*”(2019) undersøkt muligheten for trykkstyrt ventilasjon. Som grunnlag for masteroppgaven er det foretatt trykkmålinger i storhallen ved ulike avtrekksmengde på ventilasjonsanlegget.

Doktorgradsavhandlingen ”*Energy Efficiency in Swimming Facilities*”(2015) av Wolfgang Kempel gir et overblikk over energibruk i europeiske svømmeanlegg og ulike indikatorer på energieffektivitet. I doktorgradsavhandlingen er det også definert hvilke faktorer og teknologier som kreves for å minimalisere energiforbruket.

Masteroppgaven ”*Betraktninger rundt svømmehallers energieffektivitet*”(2011) av Hilde Drolsum Røkenes og Martin Nerhus Øens masteroppgave ”*Svømmehaller og krav til energieffektivitet*”(2011) har begge kartlagt energibruk i svømmeanlegg ved bruk av simuleringer, og definert energireducerende tiltak.

Felles for alle oppgavene er rammeverket som ligger til grunn for svømmeanlegg gitt i Byggforsks håndbok 52 ”*Bade- og svømmeanlegg*”(2004). Boken tar utgangspunkt i de mest typiske problemområdene for bade- og svømmeanlegg, og er dermed svært sentral for arbeidet i denne rapporten.

1.4 Pirbadets laster

Hensikten med dette kapittelet er å gi en oversikt over Pirbadets effektkrevende laster. Kapittelet danner et grunnlag for valg av laster som skal analyseres, og baseres på foregående kapittel. En oppsummering av lastene er gitt i tabell 1.1.

Tabell 1.1: Oversikt over Pirbadets laster og tilhørende mulighet for laststyring- og reduksjon, basert på tidligere arbeid.

Laster	Tidligere analysert	Mulighet for lastreduksjon	Mulighet for laststyring
Ventilasjonsanlegg	x	x	
Varmepumpe i gråvanns- varmegjenvinner	x		x
Vannpumper	x		
Bølge-genererende maskin	x	x	x
Tørrbadstue	x	x	x
Dampbadstue	x	x	x
Belysning	x	x	
Fjernkjøling			
Fjernvarme			
Kjøkken	x		
Tørr sone			

Ventilasjonsanlegg

Ventilasjonsystemet på Pirbadet består av 16 anlegg, hvor åtte anlegg opererer på hver sone. Ventilering utgjør den største elektriske lasten, både i våt og tørr sone. I tidligere masteroppgaver ved NTNU er det utført målinger på seks av anleggene i våt sone, hvor alle anleggene ble utskiftet i 2016 og 2018. På bakgrunn av utbedringene ble det konkludert med at det ikke vil være hensiktsmessig å oppgradere anleggene, da eventuelle tiltak kun vil medføre minimal effektreduksjon. Det ble derimot foreslått å undersøke muligheter for endring av sett-verdier. Det er uvisst hvor stor påvirkning en slik endring vil ha på luftkvaliteten i storhallen.

Varmepumpe i gråvannsvarmeveksler

Funksjonen til en gråvannsvarmeveksler er å gjenvinne tilgjengelig varmeenergi fra gråvannet. Målet er å redusere bruk av fjernvarme for oppvarming av vann. En gråvannsvarmeveksler med integrert varmpumpe øker vekslerens energieffektivitet. Drift av varmpumpen krever elektrisk energi, og utgjør hovedforbruket av elektrisitet for oppvarming av vann. Dette tiltaket ble innført i 2017. Gråvannsvarmevekslerne med varmpumper har et høyt forbruk, men ikke et tydelig driftsmønster. Dersom laststyring skal benyttes, må driftsmønsteret analyseres og forbruket kartlegges for nøyaktig estimering av effekttopper.

Vannpumper

Vannpumpene på Pirbadet benyttes blant annet i forbindelse med vannsklier, forflytning av vann i rense- og tilførselsystem og strømnings-genererende maskiner. Av vannpumpene benyttes et ukjent antall mindre pumper (under 2,5 kW) og 25 større pumper (opp til 22 kW). Alle pumpene over 2,5 kW styres av frekvensomformere. Totalt forbruk for større pumper er kartlagt. Hver enkelt pumpe har et relativt lavt forbruk, men på grunn av antall pumper antas det at totalt forbruk vil utgjøre en betydelig andel. Hver enkelt pumpe har potensiale for oppgradering, men grunnet relativt lavt forbruk er det usikkerhet tilknyttet lønnsomheten av tiltaket. Oppgradering av alle pumpene vil kreve stor investeringskapital hvor utbyttet er usikkert.

Bølge-genererende maskin

Den bølge-genererende maskinen benyttes for å skape bølger i et av Pirbadets ungdomsbasseng. Den driftes manuelt i omtrent 10 minutter hver hele time i et gitt tidsintervall. Maskinen er en last med innvirkning på Pirbadets effektprofil, da hver drift skaper effekttopper. Fra tidligere undersøkelser uttrykkes det at maskinen er en last som egner seg for laststyring, basert på det karakteristiske driftsmønsteret. En løsning er å benytte batteri for energilagring.

Badstuer

Pirbadet har to tørrbadstuer og en dampbadstue. Badstuene styres av termostater, og er elektriske laster med kartlagt effektforbruk. Badstuenes forbruksmønster avhenger av antall besøkende og varierer i henhold til Pirbadets forbruksmønster. Som tiltak for effekttoppreduksjon anbefales det at badstuene ikke oppvarmes i samme intervall som den bølge-genererende maskinen. Det er også foreslått å redusere maksimal temperatur permanent med 5 °C, og legge om oppvarmingen fra elektrisk til fjernvarme.

Belysning

Belysning deles inn i tørr og våt sone, hvor effektforbruket er delvis kartlagt for begge sonene. Belysning utgjør den kategorien som enklest kan effektiviseres. Det er tidligere uttrykt anbefalinger med både energi- og lønnsomhetsberegninger for oppgradering av belysning til LED-lys.

Fjernkjøling og fjernvarme

Fjernkjøling benyttes i datarom og andre rom med behov for nedkjøling. Fjernvarme benyttes til oppvarming av rom og basseng- og tappevann. Fjernvarme- og kjøling distribueres ved hjelp av elektrisk drevne pumper, og har ikke direkte innvirkning på Pirbadets elektriske forbruk.

Restaurant

Effektforbruket på kjøkkenet er begrenset av restaurantens åpningstid. De elektriske lastene på kjøkkenet er dårlig merket, slik at effektforbruket blir vanskelig å kartlegge. Lastene på kjøkkenet egner seg ikke for laststyring. På grunn av vanskeligheter for å kartlegge forbruk vil også potensiell reduksjon i elektrisk effektforbruk være krevende å estimere.

Tørr sone ekskludert restaurant

I tørr sone er effektforbruket svært vanskelig å kartlegge, da store deler av forbruket ikke loggføres for hver enkel last. Det er tidligere ikke utført fullstendig lastanalyse på tørr sone. For samtlige laster vil direkte flytting i tid være problematisk på grunn av kundehensyn. Det er derfor mulig å benytte batteri for innføring av laststyring.

1.5 Problemstilling og avgrensninger

Basert på litteratur og funn fra tidligere arbeid, beskrevet i foregående kapittel 1.3 og 1.4, vil denne rapporten fokusere på energikrevende områder som ikke har blitt analysert eller områder som har blitt anbefalt som videre arbeid. Herunder gjenstår blant annet analyse av fjernkjøling- og fjernvarmeforbruk, som vist i tabell 1.1, og videre analyse av muligheten for laststyring av den bølge-genererende maskinen. Disse områdene vil utgjøre hovedområdene i dette prosjektet, og vil dermed bidra til en helhetlig forståelse av Pirbadets forbruksmønster og lastprofil. De valgte hovedområdene legger grunnlaget for følgende problemstilling:

Hvordan kan Pirbadet tilrettelegge for fleksibilitet, og hvilken rolle vil Pirbadet ha i et fleksibilitetsmarked?

For å svare på problemstillingen i henhold til de valgte hovedområdene, har tre spesifikke fokusområder blitt definert som følger:

1. Bruk av batteri til drift av bølge-genererende maskin
2. Bruk av kjølebatteri i ventilasjonssystemets avkastkanal
3. Reduksjon av fordampningstap fra basseng

Av laster som egnes for laststyring ble det valgt å fokusere på den bølge-genererende maskinen, da dette ble anbefalt som videre arbeid fra Ingvild Skaftuns masteroppgave ”*Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)*”(2019). I masteroppgaven ble maskinens forbruksmønster avdekket og videre benyttet som grunnlag i dette prosjektets analyse. Formålet er å undersøke om fleksibilitet kan stilles tilgjengelig dersom maskinen driftes fra et batteri.

Videre ble det valgt å analysere overført varmemengde i kjølebatteriet som skal installeres i ventilasjonsanleggets avkastkanal. Det aktuelle kjølebatteriet er dimensjonert av forhandler for en luft-temperatur lik 12°C. Ettersom det ikke eksisterer temperaturmåling på avkastluften i ventilasjonsanlegget, var det interessant å analysere overført varmemengde for et gitt temperaturintervall. Bakgrunnen for dette er at temperaturen vil variere avhengig av sesong, slik at overført varmemengde også varierer. Implementering av kjølebatteriet er et energieffektiviserende tiltak for å redusere Pirbadets forbruk av fjernvarme og fjernkjøling. For å utnytte overført varmemengde fra avkastluften i Pirbadets varme- og kjøleanlegg, kreves bruk av varmepumper som videre krever elektrisk energi. Dette utgjør også en bakgrunn for lastvalget, da kjølebatteriets funksjon er indirekte avhengig av elektrisk forbruk.

Siste analyse undersøker muligheten for reduksjon av fordampningstap fra bassenger med ulike temperaturer i storhallen. Redusert forbruk av fjernvarme og lavere fuktighet i storhallen utgjør motivasjonen bak valget, da disse faktorene har direkte sammenheng med ventilasjonsanlegget og kjølebatteriet.

Covid-19-pandemien førte til midlertidig nedstenging av Pirbadet og følgelig endring i byggets drifts- og forbruksmønster. Det var derfor ikke mulig å foreta ønskede tester og målinger. For enkelte aspekter innen fokusområdene ble det derfor nødvendig å ta grunnlag i tidligere analyser og resultater.

1.6 Rapportens struktur og oppbygging

Hensikten med rapportens struktur er å være lettlest og forståelig for lesere med interesse for, og noe kunnskap innen, termodynamikk og energilagring. Innledningsvis beskrives TrønderEnergi og Pirbadet, i tillegg til deres rolle i +CityxChange. Videre presenteres tidligere arbeid som omhandler last- og energianalyser på Pirbadet, og danner grunnlaget for valgte laster.

Kapittel 2 ”Kraftmarked og fleksibilitet”, kapittel 4 ”Energilagring” og kapittel 5 ”Energiflyt i storhallen” legger det teoretiske grunnlaget som er nødvendig for å forstå gjennomførte analyser og tilhørende resultat. Kapittel 2 beskriver oppbyggingen av dagens kraftmarked, samtidig som begrepet fleksibilitet introduseres. I påfølgende kapittel 4, presenteres aktuelle batteriteknologier for laststyring. I kapittel 5 fremlegges prinsipp for fordampning og fuktig luft som introduksjon til ventilasjonssystemets virkemåte.

Kapittel 6 er inndelt i henhold til valg av laster, og beskriver fremgangsmåten for hver lastanalyse. I kapittel 7 presenteres resultatene av de utførte analysene. Aspekter rundt resultatene blir drøftet i kapittel 8, før en konklusjon presenteres i kapittel 9. Konklusjonen vil knytte resultatene fra denne rapporten sammen med resultatene fra tidligere arbeid, for å gi en helhetlig vurdering av Pirbadets evne og mulighet for deltakelse i et fleksibilitetsmarked.

1.7 Programvare

Gjennom prosjektet har flere dataprogram blitt benyttet til analyse, beregning og simulering. Videre følger en kort beskrivelse av de mest brukte programmene.

Aspen HYSYS er et simuleringsprogram for kjemiske og termodynamiske system. Programmet har vært essensielt for å simulere løsninger for besparelse av termisk energi.

Microsoft Office Excel er et databehandlingsverktøy brukt til organisering, analyse, formatering og kalkulasjoner av data ved bruk av regneark.

MATLAB er et numerisk databehandlingsverktøy og programmeringsspråk som benyttes til matrisemanipulasjon, visuell fremstilling av data m.m. Under prosjektet har MATLAB blitt benyttet til en rekke beregninger og behandling av data.

Optima Energy er et analyseprogram for energiforbruk og benyttes av Pirbadet. Energiforbruket vises fordelt på daglig, ukentlig og årlig basis inndelt i de ulike energikrevende komponentene til bygget. For å vurdere om Pirbadet kan tilby fleksibilitet i energiforbruk har det vært essensielt å analysere tidspunkt og mengde av energiforbruket. Programmet har begrenset tilgang og derfor refereres oppgitt data med ”hentet fra Optima Energy”.

2 Kraftmarked og fleksibilitet

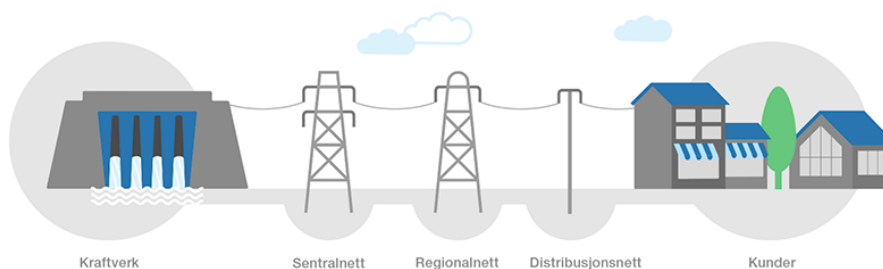
For å oppnå det mest lønnsomme effektforbruket er det sentralt å forstå strømmarkedet og muligheten Pirbadet har til å bli styrt etter dette. Prinsippet kalles fleksibilitet. Fleksibilitet i lastene ved Pirbadet er derfor grunnleggende å undersøke for både energi- og kostnadsbesparelse. Dette kapitlet gir en introduksjon til kraftmarkedets oppbygging og hvordan fleksibilitet kan integreres i dagens strømmarked.

2.1 Dagens kraftmarked

Norge produserer om lag 147 TWh elektrisk energi i et normalår; hvorav 93% utgjør elektrisk produksjon fra vannkraft. I tillegg har en nasjonal satsing på vindkraft økt betraktelig og i dag eksisterer 42 vindkraftverk som tilsammen utgjør omtrent 5% av norsk kraftproduksjon. Termisk kraftproduksjon i form av varmekraft fra forbrenning av avfall, spillvarme og naturgass utgjør en andel på omtrent 2% av total kraftproduksjon. En annen kraftproduksjonsteknologi er solkraft. I Norge utgjør solkraft en marginal prosentandel av den totale kraftproduksjonen, men er likevel en teknologi i stor vekst. [12, 13]

Innen kraftmarkedet skilles det mellom regulerbar og uregulerbar kraftproduksjon. Av fornybar kraftproduksjon er vannkraft regulerbar, og har dermed evnen til å tilpasse produksjonen etter markedets behov. Kraftproduksjon fra vind- og solkraft er uregulerbar, ettersom produksjonen må skje når det er tilgjengelig energi. Dette kan medføre produksjon av overflødig strøm, da det ikke nødvendigvis er balanse mellom behov og etterspørsel. All strøm som produseres betegnes som ferskvare da forbruket må skje momentant etter produksjon. Dermed er energilagring nødvendig, spesielt i forbindelse med uregulerbar kraftproduksjon. [12]

Kraft distribueres fortrinnsvis nasjonalt, og eksporteres deretter til europeiske land etter behov. Handelen av kraft i Europa styres av Nord Pool, en kraftbørs der prisen på kraft bestemmes etter tilførsel og etterspørsel. Alle produsenter og strømleverandører må utføre handelen via Nord Pool. Det nasjonale strømmettet er dermed en del av et internasjonalt kraftmarked og deles inn i sentralnett, regionsnett og distribusjonsnett. Sentralnettet utgjør både de overordnede landsdekkende og utenlandske forbindelsene. Fra sentralnettet føres strømmen videre til regionalnettet i et avgrenset geografisk område. Videre føres strømmen til sluttbrukerne gjennom distribusjonsnettet. Sammenhengen mellom nettene er illustrert i figur 2.1. [14–17]



Figur 2.1: Illustrasjon av overført strøm fra kraftprodusent til husholdning via strømnett. [15]

2.1.1 Fakturering av strøm

Fakturering av strøm for næringskunder deles inn i fastledd, energiledd og effektledd. Fastleddet oppgir en årlig pris, hvis hensikt er å dekke faste kostnader og offentlige avgifter. Ettersom nettselskapene driver monopolvirksomhet i sine respektive områder, stilles det strenge krav fra myndighetene til nettleien som inngår i fastleddet. Energileddet står for energiforbruket i øre/kWh, og skal minimum dekke marginaltap i nettet. Ofte knyttes effektleddet opp mot maksimalforbruket eller høyeste gjennomsnittsforbruk i et definert tidsintervall. I Pirbadet sitt tilfelle prises effektleddet etter den klokketimen med høyest gjennomsnittsforbruk. Prisen på effektleddet varierer også sterkt med sesongene, da sommeren er preget av et lavt belastet nett og god kapasitet. Dette tilsvarer et lavere effektledd enn resten av året. [18, s.33][19]

Det er ingen fast utforming for prisingen, så lenge visse krav tilfredsstilles. Nettselskapene har dermed mulighet til å utforme egen tariffstruktur. Konsekvensen av dette er variasjon i pris mellom ulike leverandører. Pirbadets strømleverandør er Tensio, tidligere TrønderEnergi Nett og NTE Nett, som utformer sin tariff for lavspent næringskunder i henhold til tabell 2.1. [20, 21]

Tabell 2.1: Effekttariff for lavspent næringskunder fra Tensio. [22]

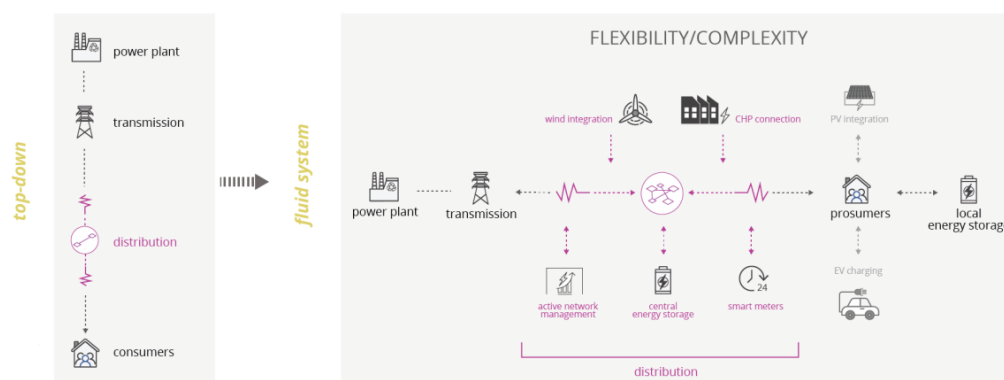
Fastbeløp	8800 [kr/år]			
Energipris	5.0 [øre/kWh]			
Forbruksavgift	16.13 [øre/kwh]			
Effektpris [kr/kWh per mnd]				
	0 - 200 [kW]	200 - 500 [kW]	500 - 800 [kW]	> 800 [kW]
Vinter (nov.-feb.)	60	53	47	40
Sommer (mar.-okt.)	45	40	35	30

2.2 Fremtidens kraftmarked

Nye teknologiske løsninger for energibruk i bygg har gjennom tidene hatt et fokus på reduksjon av forbruk, økt egenproduksjon og etablering av plusshus. Dette er likevel ikke mulig å gjennomføre i alle boliger og næringsbygg. Dersom fremtidige energikrav skal oppfylles uten å øke belastningen på strømmettet, er det sentralt å se på geografiske områder som avgrensede system. Disse systemene må operere med smartgrid hvor målere i boliger og næringsbygg kan kommunisere. Dette tillater utveksling av strøm mellom nærliggende bygg. Slik dannes grunnlaget for etableringen av et fleksibilitetsmarked, som tillater kjøp og salg av kraft mellom produsenter og forbrukere. Prosumenter kan selge effekt opp til 100 kW, men må inngå en tilknytnings- og nettleieavtale med sitt nettselskap under plusskunde-ordningen. Effekt over 100 kW må strupes, dette vil si å kasteffekt. [23]

Realisering av et fleksibilitetsmarked krever at det tradisjonelle distribusjonsnettverket må utvikles fra et enveis-distribusjonsnettverk til et flytende aktivt distribusjonssystem, slik som illustrert i figur 2.2. Det nye distribusjonssystemet mottar i hovedsak kraft fra integrert vindkraft og kraftvarmeverk, samtidig som koblingen til sentralnettverket og tradisjonelle kraftverk opprettholdes og benyttes ved behov. Etersom uregulert kraftproduksjon skal integreres i systemet, vil det også være sentralt med energilagringssystemer. [24]

Videre vil prosumenter, med integrert solkraft og lokal energilagring, være tilkoblet distribusjonssystemet og motta kraftforsyning ved behov. Dette vil kontrolleres av distribusjonssystemets integrerte smartmålere og nettverksledelse. Prosumenterne vil også kunne selge overskuddskraft til nærliggende forbrukere. Helhetlig vil det totale systemet resultere i et fleksibilitetsmarked. Formålet med etableringen av fleksibilitetsmarkedet er å benytte prosumenter for å opprette pluss-distrikt og -byer. Dette forutsetter at forbrukerbygninger som inngår i markedet er konstruert for å minimalisere energitap og effektivisere energibruk. Dette vil også maksimere bygningenes energifleksibilitet, nærmere beskrevet i kapittel 2.3. Etableringen av markedet krever insentiver til byggherrer og innbyggerne for å konstruere plusshus og oppgradere eksisterende bygg, da dette er svært kostbare investeringer. [24]



Figur 2.2: Illustrasjon av overgangen fra det tradisjonelle distribusjonsnettverket til et flytende distribusjonssystem. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [24]

2.3 Fleksibilitet i bygninger

Energifleksibilitet i bygg defineres som ”Bygningens kapasitet til å styre etterspørsel og produksjon i henhold til lokale klimaforhold, brukerbehov og nettkrav” av International Energy Agency Energy in Buildings and Communities Programme (IEA EBC) [25].

Basert på definisjonen av IEA EBC er ikke Pirbadet et fleksibelt bygg, men kan likevel tilby en viss fleksibilitet til markedet. Ettersom det i masteroppgaven ”Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet) ”[18] ble konkludert med at det er lite aktuelt med energiproduksjon på stedet, vil fleksibiliteten i hovedsak komme fra reduksjon av effektforbruk og flytting av laster i tid. Fleksibiliteten til et bygg avhenger av flere faktorer, her inndelt i følgende kategorier:

- Bygningskropp
- Teknologi
- Kontrollsystem
- Brukerfleksibilitet

Bygningskroppens evne til å holde på varme er direkte knyttet til byggets oppvarmingsbehov. For at et bygg skal kunne tilby fleksibilitet er det derfor viktig at bygget er godt isolert, dette er spesielt viktig ved byggets kuldebroer som ofte fører til varmelekkasje. Bruk av termisk masse kan også føre til store besparelser og redusert oppvarmingsbehov. I tillegg til dette har også byggets utforming stor innvirkning på energibehovet.

Hvor effektivt energien utnyttes er avhengig av de ulike teknologiene bygget benytter. For å kunne tilby fleksibilitet er det viktig med anlegg som utnytter mest mulig av energien. Dette kan eksempelvis være ventilasjonssystem med varmegjenvinner eller varmepumpe, som allerede eksisterer på Pirbadet. For bedre utnyttelse av varmeenergien ble det i 2017 installert gråvannsvarmegjennvinner, i forbindelse med en utbedring av ventilasjonssystemet.

Dersom et bygg skal kunne tilby energi til fleksibilitetsmarkedet etter markedets behov, er det i tillegg nødvendig med energilagringssystemer, nærmere beskrevet i kapittel 4. Byggets kontrollsystem er også svært sentralt for byggets evne til å bidra i fleksibilitetsmarkedet. Kontrollsystemet må ha mulighet til å respondere på eksterne signaler og tillate interaksjon med brukeren.

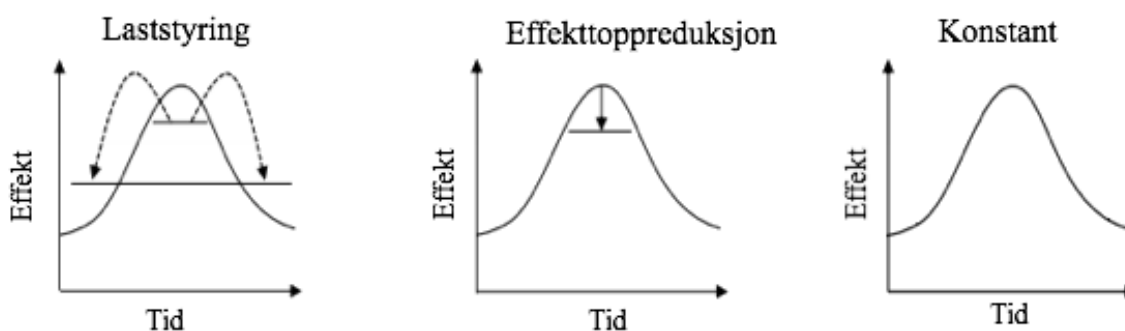
I tillegg til gode tekniske løsninger og en godt isolert bygningskropp, er byggets fleksibilitet sterkt avhengig av forbrukerfleksibiliteten. NVE definerer forbrukerfleksibilitet som ”Forbrukerens evne og vilje til å bytte energibærer eller endre sitt energiforbruk på kort og mellomlang sikt”[26]. Ettersom Pirbadet er et servicebygg må brukernes krav og behov prioriteres, dermed må flere laster holdes konstante gjennom åpningstiden. På bakgrunn av dette har bygget lav forbrukerfleksibilitet. [27]

2.4 Kategorisering av laster

For å vurdere evnen bygget har til å bidra i et fleksibilitetsmarked, er det nødvendig å kategorisere byggets laster. Lastene kan kategoriseres på ulike måter, avhengig av hensikten med kategoriseringen. I dette prosjektet er det valgt å benytte tilsvarende kategorisering som i rapporten *"How to engage consumers in demand response: A contract perspective"* [28]. I rapporten deles lastene inn i tre kategorier: selv-genererende, lagringsdyktige, og ikke-lagringsdyktige.

Selv-genererende laster produserer energi på stedet, for eksempel solceller og vindturbiner. Disse lastene har liten direkte påvirkning på fleksibiliteten, men er viktige for lastbalansering. Lagringsdyktige laster er typisk batteri eller termisk lagring. Ikke-lagringsdyktige laster deles videre inn i tre kategorier; flyttbare, reduserbare og konstante. Dette er illustrert i figur 2.3. Flyttbare laster egnes for laststyring, da de er uavhengige av tid og dermed kan flyttes til tidspunkt på døgnet med lavere belastning på nettet. Laststyring reduserer effekttoppene, men ikke nødvendigvis totalt forbruk. Reduserbare laster er laster som kan effektiviseres eller reduseres ved overforbruk, og vil med dette gi en permanent lavere effekttopp. Effektoppreduksjon fører til lavere belastning på nettet i det aktuelle tidsintervallet, uten å flytte forbruket i tid.

Flyttbare og reduserbare laster er viktige kilder til fleksibilitet, men avhenger sterkt av forbrukerfleksibiliteten. Dette fordi reduksjon eller flytting av laster i tid ikke skal gå på bekostning av komfort. Konstante laster kan verken reduseres eller flyttes i tid, og kan følgelig ikke benyttes som kilde til fleksibilitet. Disse lastene defineres derfor som ikke-fleksible. [29]



Figur 2.3: Kategorisering av ikke-lagringsdyktige laster. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [30]

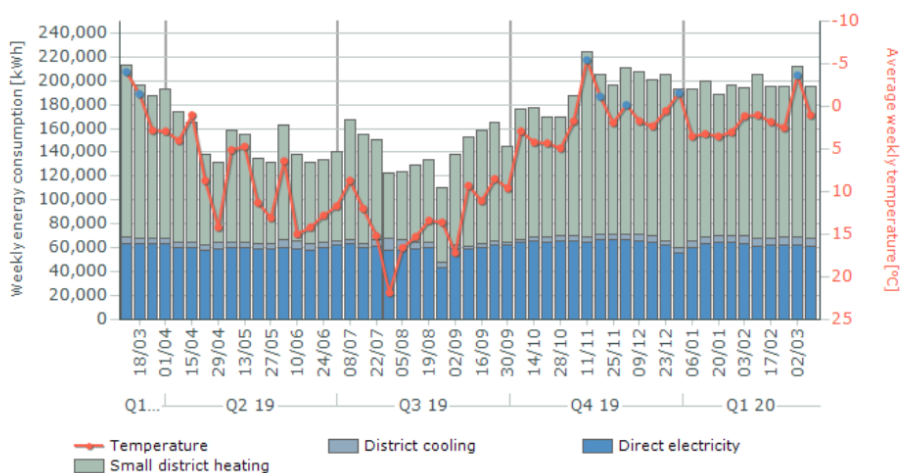
3 Effektforbruk og lastprofiler

Energiforbruket i bygninger varierer med blant annet byggets formål, dets størrelse, geografiske plassering og antall driftstimer. Ved analyse av forbruk benyttes energi per tidsenhet, også kjent som effekt. Det termiske effektforbruket er et resultat av byggets behov for både fjernkjøling og fjernvarme. Det elektriske effektforbruket omtaler forbruk fra laster som krever elektrisk energi. Dette kapittelet tar for seg effektforbruket ved Pirbadet og levert effekt til Brattøra.

3.1 Pirbadets effektforbruk

I følge Enovas Byggstatistikk fra 2015 har svømmeanlegg et energiforbruk som er 2,5 ganger større enn alminnelige idrettsbygg. Det høye energibehovet er grunnet krav for oppvarming av basseng, renseanlegg, ventilasjon, forbruk av tappevann og drift av sklier, samt andre energikrevende attraksjoner. Laststyring og energieffektivisering av systemet har dermed et potensiale til å redusere effektoppene til det lokale nettet tilknyttet Pirbadet. [31]

Pirbadets årlige energiforbruk er vist i figur 3.1 og er fordelt i kategoriene elektrisitet, fjernkjøling og fjernvarme. Ved å sammenligne gjennomsnittlig temperatur med gjennomsnittlig forbruk illustreres lastprofilens sesongavhengighet. Av kategoriene vist i figur 3.1, er fjernvarme den mest temperaturavhengige lasten. Dette fører til et større totalt energiforbruk i vinterhalvåret sammenlignet med sommerhalvåret.



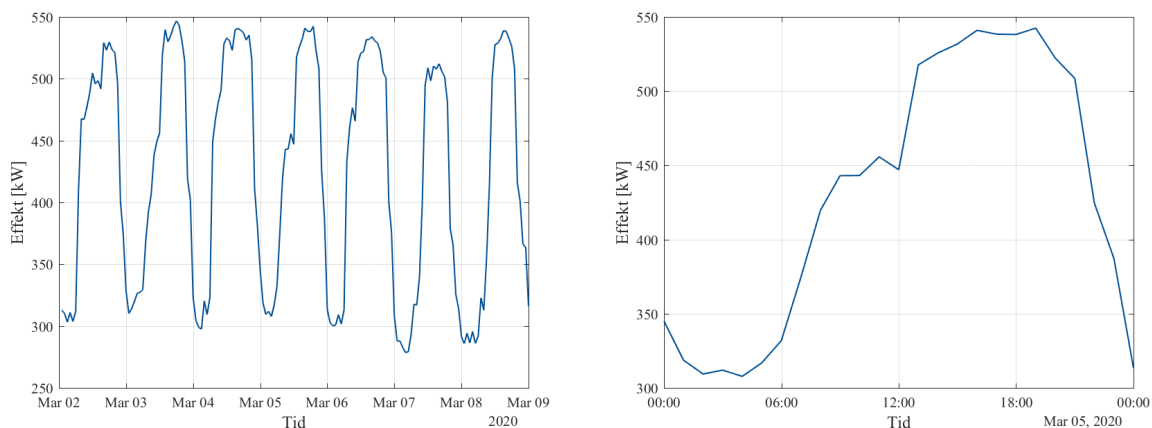
Figur 3.1: Årlig energiforbruk inndelt i kvartiler og uker ved Pirbadet 2019-2020. Figuren er hentet fra Optima Energy.

Basert på data hentet fra Optima Entro hadde Pirbadet i 2019 et fjernvarmeforbruk på 5 439 706 kWh. Pirbadets gjennomsnittlige fjernvarmeforbruk for hver kvartil er vist i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Gjennomsnittlig fjernvarmeforbruk per kvartil, basert på verdiene fra figur 3.1.

Kvartil	Gjennomsnittlig forbruk [kWh/døgn]
Q_1	17 129,6
Q_2	11 639,2
Q_3	11 326,2
Q_4	17 929,8

Figur 3.2 viser til venstre en grafisk fremstilling av Pirbadets elektriske forbruk over en uke fra 2. - 8. mars 2020, hvor data er hentet fra Optima Energy. Uken er tilfeldig valgt, da Pirbadet har en gjentakende forbrukstrend gjennom året. Grafen viser et jevnt forbruk uavhengig av ukedag. Figur 3.2 viser en mer detaljert lastprofil til høyre, med dagsforbruket inndelt i timer. Her er ukedagen torsdag 5. mars tilfeldig valgt som utgangspunkt. Det er tydelig at effektforbruket er størst i intervallet fra kl. 11:00 - 21:00, med en markant topp kl. 13:00. Forbruket er lavest gjennom tidsintervallet fra kl. 22:00 - 08:00.



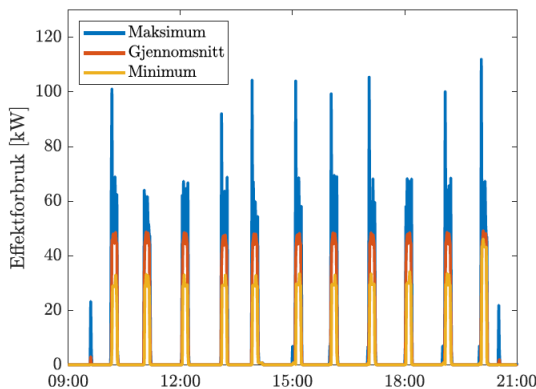
Figur 3.2: Pirbadets dagsforbruk av elektrisitet f.o.m mandag 2. mars 2020 t.o.m søndag 8. mars 2020 og Pirbadets dagsforbruk 5. mars.

3.1.1 Effektforbruk av bølge-genererende maskin

Den bølge-genererende maskinen er en av Pirbadets hovedattraksjoner, og driftes hver hele time mellom kl. 10:00 - 21:00 i ti-minutters intervall. Den bølge-genererende maskinen består av en induksjonsmotor som omdanner elektrisk energi til kinetisk energi, hvis formål er å drifte hydrauliske pumper som skaper bølger i bassenget. Effekten induksjonsmotoren trekker fra nettet beregnes ved likning 3.1. I denne likningen definerer U og I henholdsvis linjespenning og nominell strømstyrke. Videre uttrykker $\cos\phi$ induksjonsmotorens effektfaktor, mens faktoren $\sqrt{3}$ korrigerer for tre-fase.

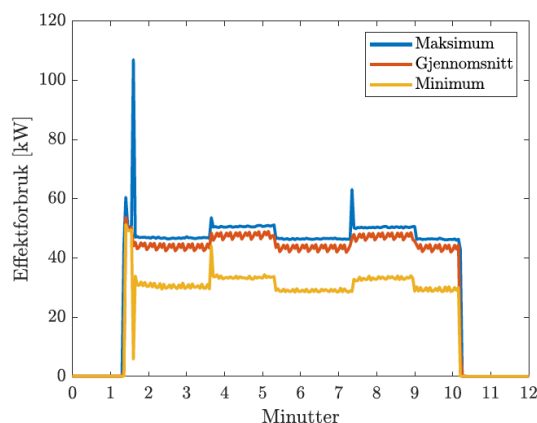
$$P = \sqrt{3}UI\cos\phi \quad (3.1)$$

Induksjonsmotorer har svært høye startstrømmer og trekker derfor merkbart mye effekt i oppstartsfasen. Startstrømmen kan reduseres ved å benytte en mykstarter, som regulerer spenningen slik at startstrømmen reduseres. Dersom mykstarter ikke benyttes, er det essensielt at induksjonsmotoren oppnår nominell drift etter kort tid for å unngå overoppheting [32, s. 639]. Som vist i figur 3.3, er maskinens gjennomsnittlige effektforbruk lik 50 kW/min, med et maksimalt registrert effektforbruk på 111,9 kW/min. Effektforbruket vist i figur 3.3, er basert på Ingvild Skaftuns masteroppgave om effektforbruk ved Pirbadet [18]. Målingene er tatt 22. februar 2019.



Figur 3.3: Viser variasjoner i maksimal, minimal og gjennomsnittlig effektforbruk av den bølge-genererende maskinen med 10 minutters intervall og målinger hvert tredje sekund. [18]

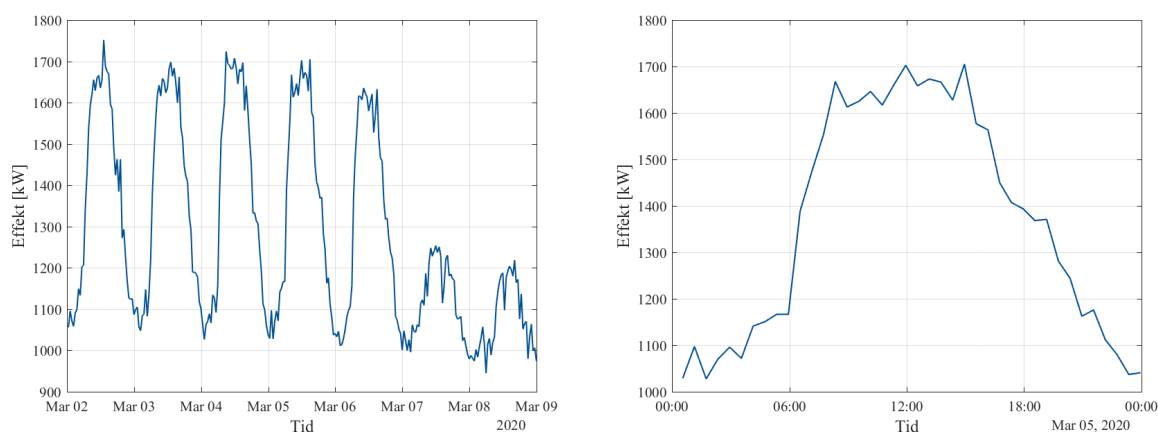
Det er tydelig fra figur 3.3 at effektforbruket er preget av driftsperiodene på bølgemaskinen. Figur 3.4 viser effektforbrukets forløp over en driftsperiode på 10 minutter. Figuren viser at forbruket er størst mellom første og andre minutt, etter den bølge-genererende maskinen er igangsatt. Oppstartsfasen krever mer energi i forhold til resterende driftstid på grunn av induksjonsmotorens høye startstrømmer. Effektforbruket stabiliseres når oppstartsfasen avsluttes og maskinen driftes i henhold til merkeverdiene. Den bølge-genererende maskinen står for om lag 2,1% av Pirbadets totale effektforbruk. [18]



Figur 3.4: Viser variasjoner i maksimal, minimal og gjennomsnittlig effektforbruk av den bølge-genererende maskinen i løpet av en driftsperiode på 10 minutter. [18]

3.2 Effektforbruk og lastprofil for Brattøra

Det lokale nettet Pirbadet er tilknyttet tilhører bydelen Brattøra, som blir forsynt av flere nettstasjoner. Området omfatter blant annet hotell, kontorbygg, konferansesenter, jernbane og havneområde. Ettersom hoveddelen av byggene på Brattøra er kommersielle bygg, er effektbehovet betydelig lavere i helgen sammenlignet med ukedagene. Dette kommer frem til venstre i figur 3.5, som viser levert effekt til Brattøra for uken 2. - 8. mars i 2020. Til høyre i figur 3.5 vises en mer detaljert fremstilling av levert effekt per time for 5. mars 2020. Basert på figur 3.5, er det tydelig at det største effektbehovet inntreffer i tidsintervallet fra kl. 06:00 - 22:00.



Figur 3.5: Effekt levert til Brattøra uken 2. - 8. mars 2020 og 24 timer for 5. mars 2020.

4 Energilagring

Energilagring er avgjørende innen håndtering av energi fra fornybare energikilder, da produksjonen ofte er uregulerbar. Energilagring omfatter mange områder og det er derfor nødvendig med ulike energilagringmetoder definert etter behov. Metoder som benyttes til kommersiell energilagring er inndelt i kjemisk, termisk, mekanisk, elektrisk og elektrokjemisk lagring. [33]

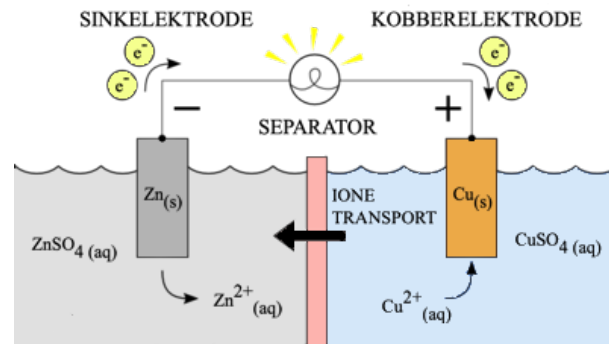
Kjemisk lagring omfatter hovedsaklig lagring av energi i form av hydrogen, en svært energirik kjemisk forbindelse. Termisk lagring omfatter lagring av termisk masse til bruk ved oppvarming eller nedkjøling. Mekanisk lagring består hovedsaklig av pumpekraftverk, svinghjulsteknologi og komprimering av luft. For denne typen energilagring omdannes bevegelsesenergi til potensiell energi. Elektrisk lagring benytter hovedsakelig superledere og superkondensatorer som lagrer energi i et elektrisk eller magnetisk felt. Elektrokjemisk lagring omgjør kjemisk energi til elektrisk energi ved bruk av en eller flere galvaniske celler. [34, 35]

For energilagring til drift av den bølge-genererende maskinen egner mekanisk, elektrisk eller elektrokjemisk energilagring seg best. Valg for videre analyse av energilagringmetode falt fokuserer på batteri, da dette samsvarer best med krav til effekt, energi, effektivitet, kostnad, levetid, utladingshastighet, teknisk modenhet og areal.

4.1 Galvaniske celler

Et batteri består av flere galvaniske celler. Alle galvaniske celler er bygget opp av en anode og en katode, som er separert av en ioneledende membran, også kalt separator. Elektrodene er nedsunket i, eller belagt av, en ioneledende elektrolytt. Det er i tillegg nødvendig med en ytre elektrisk krets som leder elektroner fra anoden til katoden. Elektronene frigjøres av en spontan reaksjon forårsaket av spenningsfallet mellom elektrodene, kalt redoksreaksjon. Ved anoden skjer det en oksidasjon som følge av at katodematerialet har et høyere reduksjonspotensial enn anodematerialet. Standard reduksjonspotensial er et kvantitativt mål for evnen et atom, molekyl eller ion har til å bli redusert. [36, 37]

Figur 4.1 viser en skisse av en galvanisk celle. Kobber har et høyere reduksjonspotensiale enn sink. Dette resulterer i elektronoverføring fra sinkelektroden til kobberelektroden, via den ytre elektriske kretsen. Ved kobberelektroden vil frie kobberioner i kobbersulfatløsningen ta opp elektronene og danne fast kobber på elektrodens overflate.



Figur 4.1: En galvanisk celle med kobberelektrode som katode og sinkelektrode som anode. Elektronføringen går fra anoden til katoden via den ytre krets. Bildet er redigert for bedre kvalitet. [38]

Batterikapasiteten Q er et mål på ladningen som er lagret i et batteri. Likning 4.1 viser formelen for batterikapasiteten, definert som produktet av strømstyrke, og tid, t , målt i timer. [39]

$$Q = I \cdot t \quad (4.1)$$

En batterikapasitet på 10 Ah vil si at batteriet eksempelvis kan levere 1 A i ti timer, 2 A i fem timer eller 10 A i en time. For å finne total mengde energi som lagres i batteriet, multipliseres batterikapasiteten med spenningen på batteriet. Dette uttrykkes i likning 4.2, som definerer energikapasiteten. [39, 40]

$$E = Q \cdot U \quad (4.2)$$

Lagret energimengde fra likning 4.2 legger grunnlaget for definisjonen av spesifikk energi, e . Denne parameteren er nødvendig for korrekt dimensjonering av et batteri, og gir sammenhengen mellom batteriets størrelse og levert energi. Likning 4.3 viser spesifikk energi, uttrykt som en kvotient fra forholdet mellom energikapasitet og batteriets masse. [41]

$$e = \frac{E}{m} \quad (4.3)$$

4.2 Batteriterminologi

Batterier deles inn i primære og sekundære batterier. Sekundære batterier skiller seg fra primære ved at de er oppladbare. Levetiden til sekundære batterier er begrenset, da opplading og utlading fører til redusert kapasitet. Det er derfor viktig å ha kjennskap til ulike begrep innen opp- og utlading for å forstå egenskapene og funksjonaliteten til et sekundært batteri. [37]

“**State of Charge**” (SoC) angir prosentandelen av den gjenværende kapasiteten av maksimal batterikapasitet. Ved slutten av levetiden krever batteriet en SoC lik 70% og et kapasitetsbehov på 80%. Dette medfører at batteriet må dimensjoneres for en kapasitet som er 1,8 ganger større enn opprinnelig behov. [37, 42]

“**Depth of Discharge**” (DoD) er det motsatte av SoC. Herav angir DoD prosentandelen som er utladet fra maksimal batterikapasitet. [37]

“**C-rate**” er et mål på batteriets utladingshastighet relativt til dets kapasitet. Dersom et batteri har en kapasitet på 100 Ah, vil en C-rate på 1C og en strømstyrke på 100 A tilsvare fullstendig utlading av batteriet på 1 time. Dersom kapasiteten er uendret mens C-raten dobles, vil utladingstiden halveres og strømstyrken dobles til 200 A. [37]

“**Solid-electrolyte Interface**” (SEI) betegner dannelsen av et fast lag som hindrer litiumtransport ved grensesjiktet for elektrode-elektrolytt-området. Laget dannes når spenningspotensialet ved elektrodene i batteriet overstiger det elektrokjemiske temperaturintervallet for elektrolytten. [43, 44]

4.3 Batteriteknologier

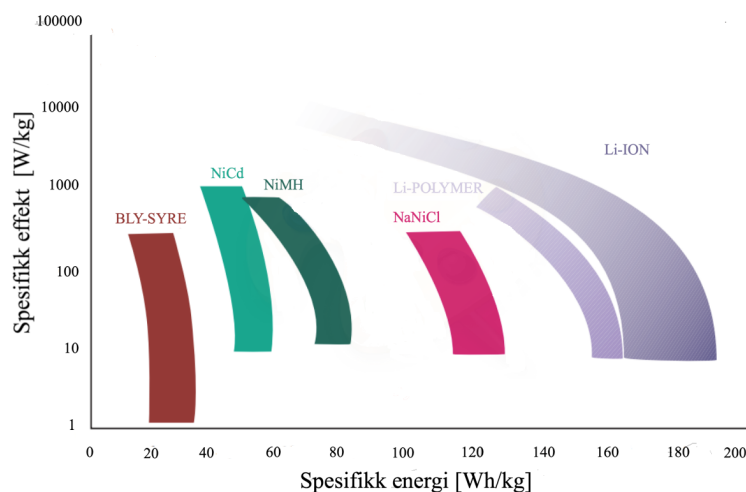
Innen feltet for energilagring anses blybatteri som en av de eldste batteriteknologiene. I tillegg til dette er teknologien preget av lave kostnader sammenlignet med andre batteriteknologier, men har relativt lav spesifikk energi og få antall sykluser. [45]

En annen batteritype er nikkell-kadmium (NiCd), som benyttes i småelektronikk. Fordelene med batteriet er lang levetid og lite krav for vedlikehold. Ulempene med NiCd er lav spesifikk energi og høy kostnad sammenlignet med blybatterier. I tillegg er det viktig at batteriet blir riktig håndtert som avfall, da kadmium er et svært giftig metall. Nikkel benyttes også i nikkell-metallhydrid batterier (NiMH), som anvendes i elektronikk og hybride kjøretøy. NiMH benyttes i kjøretøy på grunn av evnen batteriet har til å håndtere raske endringer i effektbehov. Fordelene med NiMH er batteriets høye spesifikke energi sammenlignet med blybatteri og NiCd, i tillegg til god termisk stabilitet og hurtig opplading. Ulempene med NiMH er redusert ytelse ved lave temperaturer, lav spesifikk effekt og høyere kostnad sammenlignet med blybatterier. [46]

ZEBRA-batteriet (Na-NiCl_2) er et mindre kjent batteri, da det krever høye driftstemperaturer og må varmes opp dersom det ikke holder en tilstrekkelig temperatur. Batteriet anvendes i bilindustriuen, hvor det utkonkurrerer NiCd og NiMH ved å utelate kadmium i batteriteknologien. Dette øker den spesifikke energien betraktelig. [42, 47]

Av alle batteri på markedet bemerker Litium-ion batteri (LIB) seg fra andre batterier, da det har det bredeste spekteret for ulike bruksområder. Batteriet anses i dag som det viktigste batteriet på markedet og er den fremste batteriteknologien i elektriske kjøretøy. Batteritypen har omtrent erstattet nikkell-baserte batterier fullstendig og utkonkurrerer de andre nevnte batteriene på spesifikk energi, spesifikk effekt og høy virkningsgrad. Til tross for dette krever LIB stor initiell kostnad. Likevel forventes prisen å reduseres med 53% fra 2015 til 2025, og med ytterligere 16 prosentpoeng ved 2035 da produksjon og etterspørsel øker. [42, 48–50]

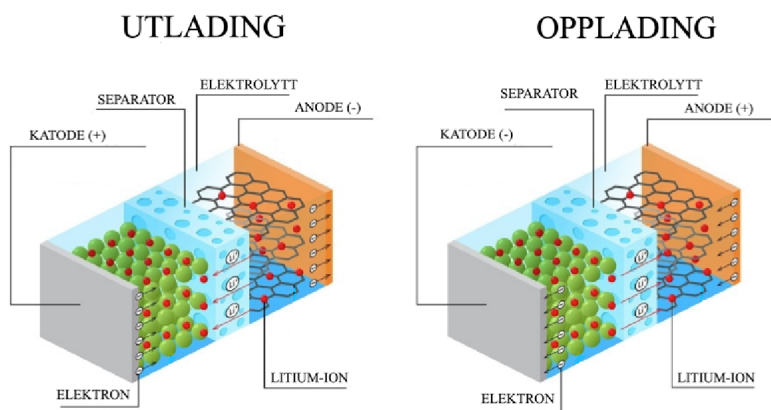
Figur 4.2 viser et ragone-plot for de overnevnte batteriteknologiene med hensyn på spesifikk effekt og spesifikk energi. Felles for alle energilagringssystemene er at den spesifikke effekten reduseres ved økning i spesifikk energi. [51]



Figur 4.2: Ragone-plot for ulike batteriteknologier. Bildet er redigert for bedre kvalitet. [51]

4.4 Litium-ion batteri

Batteriteknologier navngis ut ifra hvilket katodemateriale som benyttes i batteriet. Følgelig består katodematerialet i LIB av Li-ioner. Grunnstoffet litium er et alkalimetall med en sterk evne til å redusere andre kjemiske forbindelser, og egnes derfor til bruk i katodematerialet. Fast litium benyttes ikke direkte i katodematerialet, da rent litium er for reaktivt. Derfor benyttes heller Li-ioner i kombinasjon med metalloksid. Slik figur 4.3 viser, vil Li-ioner transporteres gjennom den ioneledende membranen fra anode til katode ved utlading. Elektroner transporteres samme retning gjennom den ytre elektriske kretsen. Når batteriet lades opp skjer tilsvarende prosess i motsatt retning; fra katode til anode. [42, 52]



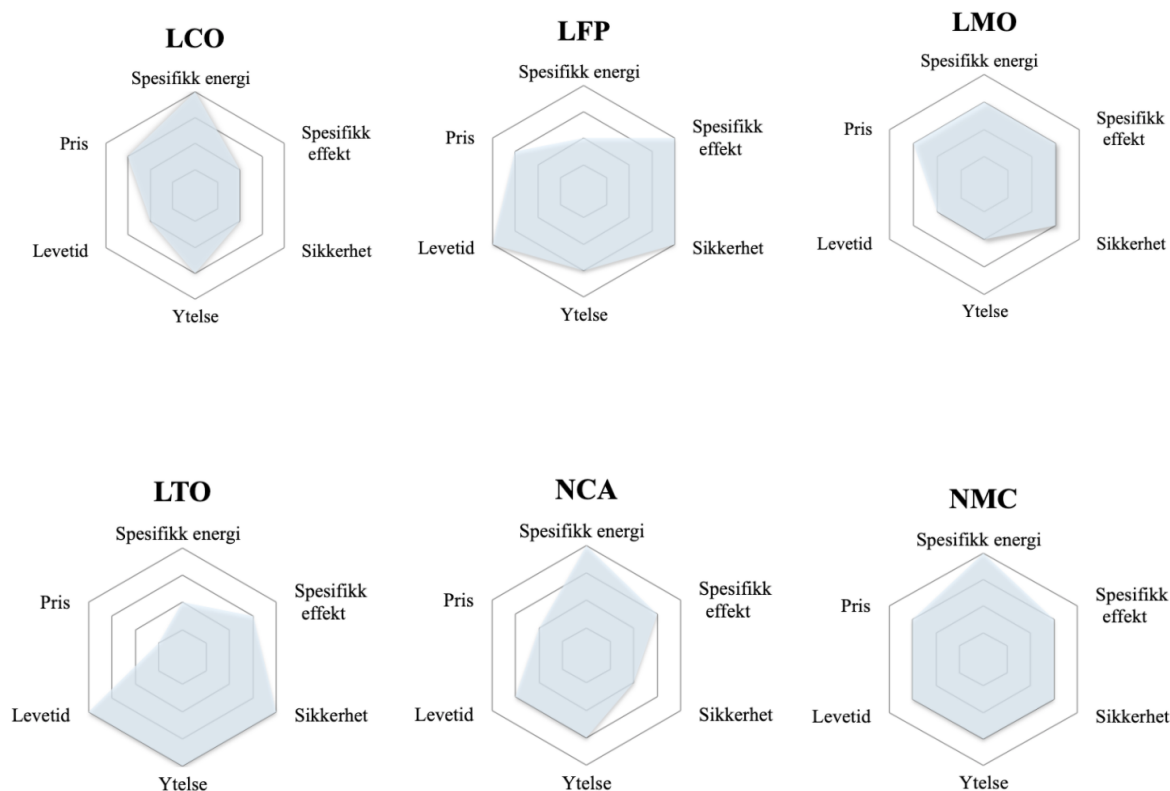
Figur 4.3: Grafisk fremstilling av ione- og elektrontransport for opplading og utlading av LIB. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [53]

Som tidligere beskrevet benyttes Li-ioner i kombinasjon med metalloksid som katodemateriale. Valg av katodemateriale avhenger av batteriets bruksområde og brukerkrav. Felles for LIB er at de anbefales å operere med et SoC intervall mellom 20% - 90%. Dette tilsvarer en oppladingstid på 42 minutter for en C-rate på 1C. I tillegg påvirkes ytelsen av batteriet av temperaturer utenfor det akseptable intervallet på -20°C - 60°C . Figur 4.1 viser en oversikt over de fem mest brukte katodematerialene i LIB.

Tabell 4.1: Oversikt over ulike katodematerialer. [48, 49, 54, 55]

Katode-materiale	Spesifikk energi [Wh/kg]	Antall ladesykluser	Fordeler	Ulemper	Bruksområder
LCO LiCoO ₂	150 - 190	500 - 1000	<ul style="list-style-type: none"> • Høy spesifikk energi 	<ul style="list-style-type: none"> • Lav sikkerhet • Inneholder kobolt 	<ul style="list-style-type: none"> • Bærbar elektronikk
LFP LiFePO ₄	90 - 140	2000	<ul style="list-style-type: none"> • Høy sikkerhet • Miljøvennlige materialer 	<ul style="list-style-type: none"> • Lav spesifikk energi 	<ul style="list-style-type: none"> • El-sykler • Egnert til strømforsyningsystem • El-sykler
LMO LiMn ₂ O ₄	100 - 140	1000 - 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Miljøvennlige materialer • God termisk stabilitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Kort levetid • Lav kapasitet 	<ul style="list-style-type: none"> • El-biler • Småelektronikk • Medisinsk utstyr
NCA LiNiCoAlO ₂	200 - 250	1000 - 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Høy spesifikk energi 	<ul style="list-style-type: none"> • Lav sikkerhet • Inneholder kobolt 	<ul style="list-style-type: none"> • Benyttes i Teslas bilbatteri • Backup og laststyring på nett • Dominerer el- og hybridbilindustri
NMC LiNi _x Mn _y CO _z O ₂	140 - 200	1000 - 2000	<ul style="list-style-type: none"> • God termisk stabilitet • Høy spesifikk energi 	<ul style="list-style-type: none"> • Inneholder kobolt 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektronikk • Medisinsk utstyr • Egnert til strømforsyningsystem

Med egenskapene i tabell 4.1 som utgangspunkt, kan de ulike katodematerialene fremstilles som et radarplot; en grafisk fremstilling for sammenligning basert på en rekke faktorer. Figur 4.4 viser radarplottene for seks LIB-teknologier med hensyn på spesifikk energi, spesifikk effekt, sikkerhet, levetid og pris.



Figur 4.4: Radar-plot for ulike LIB-teknologier. [55]

Valg av katodemateriale avhenger av formål, hvor NMC-batteri dominerer markedet grunnet sin allsidighet. I Norge leverer blant annet en rekke maritime batteriprodusenter NMC-batteri, hvor produsentene har utviklet batteripakker til korrosive og saltvannsholdige miljø. Det valgte katodematerialet kombineres med en elektrolytt og et anodemateriale. Dagens mest dominerende anodemateriale er grafitt, men enkelte batteriprodusenter velger å produsere anoder av andre materialer. Blant disse er anoder som inneholder silisium.

Fordelene med silisium, sammenlignet med andre anodematerialer, er lavere gjennomsnittlig tap av litium, gravimetrisk og volumetrisk kapasitet, tilgjengelighet på materialet, lav kostnad, ikke giftig materiale og kjemisk stabilitet. I tillegg øker antall ladesykler til batteriet betraktelig og lagringskapasiteten øker med omlag 40%. Ulempen ved å implementere silisium i anodestrukturen er utvidelsen i volum av anoden under opp- og utladingssykler. Volumet utvides med omlag 300% fra original størrelse. Produksjon av silisium i nanostrukturer er dermed avgjørende for å øke ytelsen til silisium-holdige anoder. [49, 56–58]

4.4.1 Aldring av batteri

Aldring av batteri kan kategoriseres i effekttap og kapasitetstap. Årsakene bak tap i total batterikapasitet skyldes oppløsning av elektrode-materiale og tap av frie Li-ioner. Tap av effekt skyldes SEI og forringelse av kontaktområde mellom elektrode og elektrolytt. Hastigheten for aldring av batteri avhenger av kjemien og strukturen til batteriet. Ulike materialkombinasjoner har ulik sensitivitet til lagring.

Alle batterier som benyttes i store batterisystem må ha et integrert styringssystem, kalt BMS fra engelsk “Battery Management System”. Systemet sørger for at opp- og utlading skjer kontrollert ved å hindre systemet fra å lade utenfor det bestemte ladeintervallet. Herav skyldes ikke aldring av slike batterier opp- og utlading utenfor ladeintervallet, men heller faktorer som temperatur, SoC, DoD og C-rate. Faktorene fører til endringer i batteriets indre resistans, reduksjon i kontaktområde for elektrodene, mekanisk stress på elektrodene og endring i reaksjonshastigheter. [57–59]

5 Energiflyt i storhallen

Av hensyn til trivsel og helse må besøkende oppleve termisk komfort. Termisk komfort defineres som ”en sinnstilstand der vi uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser” [60, s.110]. Faktorer som påvirker kroppens termiske komfort er blant annet lufttemperatur, luftfuktighet, aktivitetsnivå og bekledningsnivå. Personlig komfort oppleves individuelt, og er ikke synonymt med termisk komfort.

Lufttemperatur er den parameteren som best beskriver de termiske omgivelsene. I svømmeanlegg er det lavt bekledningsnivå og mye varme avgis fra kroppen. Dette gjør det nødvendig med høy lufttemperatur og relativ luftfuktighet, til tross for at besøkende ofte holder et høyt aktivitetsnivå. Luften i norske svømmehaller holder normalt en relativ luftfuktighet på 50% - 55% i vinterhalvåret og omtrent 65% i sommerhalvåret. Bakgrunnen for variasjon i relativ luftfuktighet er sesongavhengige forskjeller i uteluftens dampinnhold.

Den relative fuktigheten i svømmeanlegg er tilnærmet tre ganger så høy som i norske boligbygg. Årsaken til dette er å redusere fordampningstap fra bassengene og trekkfølelse for de badende. Høy luftfuktighet gir derimot gode vekstforhold for mikroorganismer og mugg. I tillegg medfører det en stor påkjenning på bygningskonstruksjonen med blant annet høy risiko for fuktskader. Det er derfor nødvendig med tilstrekkelig luftskifte for å opprettholde et tilfredsstillende innklima som også ivaretar bygningskonstruksjonen. [10, s.183] [61]

5.1 Fuktig luft og fordampning

Betraktningene av fuktig luft baseres på Daltons modell. Fuktig luft betraktes som en gassblanding bestående av komponentene tørr luft og vanddamp. Daltons modell tillater en antakelse om at hver komponent som inngår i gassblandingen oppfører seg som en ideell gass. Videre følger antakelsene om at kreftene som virker mellom komponentene er neglisjerbare, og at hver komponent opptar et volum som er neglisjerbart i forhold til det totale volumet som omslutter gassblandingen. Dette tillater bruk av ideell gasslov, som vist i likning 5.1, hvor p angir totalt trykk, M angir gassens molare masse og v angir gassens spesifikke volum. \bar{R} er universell gasskonstant. [62, s.114, s.630]

$$pv = \frac{\bar{R}T}{M} \quad (5.1)$$

5.1.1 Fuktig luft

Det finnes flere ulike måter for å uttrykke hvor fuktig luften er. En måte å beskrive fuktig luft på er ved bruk av dampkvaliteten, x_v , som uttrykker hvor stor andel damp utgjør av den totale blandingen. Dampkvaliteten defineres i likning 5.2, hvor p_v angir vanndampens partielle trykk. [62, s. 85]

$$x_v = \frac{p_v}{p} \quad (5.2)$$

En annen måte å beskrive fuktig luft på er gjennom den spesifikke luftfuktigheten, som defineres gjennom likning 5.3, hvor 0,622 er en konstant definert av forholdet mellom vannets- og tørr lufts molvekt.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (5.3)$$

Fuktig luft kan også beskrives ved bruk av relativ fuktighet, som defineres gjennom likning 5.4, hvor p_g angir vanndampens metningstrykk ved den fuktige luftens temperatur og trykk. Likningen uttrykker hvor stor andel vanndamp luften maksimalt kan inneholde ved en gitt temperatur og trykk. For mettet vanndamp vil det partielle vanndamptrykket tilsvare metningstrykket, slik at $\phi = 100\%$. Den temperaturen hvor metning inntreer benevnes duggpunktstemperatur, og ved denne temperaturen vil vanndampen delvis kondensere. [62, s.649]

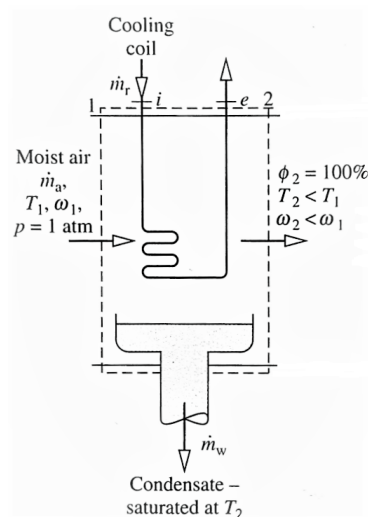
$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \Big|_{T,p} \quad (5.4)$$

Tettheten til fuktig luft kan uttrykkes ved gasskonstant for vanndamp, R_w , lufttemperatur, spesifikk fuktighet, lufttrykk og forholdet mellom molvekten til vann og tørr luft, slik som vist i likning 5.5. [63]

$$\rho = \frac{p}{R_w \cdot T \cdot (0,622 + \omega)} \quad (5.5)$$

5.1.2 Kjøling av fuktig luft

Fuktig luft inneholder latent varme, hvor energien frigjøres gjennom kondensasjon. For økt energieffektivisering kan kjølebatteri benyttes for å utnytte den tilgjengelige energien, som videre kan benyttes i et varme- og kjøleanlegg. Dersom fuktig luft føres inn i et kjølebatteri og kjøles ned ved konstant trykk til en temperatur lavere enn duggpunktstemperaturen, vil vanndampen i luften delvis kondensere til mettet vann. Luften som går ut av kjølebatteriet vil følgelig inneholde mindre vanndamp, og den resterende mengden vanndamp i luften vil være mettet med $\phi = 100\%$. Dette er illustrert i figur 5.1. [62, s.666]



Figur 5.1: Viser en forenklet skjematisk illustrasjon av et kjølebatteri, hvor varm og fuktig luft avgir varme til et sirkulerende kjølemedie [62, s. 668]. Stiplet linje angir kontrollvolumet.

Fra likning 5.3 kan den spesifikke fuktigheten også uttrykkes ved forholdet mellom massestrømmene til vanndamp og tørr luft. Dette forutsetter at det aktuelle systemet defineres som et åpent system med et definert kontrollvolum. For det åpne systemet vist i figur 5.1, vil massebalansene defineres slik som vist i likningene 5.6 og 5.7. [62, s.649, s.666].

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \quad (5.6)$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_w + \dot{m}_{v2} \quad (5.7)$$

Analyse av energioverføringen fra den fuktige luften til kjølemediet tar utgangspunkt i energibalansen for én-dimensjonale strømminger. For tilfellet vist i figur 5.1, neglisjeres endringer i potensiell og kinetisk energi, og varmeoverføring til omgivelsene anses som ubetydelig. Det vil heller ikke bli tilført eller utført arbeid i det definerte systemet. Dette resulterer i energibalansen vist i likning 5.8, hvor \dot{Q}_{cv} representerer energioverføringen som skjer innenfor kontrollvolumet. [62, s.152, s.668-669]

$$\dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) - \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2}) = 0 \quad (5.8)$$

Kapasiteten på kjølebatteriet bestemmes i henhold til likning 5.9, hvor kjølekapasiteten defineres av kjølemediets massestrøm og entalpidifferanse. På den gitte formen forutsettes det at det finnes et sett av kjente verdier for en bestemt intensiv egenskap ved kjølemediets inngang og utgang av systemgrensen. I likning 5.9 defineres \dot{Q}_r som kjølemediets kapasitet, og uttrykker varmemengden kjølemediet kan oppta. Videre uttrykker $h_e - h_i$ kjølemediets entalpidifferanse mellom henholdsvis utgang og inngang av systemgrensen. [62, s.519]

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r (h_e - h_i) \quad (5.9)$$

Dersom sirkulerende kjølemedie i væskefase ikke gjennomgår faseovergang, kan kjølemediet modelleres som en inkompressibel strøm hvor indre energi antas å kun variere med temperatur. Dette medfører at endring i spesifikk entalpi er lik endring i spesifikk indre energi. Videre fører dette til at spesifikk varmekapasitet ved konstant volum, C_v , vil være lik spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk, C_p . Ved bruk av vann som kjølemedie, vil varmekapasiteten være tilnærmet konstant i begrensede temperaturintervall. Ut i fra dette kan kjølemediets kapasitet uttrykkes gjennom den spesifikke varmekapasiteten og likning for spesifikk indre energi, slik som vist i likning 5.10. [62, s.106-107]

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r C (T_e - T_i) \quad (5.10)$$

5.1.3 Fordampning

Storhallen på Pirbadet består av et ungdomsbasseng og et bølgebasseng kategorisert som badelandsbasseng, et idrettsbasseng som er inndelt i kategoriene grunn svømmedel og dyp stupedel, og et velværebasseng og barnebasseng kategorisert som varmtvannsbasseng. Det er totalt tre boblebad i tillegg til bassengene i storhallen. Alle bassengene har ulike krav til temperatur basert på oppslagsverket ”Byggforsk håndbok 52 - Bade- og svømmeanlegg”, slik som vist i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Oversikt over ulike bassengkategorier og tilhørende temperaturintervaller [10, s.183].

Bassengkategori	Temperaturintervall [°C]
Badelandsbasseng	28 - 34
Svømmebasseng	26 - 29
Stupebasseng	26 - 32
Varmtvannsbasseng	30 - 34
Boblebad	37 - 40

I denne rapporten analyseres varmetapet fra idrettsbassenget, bølgebassenget og boblebadene. Vannet til bassengene varmes opp av fjernvarmevekslere og gjenvunnet energi fra gråvann via gråvannsvarmevekslere med integrerte varmepumper. Det totale varmetapet fra et basseng kan generelt deles inn i følgende fire kategorier:

- Konveksjon, Q_{konv}
- Konduksjon, Q_{kond}
- Stråling, Q_{str}
- Fordampning, Q_{ford}

Utført analyse av varmetapet fra bassengene tar utgangspunkt i tidsintervallet hvor badende ikke befinner seg i bassengene. Fordampningstapet fra basseng med badende vil være større, ettersom kontaktflaten mellom vann og luft øker ved bevegelse i vannet. [64]

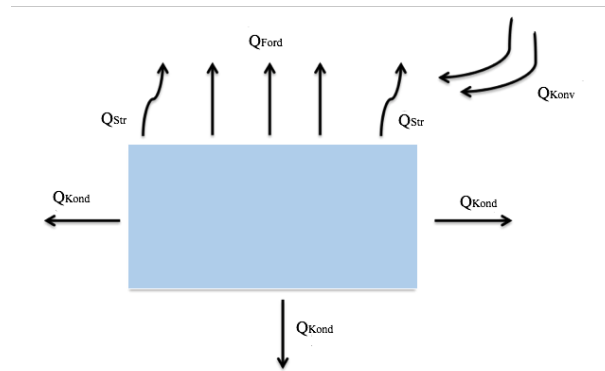
Fordampning fra en fri overflate oppstår som følge av to mekanismer; diffusjon og adveksjon. Når det ikke er bevegelse i luften like over bassenget, vil luften i dette grensesjiktet raskt mettes grunnet molekylær bevegelse. Denne prosessen kalles diffusjon, og er en svært langsom prosess. Fordampningstapet vil derfor være neglisjerbart dersom det ikke er bevegelse i luften. Dette er derimot sjeldent tilfelle ved fordampning knyttet til svømmebasseng. Dette begrunnes med at det alltid vil være enten vind eller luftstrømning som følge av ventilasjon tilstede. Det oppstår da horisontal forflytning av luft, også kalt adveksjon. [63, 64]

Bevegelse i luften kan oppstå av to mekanismer; strømning som følge av ventilasjon eller vind, og bevegelse i luften grunnet naturlig konveksjon. Bevegelse grunnet vind eller ventilasjon defineres som tvungen konveksjon. Tapene knyttet til tvungen konveksjon omtales som konveksjonstap, Q_{konv} .

Innendørs vil tapet knyttet til naturlig konveksjon være dominerende, dersom omliggende romluftstemperatur er mindre enn 2°C høyere i forhold til bassengtemperaturen. Dette vil skape en oppdriftseffekt, da mettet luft i grensesjiktet er lettere enn den omliggende romluften. Den mettede luften vil derfor stige opp og resultere i oppdriftsstrømmer som kontinuerlig tilfører fuktighet til romluften. Denne prosessen defineres som naturlig konveksjon, hvor varmetapet knyttet til prosessen omtales som fordampningstap Q_{ford} . For å redusere fordampningstapet fra naturlig konveksjon må romluften være minimum 2°C høyere enn bassengvannstemperaturen. Dampmettet luft som ligger i grensesjiktet vil da ha en større tyngde enn den omliggende romluften, slik at den dampmettede luften blir liggende mest mulig i ro over vannoverflaten. [10, s.182][65]

I tillegg til fordampningstap og konveksjonstap vil bassenget også ha varmetap som følger av konduksjon gjennom gulv og bassengvegger, omtalt som Q_{kond} . Det vil også tapes varme gjennom stråling fra bassengoverflaten. Dette tapet refereres til som Q_{str} . Varmebalansen for bassengets varmetap kan følgelig beskrives som vist i likning 5.11, og er illustrert i figur 5.2.

$$Q_{ut} = Q_{konv} + Q_{kond} + Q_{ford} + Q_{str} \quad (5.11)$$



Figur 5.2: Illustrasjon av varmetap fra basseng. Figuren er redigert for bedre kvalitet. [66]

Tidligere forskningsarbeid viser at fordampningstapet er dominerende for innendørs basseng [66]. Med dette som bakgrunn er det i denne rapporten valgt å fokusere utelukkende på fordampningstapet, Q_{ford} , forårsaket av naturlig konveksjon. Størrelsen på fordampningstapet fra vannoverflaten avhenger av følgende faktorer:

- Overflateareal, A
- Lufttemperatur, T_l
- Bassengtemperatur, T_b
- Spesikk og relativ luftfuktighet
- Lufthastighet, u
- Aktivitetsnivå i bassenget

Fordampningstapet kan beregnes fra likning 5.12, hvor h_{ford} defineres som vannets fordampningsentalpi og \dot{m}_{ford} uttrykker fordampningsmassestrømmen. [67]

$$Q_{ford} = h_{ford} \cdot \dot{m}_{ford} \quad (5.12)$$

Med utgangspunkt i Daltons modell kan massestrømmen presenteres på en generell form, vist i likning 5.13. Modellen fastslår at fordampningen er proporsjonal med damptrykkdifferansen mellom grensesjiktet og omliggende romluft. I likning 5.13 er ε definert som fordampningskoeffisienten, og A angir vannoverflatens areal. Videre uttrykker $p_{g,b} - p_v$ differansen mellom dampens metningstrykk ved bassengtemperatur og dampens partielle trykk ved lufttemperatur. I denne likningen benyttes p_g ved bassengtemperatur, da fordampningsprosessen foregår i grensesjiktet ved vannoverflaten. [63]

$$\dot{m}_{ford} = A\varepsilon(p_{g,b} - p_v) \quad (5.13)$$

Likning 5.13 kan også uttrykkes ved bruk av spesifikk fuktighet, som vist i likning 5.14. I likning 5.14 angir ω_g og ω_l henholdsvis spesifikk fuktighet i grensesjiktet og spesifikk fuktighet i vanddamp ved omliggende romluft. Spesifikk fuktighet beregnes fra likning 5.3, nærmere omtalt i kapittel 5.1.1. [67]

$$\dot{m}_{ford} = A\varepsilon(\omega_g - \omega_l) \quad (5.14)$$

Beregning av fordampningskoeffisienten baserer seg på empiriske metoder. Det er utarbeidet flere likninger for beregning av fordampningstap som inkluderer koeffisienten. Likningene viser stor spredning i resultatene. På bakgrunn av dette er det i denne rapporten valgt å benytte et utvalg metoder for å oppnå et representativt resultat. En oversikt over metodene som er valgt å benytte, er vist i tabell 5.2. I likningene benyttes trykk i kPa og temperatur i Kelvin. [65, 67]

Metoden utviklet av Mohammed Shah, professor fra University of Sunderland, differerer fra de resterende metodene. Metoden argumenteres for i artikkelen ”*Methods for calculation of evaporation from swimming pools and other water surfaces*”[64]. Argumentasjonen bygger på at naturlig konveksjon avhenger av tetthetsdifferansen i fuktig luft, som ikke er tatt hensyn til i de resterende metodene. I likningen inngår tetthetsdifferansen mellom fuktig luft ved bassengoverflaten og omliggende romluft, hvor k er en konstant som defineres ut i fra differansen. Videre uttrykker $\rho_{g,b}$ metningstettheten av fuktig luft ved bassengtemperatur og $\rho_{l,\phi}$ tettheten av fuktig luft ved omliggende lufttemperatur og relativ fuktighet. Tettheten for fuktig luft kan beregnes ved bruk av likning 5.5, nærmere beskrevet i kapittel 5.1.1. [63]

Tabell 5.2: Metoder for beregning av fordampningsmassestrøm. [63, 67]

Metode	Fordampningsmassestrøm \dot{m}_{ford} [kg/h·m ²]
ASHRAE	$\frac{AF \cdot (0.0888 + 0.0783u)}{h_{ford}} \cdot (p_{g,b} - p_{l,\phi}) \cdot 3600$
VDI	$\frac{5}{100} \cdot (p_{g,b} - p_{l,\phi})$
Shah	$k \cdot \rho_{b,g} (\rho_{l,\phi} - \rho_{b,g})^{1/3} \cdot (\omega_{g,b} - \omega_{l,\phi})$ $(\rho_{l,\phi} - \rho_{g,b}) < 0 \rightarrow (\rho_{g,b} - \rho_{l,\phi})$ $(\rho_{l,\phi} - \rho_{g,b}) > 0,02 \rightarrow k = 35$ $(\rho_{l,\phi} - \rho_{g,b}) < 0,02 \rightarrow k = 40$

5.1.4 Reduksjon av fordampningstap

Som tidligere beskrevet resulterer fordampningstapet i oppdriftsstrømmer av fuktig luft som kan trekke inn i bygningskonstruksjonen. Dette er særlig i tilfeller hvor ventilasjonssystemet ikke klarer å opprettholde undertrykk i hallen, nærmere beskrevet i påfølgende kapittel 5.2. Konsekvensen av vanndamp i konstruksjonen er mugg og bakterievekst, som på sikt fører til råte.

Ved bruk av et bassengovertrekk er det mulig å redusere både fordampningstapet og følgelig bassengets oppvarmingsbehov med opp til 50% [68]. Reduksjon av fordampningstap reduserer mengden fukt som trekker inn i konstruksjonen, samtidig som behovet for avfukting av romluften også reduseres. Ved bruk av et slikt overtrekk er det viktig å velge materialer som absorberer lite vann, da det fuktige miljøet legger til rette for rask bakterievekst og mugg. [10, s.11-12]

5.2 Trykkforskjeller i storhallen

Fuktig luft vil alltid utøve et vanndamptrykk, også kalt vanndampens partialtrykk, på omgivelsene. Dette vil stige med økende fuktighetsinnhold i luften, og være uavhengig av det partielle lufttrykket. Forskjeller i vanndamptrykk fører til transport av vanndamp fra områder med høyt vanndamptrykk til områder med lavt vanndamptrykk. Dette er en langsom prosess som kalles diffusjon, og fører til fukttransport i bygningskonstruksjonen. For å forhindre prosessen legges det inn dampsperre i tak og vegger. I svømmeanlegg vil fuktighet tilføres luften på grunn av fordampning fra bassengvann. Dette medfører at vanndamptrykket nesten alltid vil være større innendørs enn vanndamptrykket i uteluften og omliggende tørre soner. [10, s.70-71]

Fuktig luft kan også transporteres inn i bygningskonstruksjonen gjennom konveksjon. I motsetning til diffusjon er konveksjon en hurtigere prosess, hvor fuktig luft strømmer ut gjennom åpninger i konstruksjonen. Luftstrømmer fra innsiden til utsiden av bygninger krever trykkforskjeller mellom innvendig og utvendig side. Det er i hovedsak tre former for drivkrefter som skaper trykkforskjeller [10, s.70-72][69]:

- Vind
- Ventilasjon
- Innvendig og utvendig temperaturforskjell

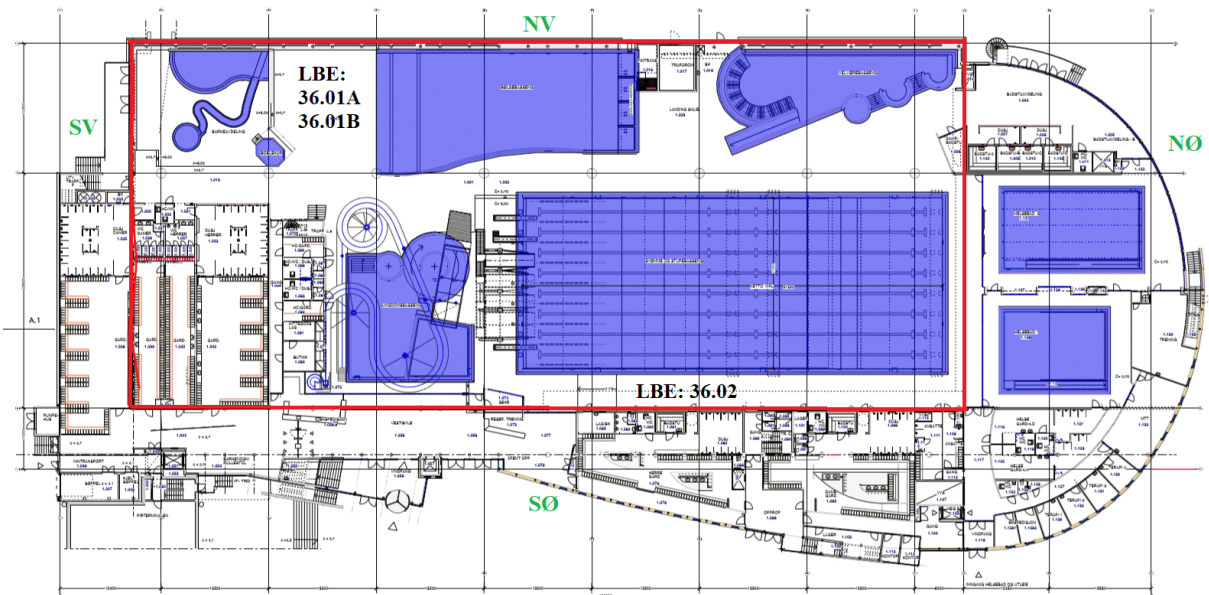
Vind skaper et utvendig overtrykk på losiden og utvendig undertrykk på lesiden, som vanligvis resulterer i innvendig undertrykk. Ventilasjon påvirker innvendig trykk ved å variere avtrekksmengde og tilluftsmengde. Temperaturforskjell mellom utvendig og innvendig side påvirker innvendig trykk gjennom skorsteinseffekten. Når innetemperaturen er høyere enn utetemperaturen, vil luften inne i bygningen stige etterhvert som den varmes opp. Dette skaper et overtrykk i de øvre delene av bygningen, og undertrykk ved gulvnivå. Overtrykk i de øvre delene medfører at varm luft trenger ut gjennom takkonstruksjon og vinduer, da utvendig trykk er mindre enn innvendig trykk. Dette begrunnes med at utvendig lufttrykk avtar med høyden, fordi tykkelsen på luftlaget blir mindre. Undertrykket ved gulvnivå medfører at kald uteluft trenger inn i bygningskonstruksjonen. [10, s.70-72][69]

Slik som Ruud avdekket i sin masteroppgave, er det et absolutt luft-undertrykk i hovedhallen opp til omtrent 4 m og absolutt luft-overtrykk fra 4 m til taket med total høyde på 18 m [70, s.73]. Dette til tross for at det er installert luftdyser i taket for å skape bedre omrøring. Overtrykket kan reduseres ved blant annet økt avtrekksmengde på ventilasjonsanlegget, slik at undertrykk oppnås i en større del av bygget.

For å redusere overtrykket er det anbefalt at avtrekksmengden på ventilasjonsanlegget er 10% større enn tilluftsmengden [10, s.38]. Slik som Marianne Ruud også avdekket i sine undersøkelser, vil ikke Pirbadet kunne operere med fullstendig undertrykk i hovedhallen, da avtrekksmengden må overstige 10% av tilluftsmengden. Dette strider mot garantien på ventilasjonsanlegget. I tillegg ville undertrykket blitt av en størrelse som forårsaker trekk og gjør det vanskelig å åpne dører ved gulvnivå. Kommende teori om ventilasjonsanlegget vil derfor fokusere på ventilasjonsanleggets oppbygning og virkemåte, samt hvordan anlegget kan energieffektiviseres. Basert på Marianne Ruud sine resultater, vil ikke reduksjon av overtrykket vektlegges.

5.3 Ventilasjonssystem

Generelt for svømmeanlegg fungerer ventilasjonssystemet slik at den varme og tørre tilluften tilføres langs kalde flater, spesielt vinduer, for å unngå kondensering. Avtrekk er normalt plassert i motsatt ende av tilluftsventilene [10, s.188]. Pirbadet driftes med omrøringsventilasjon, hvor hovedhallen ventileres av tre luftbehandlingsenheter (LBE). Alle enhetene er konstruert på samme måte og opererer med samme sett-verdier. Enhetene styres etter temperatur- og fuktighetssensorer for å opprettholde stabilt og tilfredsstillende inneklima. Plassering av luftbehandlingsenhetene er vist i figur 5.3. LBE 36.01A og 36.01B opererer parallelt, og har dermed samme plassering for friskluftinntak, tilluft, avtrekk og avkast. Tilførsel av tilluft fra nevnte enheter skjer langs den nord-vestlige fasade, mens avtrekket er plassert bak skliene ved sør-vestlig fasade. LBE 36.02 har avtrekk i 1.etg og tilluft i 2.etg under vinduene ved sør-østlig fasade.

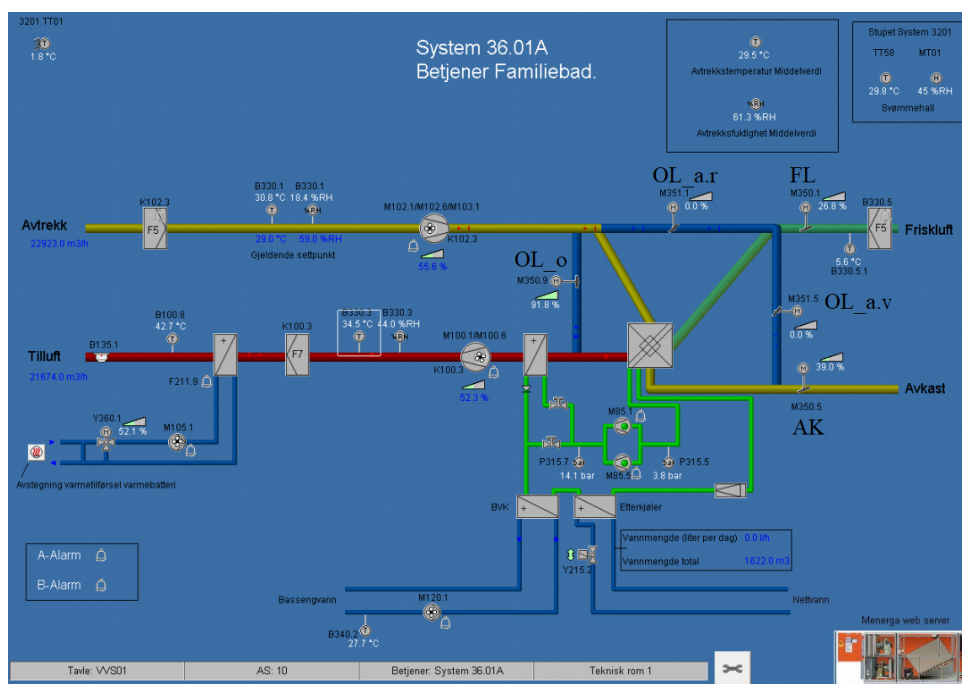


Figur 5.3: Viser plassering av luftbehandlingsenhetene (LBE) innenfor systemgrensen. Tilgang til plantegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigeres.

Alle luftbehandlingsenhetene har en platevarmeveksler i tillegg til en integrert varmepumpe med bassengvannskondensator og etterkjøler, slik som vist i figur 5.4. Spjeldåpningene reguleres ut i fra hvilken driftsmodus systemet skal driftes i. I figur 5.4 er følgende spjeld markert:

- OL_o - Omluftspjeld for oppvarming
- $OL_{a,r}$ - Omluftspjeld for avriming
- $OL_{a,v}$ - Omluftspjeld for avfukking
- AK - Spjeld i avkastkanal
- FL - Spjeld i friskluftkanal

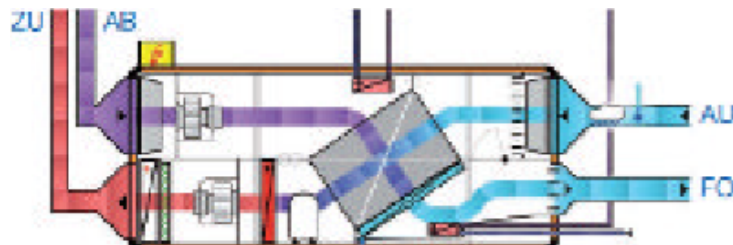
Den mest brukte driftsmodusen er normal friskluftsdrift. Når systemet driftes i denne driftsmodusen, kryssveksles avtrekksluften med friskluften i platevarmeveksleren for å gjenvinne varmeenergi. Etter friskluften er oppvarmet av gjenvunnet energi fra avtrekksluften, kan det være ledig kapasitet i varmepumpen. Resterende energi i varmepumpen benyttes da til forvarming av bassengvann og nettvann i henholdsvis bassengvannskondensatoren og etterkjøleren. Etter friskluften har gjenvunnet energi i platevarmeveksleren, føres friskluften gjennom to varmevekslere. Først varmepumpens kondensator og deretter en ettervarmer med fjernvarme, for å sikre korrekt temperatur og relativ fuktighet på tilluften. [71]



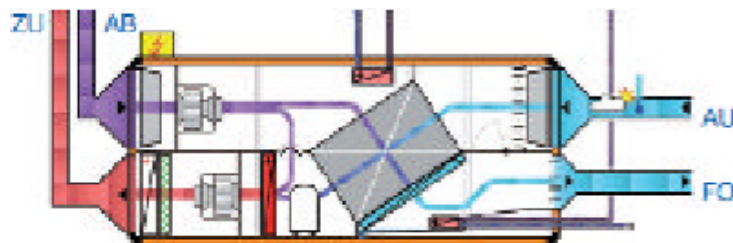
Figur 5.4: Viser oppbygningen av LBE 36.01A. Tilgang til systemtegning er gitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet, Trond Sigernes.

I tillegg til normal friskluftdrift benyttes redusert friskluftdrift og omluftdrift. Normal og redusert friskluftdrift benyttes henholdsvis ved høyt og lavt fuktighetsinnhold i uteluften. Omluftdrift benyttes når inneluften kun skal avfuktes, som for eksempel på natten. Omluftdrift karakteriseres av redusert avtrekks- og tilluftsmengde. De ulike driftsmodusene er illustrert i figurene 5.5, 5.6 og 5.7, som er hentet fra ventilasjonssystemets bruksanvisning, gitt tilgang til av teknisk driftsansvarlig ved Pirbadet, Trond Sigernes. I figurene 5.5, 5.6 og 5.7, gjelder følgende forkortelser:

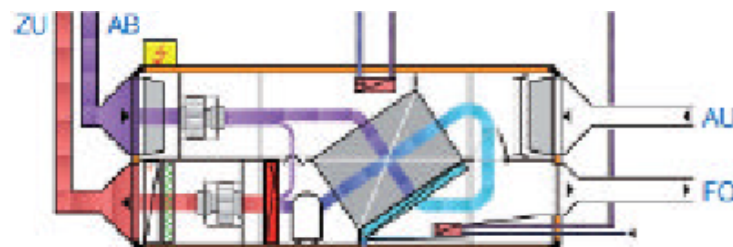
- FO - Avkastluft
- ZU - Tilluft
- AU - Friskluft
- AB - Avtrekksluft



Figur 5.5: Illustrasjon av luftstrømmene under normal friskluftdrift. I denne driftsmodusen stenges omluftspjeldene, mens avkast- og friskluftspjeldene varieres etter behov.



Figur 5.6: Illustrasjon av luftstrømmene under redusert friskluftdrift. I denne driftsmodusen åpnes omluftspjeldet OL_o ved behov.



Figur 5.7: Illustrasjon av luftstrømmene under omluftdrift. I denne driftsmodusen åpnes omluftspjeldene OL_o og $OL_{a,v}$ normalt 100%. Friskluftspjeldet stenges, mens avkastspjeldet holder en spjeldåpning på omtrent 20%.

6 Metodikk

Dette kapittelet tar for seg fremgangsmåte for beregninger og etablering av modeller for de tre valgte fokusområdene. Som tidligere nevnt er de valgte fokusområdene simulering av kjølebatteri i ventilasjonssystemets avkastkanal, reduksjon i varmetap fra utvalgte basseng og laststyring av bølge-genererende maskin. Alle tre fokusområdene har vært tidskrevende, hvorav laststyring ved bruk av batteri har utgjort hoveddelen av prosjektet.

Det er antatt at badeanlegg har en levetid på 40 år. Ettersom Pirbadet ble bygget i 2001, estimeres den gjenværende levetiden til 21 år. De undersøkte teknologiene i denne oppgaven er ikke dimensjonert i henhold til Pirbadets levetid på 21 år, men heller levetiden på de enkelte teknologiene. Med levetider mellom 8 - 10 år vil det derfor være nødvendig å erstatte løsningene ved endt levetid.

6.1 Ventilasjonssystem

Som beskrevet i kapittel 5.3, driftes ventilasjonssystemet i normal friskluftsdrift, redusert friskluftsdrift eller omluftsdrift. Volumstrømmen av avtrekksluft og tilluft avhenger av hvilken modus ventilasjonssystemet driftes i. For å avdekke ventilasjonssystemets driftsmønster, er det gjennomført analyse av spjeldåpninger over fire dager. Driftstid i normal friskluftsdrift er vist i vedlegg B.2. Analysen tar utgangspunkt i måledata fra styringssystemet til LBE 36.01A, hvor blant annet avtrekksmengde, tilluftsmengde, romluftstemperatur og tilhørende relativ fuktighet måles hvert minutt.

Ettersom kjølebatteriet skal monteres i avkastkanalen, var formålet med analysen å fastsette en gjennomsnittlig volumstrøm i avkastkanalen og gjennomsnittlig driftstid i normal friskluftsdrift. Som illustrert i figur 5.5 i kapittel 5.3, vil luftmengden i avkastkanalen være lik avtrekksmengden i normal friskluftsdrift. Basert på antall minutter i friskluftsdrift er beregnede gjennomsnittlige parametre vist i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Beregnede gjennomsnittlige verdier basert på parameterenes minuttmålinger i friskluftsdrift.

Parameter	Gjennomsnittlig resultat
Driftstid	14,8 timer
Avkastmengde	24 654 m ³ /h
Tilluftsmengde	23 471 m ³ /h
Romluftstemperatur	29°C
Relativ fuktighet	64,3%

Analysen for å avdekke ventilasjonsmønsteret er basert på data fra 2. - 8. mars 2020. Dette valget er tatt for å begrense arbeidsomfang, da analyse av ventilasjonsmønster for et år ville vært svært omfattende og tidkrevende. Det antas derfor at volumstrømmen justeres etter årstid for å dekke avfuktingsbehovet i storhallen. Det var også planlagt loggføring av temperatur i ventilasjonssystemets avkastkanal i den valgte uken. Tilgang på disse målingene ville gjort det mulig å undersøke sammenhengen mellom utetemperatur og temperatur i avkastkanal, for nærmere undersøkelse av kjølebatteriets ytelse ved et nøyaktig temperaturintervall. Det var derimot ikke mulig å utføre den planlagte loggføringen grunnet Covid-19.

6.2 Kjølebatteri

Et eksempel på kjølebatteri som er aktuelt å installere i avkastkanalen er vist i figur 6.1, og er en luft-vann-kryssvarmeveksler. Det spesifikke kjølebatteriet har én inngang og én utgang for isvannet, og er delt inn i fem rørrækker som luften treffer normalt på. Denne typen kjølebatteri er tilpasset bruk av vann som inneholder frostvæske, også kalt isvann (CW). Kjølebatteriet er designet med finner for å øke overflatearealet, som fører til økt varmeoverføring.

Som tidligere beskrevet er implementering av kjølebatteriet et energieffektiviserende tiltak for å redusere Pirbadets forbruk av fjernvarme. Pirbadet mottar fjernvarme og fjernkjøling gjennom varmevekslere til byggets integrerte varme- og kjøleanlegg. I kjøleanlegget sirkulerer isvann, en blanding av 50% glykol og 50% vann, som kjøles ned gjennom en sjøvannsveksler. I varmeanlegget sirkulerer vann som varmes opp fra fjernvarme, normalt fra forbrenning av biobrensel, spillvarme fra industri eller avfallsforbrenning. Varme- og kjøleanlegget på Pirbadet er per i dag separert. Sirkulerende vann og frostvæske i varme- og kjøleanlegg antas å ha konstante varmekapasiteter for temperaturintervallet benyttet i simuleringen. Glykol har omtrent halvparten så stor varmekapasitet som vann.

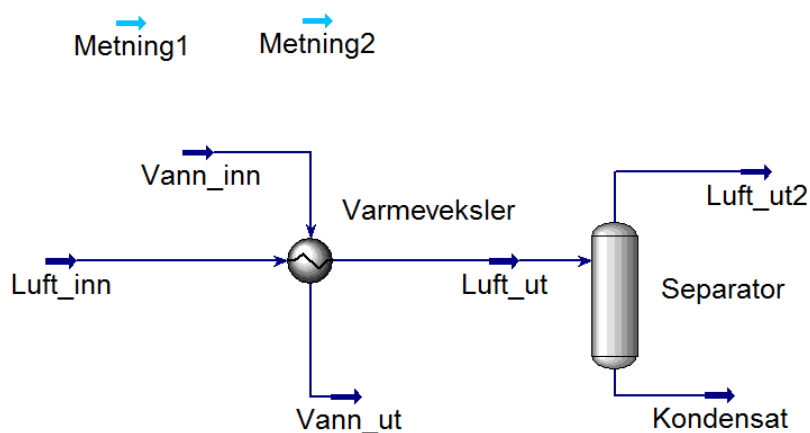


Figur 6.1: Kjølebatteri av type CW. [72]

Kjølebatteriet skal integreres i kjøleanlegget slik at sirkulerende isvann tar opp tilgjengelig varmeenergi i avkastluften, før isvannet føres videre til blant annet kjemirom. Her skal isvannet ta opp ytterligere varmeenergi for avkjøling av maskiner og rom. Videre skal varmeenergien avgis til varmeanlegget gjennom to parallelle varmpumper som kobler sammen varme- og kjøleanlegget. Det nye systemet hever temperaturen på vannet i varmeanlegget og behovet for fjernvarme reduseres. Varmeenergien som overføres i kjølebatteriet vil med dette være minimum besparelse i fjernvarmeforbruk, da varmemengden som tas opp i kjemi- og datarom og energimengden som tilføres fra kompressorene i pumpene, ikke er simulert.

6.2.1 Modellering i Aspen HYSYS

Modellering av kjølebatteriet i Aspen HYSYS begynner med å definere materialkomponentene som inngår i systemet og en passende “fluid package”. En “fluid package” er en termodynamisk modell som Aspen HYSYS benytter for å kalkulere egenskaper for de valgte materialkomponentene, i ulike tilstander og blandinger. For dette tilfellet er det kun vann og luft som inngår, derfor benyttes SRK som termodynamisk modell. Denne modellen benyttes blant annet for system med materialkomponenter som vann og luft, med temperatur høyere enn -143°C og trykk lavere enn 5000 kPa. Videre etableres flytskjemaet gjennom å velge nødvendige driftskomponenter og tilhørende strømmer, slik som vist i figur 6.2.

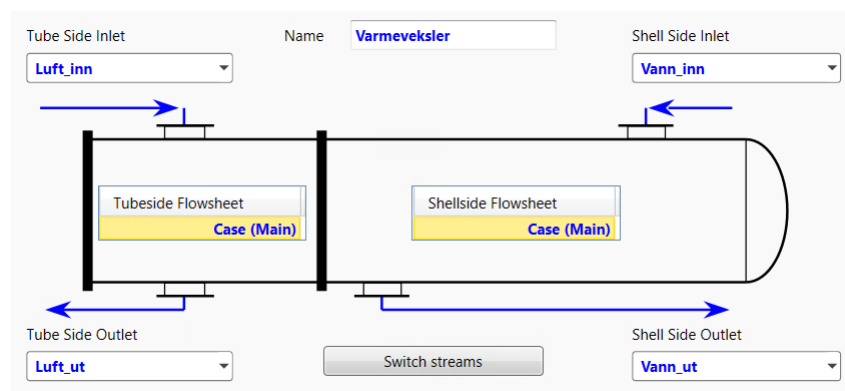


Figur 6.2: Flytskjema for det modellerte kjølebatteriet.

Aspen HYSYS har ikke fuktig luft tilgjengelig som en komponent. Dette medfører at mengden vanddamp i avkastluften må implementeres manuelt i luftstrømmen $Luft_{inn}$. Dette fører også til at en separator må inkluderes i flytskjemaet, da varmeveksleren ikke registrerer den latente varmen fra kondenseringen. Kjølebatteriet er dimensjonert for luft-temperatur og relativ fuktighet på henholdsvis 12°C og 80%, slik som vist i vedlegg B.1. Dette til tross for at luftstrømmen allerede har overført varmeenergi til friskluften i plateveksleren og fordampere i ventilasjonsaggregatet.

Ettersom den fuktige luften kjøles ned til en lavere temperatur enn duggpunktstemperatur, er det i tillegg valgt å simulere kjølebatteriet for en inn-strøm med mettet vanddamp ($\phi = 100\%$). Denne antakelsen er basert på utetemperatur, relativ luftfuktighet utendørs og temperatur i avkastkanalen 5. mars. Analyse av fuktig luft i psykometrisk diagram ga grunnlag for å hevde $\phi = 100\%$ for nedkjøling av luftstrøm i ventilasjonsaggregatets plateveksler fra 29°C til 12°C , for veksling med friskluft med utetemperatur -1°C og $\phi = 70\%$. Diagrammet er presentert i vedlegg E.

Varmeveksleren benyttet i modelleringen er en U-rørsvarmeveksler, hvor strømmene holdes fysisk adskilt. Dette er vist i figur 6.3. I varmeveksleren føres en luftstrøm og en strøm av kjølemedie, som i dette tilfellet er isvann. Strømmen med den laveste tettheten føres gjennom “tube-side”, mens strømmen med den høyeste tettheten føres gjennom “shell-side”. For hver strøm defineres et trykkfall, oppgitt i vedlegg B.1. Isvannets strøm inn til varmeveksleren, $Vann_{inn}$ defineres av inn-verdiene fra vedlegg B.1. $Vann_{ut}$ defineres av $Luft_{inn}$.

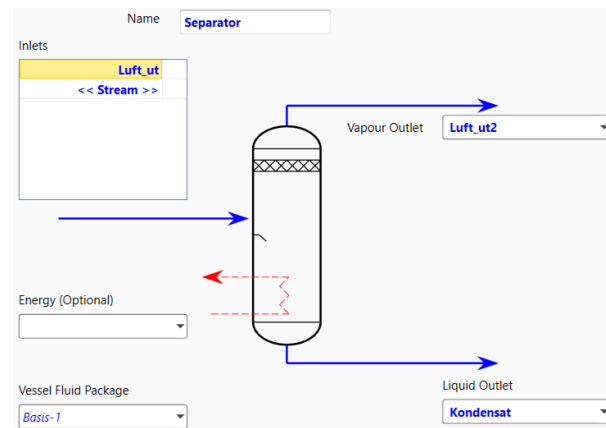


Figur 6.3: Den modellerte varmeveksleren.

Definering av $Luft_{inn}$ tar utgangspunkt i materialstrømmen $Metning1$, hvis eneste funksjon er å kalkulere vanddampens metningstrykk som funksjon av luftens inn-temperatur. For å implementere korrekt andel vanddamp i $Luft_{inn}$ benyttes metningstrykket fra $Metning1$ i likning 5.4, som løses med hensyn på det partielle damptrykket, p_v . Videre bestemmes dampkvaliteten, x_v , fra likning 5.2 hvor verdien for det totale trykket, p , hentes fra vedlegg B.1. Vanddampkvaliteten tilsvarende en prosentandel, hvorav den resterende delen tilsvarende andel tørr luft, x_a , uttrykt ved $1 - x_v$.

Videre implementeres verdiene for temperatur og trykk i $Luft_{inn}$. Volumstrøm i avkastkanalen hentes fra tabell 6.1. Avslutningsvis implementeres andel vanddamp og tørr luft i luftstrømmen. Uavhengig av inn-temperaturen på luften, vil luften kjøles ned til $6,5^\circ\text{C}$ i varmeveksleren. Dette vil være luftstrømmen $Luft_{ut}$ sin temperatur inn på separatorene.

Separatoren i Aspen HYSYS er vist i figur 6.4. Dette er en komponent som separerer en strøm i gassfase til to adskilte strømmer i henholdsvis gass- og flytende fase. Separatoren tillater med dette å simulere kondenseringsprosessen av luftens vanndampinnhold, som vil foregå isotermisk.



Figur 6.4: Illustrasjon av separatoren som inngår i modellering av kjølebatteriet.

Definering av $Luft_{ut2}$ tar utgangspunkt i materialstrømmen $Metning2$, hvis eneste funksjon er å kalkulere vanndampens metningstrykk som funksjon av luftens ut-temperatur. Ettersom prosessen er isotermisk, vil metningstrykket kalkuleres kun for en temperatur lik $6,5^{\circ}\text{C}$. Resultatet fra $Metning2$ benyttes videre i likning 5.4, som løses med hensyn på p_v . Videre bestemmes dampkvaliteten fra likning 5.2, hvor verdien for p hentes fra vedlegg B.1. Mengde tørr luft, x_a , bestemmes følgelig gjennom $1 - x_v$. Verdiene for x_a og x_v implementeres i luftstrømmen. Vanndampen i $Luft_{ut2}$ vil være tilnærmet mettet, slik som beskrevet i kapittel 5.1.2. Kondensatet er mettet væske med temperatur lik temperaturen til $Luft_{ut2}$, og kondensatmengden vil variere i henhold til temperaturen og fuktigheten på $Luft_{inn}$.

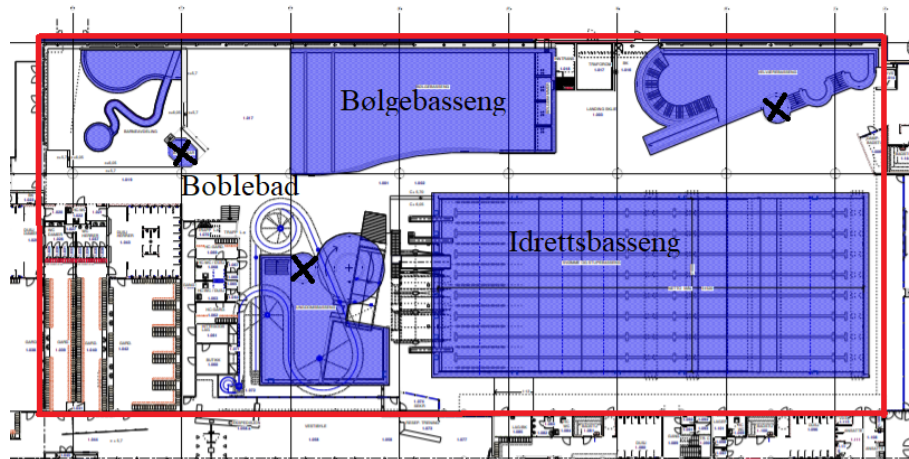
6.3 Varmetap fra fordampning

I det kommende kapittelet beskrives fremgangsmåten for beregning av fordampningstapet fra de utvalgte bassengene i storhallen. Hensikten med beregningen er å estimere hvor mye varme som tapes til fordampning, samt å vurdere lønnsomheten av å investere i bassengovertrekk. Ettersom det kun kan benyttes overtrekk utenfor bassengets brukstid, er alle beregninger utført med antakelse om null badende.

Varmetap fra fordampning er beregnet for fem av totalt ni basseng i storhallen. Som tidligere omtalt i kapittel 5.1.3, er fordampningen størst fra basseng med høyere temperatur enn romluften, hvor fordampningen øker med økende bassengtemperatur. For å redusere fordampningstapet er en mulig løsning å benytte et bassengovertrekk. Det er derfor valgt å fokusere på basseng med enkel geometri og som dermed er egnet for bruk av overtrekk. En oversikt over valgte basseng, tilhørende temperatur og areal er vist i tabell 6.2. Bassengenes plassering innenfor systemgrensen er illustrert i figur 6.5.

Tabell 6.2: Temperatur og areal for utvalgte basseng.

Bassengtype	Areal [m^2]	Temperatur [$^{\circ}C$]
Idrettsbasseng	1082	27
Bølgebasseng	288	31
Boblebad	3 stk. à 4,91	38



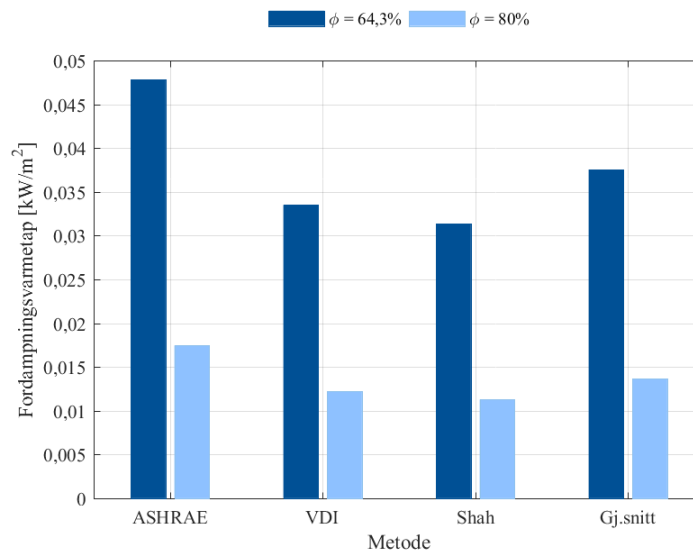
Figur 6.5: Utvalgte basseng for analyse av fordampningstap. Boblebadene er merket med X. Originalfiguren er vist i vedlegg A.2.

Varmetap fra fordampning er i denne rapporten beregnet ved bruk av tre ulike metoder. Årsaken til dette er at alle dagens metoder er empiriske og utarbeidet fra måldata. Metodene baserer seg på en empirisk bestemt fordampningskoeffisient, og differansen i vanndamptrykket mellom grensesjiktet og omliggende romluft. Metodene kan også uttrykkes ved differansen i fuktighetsinnhold, nærmere beskrevet i kapittel 5.1.3.

Absolutt trykk i storhallen antas å være 1 atm, basert på målinger fra Marianne Ruuds masteroppgave "Pressure controlled ventilation of the swimming pool"[70]. Antatt lufthastighet over basseng er 0,1 m/s. Bakgrunnen for dette er luftstrømmer forårsaket av ventilasjon. Lufttemperatur i storhallen er beregnet til 29 $^{\circ}C$ basert på gjennomsnittsmålinger, som vist i tabell 6.1. Med utgangspunkt i bassengenes temperatur er det valgt å utføre beregninger i temperaturintervallet 27 $^{\circ}C$ - 40 $^{\circ}C$. Fordampningsentalpien til vann, h_{ford} og metningstrykk for vanndamp, p_g , i temperaturintervallet er hentet fra tabell C.1 i vedlegg C.

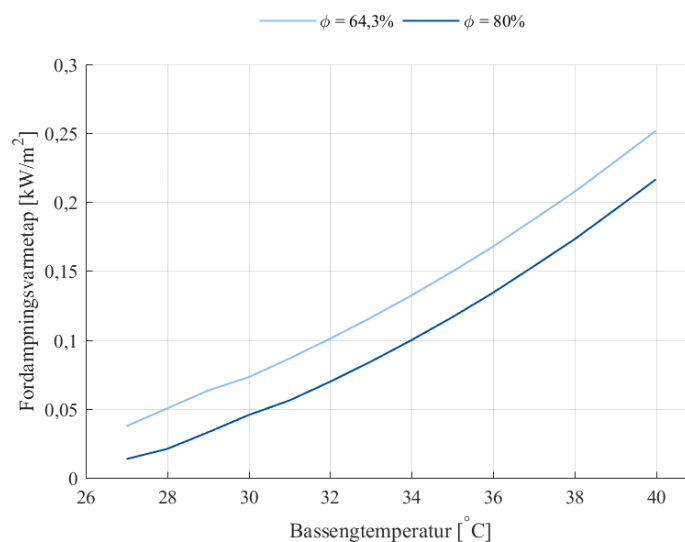
Ventilasjonsanlegget styres etter en sett-verdi på $\phi = 64,3\%$, som vist i tabell 6.1. Til tross for dette oppleves dårlig sirkulasjon av luften i hallen, og teknisk driftsansvarlig på Pirbadet mistenker relativ luftfuktighet opp mot 80%. Basert på dette utføres alle beregninger for $\phi = 64,3\%$ og $\phi = 80\%$. Partielt vanndamptrykk ved 29 $^{\circ}C$ er beregnet ved bruk av likning 5.4. Spesifikk fuktighet for mettet vanndamp i grensesjikt ved bassengtemperatur, $\omega_{g,b}$, og ved lufttemperatur, ω_l , er beregnet ved bruk av likning 5.3. Tetthet til fuktig romluft, $\rho_{l,\phi}$ og fuktig luft i grensesjiktet over bassengoverflaten, $\rho_{g,b}$, er beregnet ved bruk av likning 5.5.

Eksperimentelle forsøk viser at metodene som gir lavest varmetap fra fordampning samsvarer best med fysiske målinger. Forsøk ved *Poznan University of Technology* og *Aalborg University* viser at VDI, ASHRAE og SHAH er metodene som gir lavest fordampningsvarmetap. Ettersom alle tre metodene er anerkjente, er det i denne rapporten valgt å benytte gjennomsnittsverdien av resultatene. Fordampningsvarmetap per m^2 fra de valgte metodene er vist i figur 6.6. Høyre søyle viser beregnet gjennomsnittetsverdi. Beregningen er utført for en bassengtemperatur på 27°C , for å illustrere spredningen i de ulike metodenes resultat.



Figur 6.6: Varmetap fra fordampning fra idrettsbassenget ved ulike metoder.

Figur 6.7 viser gjennomsnittlig varmetap fra fordampning ved $\phi = 64,3\%$ og $\phi = 80\%$ for det bestemte temperaturintervallet. Grafene viser trend til eksponentiell stigning for økende temperaturer, hvor kurven for $\phi = 64,3\%$ ligger over $\phi = 80\%$ for alle temperaturer i intervallet.



Figur 6.7: Varmetap fra fordampning som funksjon av bassengtemperatur ved ulik relativ luftfuktighet.

Som beskrevet i kapittel 5.1.4, kan varmetapet reduseres med opptil 50% ved å benytte overtrekk utenfor bassengenes brukstid. Idrettsbassenget på Pirbadet benyttes i badets totale åpningstid, mens bølgebasseng og boblebad kun benyttes innenfor ordinære åpningstider. Pirbadets åpningstider er vist i tabell A.1 i vedlegg 10.

Basert på disse åpningstidene kan idrettsbassenget benytte overtrekk i gjennomsnitt 8,29 t/døgn, mens boblebad og bølgebasseng kan benytte overtrekk i gjennomsnitt 11,36 t/døgn. Etter korrespondanse med *Enwa badeanlegg* estimeres kostnaden av et overtrekk for idrettsbassenget til 1,5 mill. kr og 450 000 kr for bølgebassenget inkl. automatisert opprullingssystem. Pris på overtrekk til boblebadene antas til 8000 kr per stykk, basert på leverandør av spabad og spaløkk *DenForm* sine priser. [73]

6.4 Valg og simulering av batteri

Dette delkapittelet tar for seg valg og simulering av batteri, basert på driftsmønsteret til induksjonsmotoren i den bølge-genererende maskinen. Formålet med batteriet vil være å redusere belastningen på det lokale nettet når behovet er stort. Parametere for batteriet presenteres, for så å simulere utlading og oppladning over tre dager med ulikt driftsmønster. Effektbehovet til induksjonsmotoren er beregnet etter gjennomsnittlig effektforbruk og utelukker en høy startstrøm. Dette forutsetter implementering av mykstarter, en komponent som ikke vil vektlegges i dette prosjektet.

6.4.1 Dimensjonering av batteriet

Batteriet er dimensjonert for maksimalt 11 driftsintervall av den bølge-genererende maskinen, basert på Pirbadets åpningstider. Dersom maskinen driftes mer enn 11 ganger om dagen, må induksjonsmotoren være tilkoblet nettet, da dette overstiger batteriets maksimale kapasitet. Induksjonsmotoren, som utgjør maskinens elektriske forbruk, er spesifisert med driftsverdiene vist itabell 6.3. I vedlegg D er effekten induksjonsmotoren trekker fra nettet beregnet til 48,0 kW fra likning 3.1. Dette utgjør batteriets maksimale utladingseffekt.

Tabell 6.3: Driftsverdier for induksjonsmotoren i den bølge-genererende maskinen.

Driftsverdier for induksjonsmotoren	
Nominell strøm	77 [A]
Nominell spenning	400 +\ -10 % [V]
Merkeeffekt	45 [kW]
Effektfaktor	0.9
Omdreiningshastighet	2955 [rpm]
Frekvens	50 [Hz]
Fase	3-fase

Batterikapasiteten er beregnet ved bruk av likning 4.1, med merkeverdier fra tabell 6.3, og driftstid på 110 minutter. Videre er verdien oppskalert etter krav for 70% SoC og 80% kapasitetsbehov ved slutten av batteriets levetid. I tillegg er kapasiteten oppskalert med en faktor på 1,24 for å drifte i et SoC-intervall mellom 20-90%. Energikapasiteten defineres fra likning 4.2 med merkeverdier fra tabell 6.3. Ettersom det simulerte batteriet ikke er reelt, er energieffektiviteten til batteriet ukjent. Dermed er denne parameteren utelukket fra dimensjoneringen.

Som beskrevet i kapittel 3.1.1, har induksjonsmotoren høy startstrøm og trekker derfor betraktelig mer effekt i oppstartsperioden enn den resterende driftstiden. Dette er illustrert i figur 3.4. For å unngå unødvendig overdimensjonering, har batteriet kun blitt dimensjonert i henhold til induksjonsmotorens merkeverdier. Uten implementering av mykstarter vil det simulerte batteriet være underdimensjonert.

Med bakgrunn i driftsverdiene vist i tabell 6.3, og basert på litteratur om Li-ion batterier beskrevet i 4.4, vil det simulerte batteriet være et NMC-batteri. Valget begrunnes med NMC-batteriets høye spesifikke effekt og energi, samt lang levetid. I tillegg anses teknologien som relativt sikker sammenlignet med NCA-batterier, som også tilfredsstillende spesifiserer spesifiseringene. Det eksisterer et bredt utvalg av batteriteknologier, hvor utviklingen er i stor vekst. Det er derfor viktig å følge med på utviklingen av batterier og andre teknologier som kan vise seg å yte bedre for det spesifikke tilfellet. LFP-batterier er et av flere batteri som er mulig å benytte. Likevel er forekomst av korrosjon i saltholdig miljø viktig å analysere for LFP, da jern korroderer lett. Grunnet lavere spesifikk energi enn NMC, er det også viktig å kunne sammenligne økt antall sykler mot lavere spesifikk energi. Ettersom Pirbadet har et korrosivt saltvannsholdig miljø, kan NMC-batteri benyttes, da dette er batteritypen som leveres fra maritime batteripakkeprodusenter og er testet for slike miljø.

Med utviklingen kan Si-holdige anodematerialer bli gunstig å velge, i henhold til teori omtalt i kapittel 4.3. Hvorvidt Si-holdige anoder vil utkonkurrere grafitt er uvisst, da teknologien fortsatt er under utvikling. På bakgrunn av dette er det vanskelig å forutsi hvilket anodemateriale som vil være best egnet ved prosjektets oppstart. Det antas derfor at batteriet benytter grafitt som anodemateriale, da dette vurderes som det best egnede materialet på dagens marked. Investeringskostnaden til batteriet er etter kommunikasjon med bransjeaktører antatt til å være omlag 7200 kr/kWh, inkludert styringssystem.

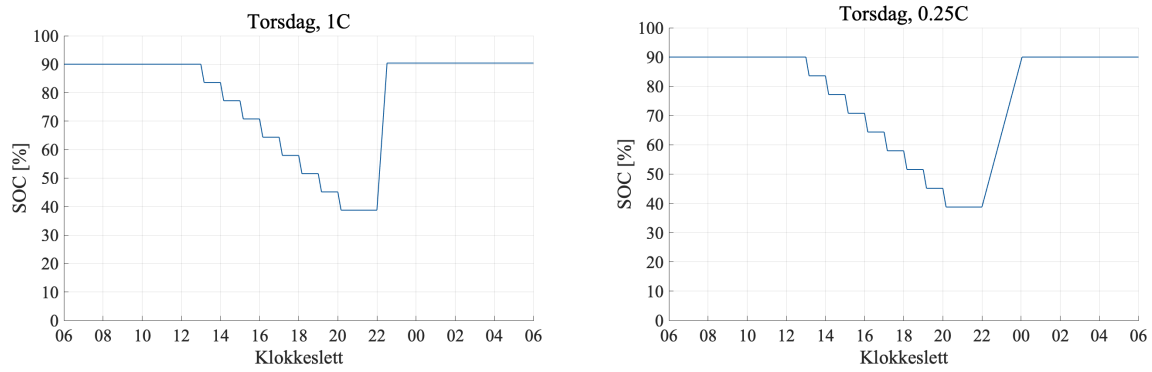
6.4.2 Batteriets opp- og utlading

Ettersom C-raten til batteriet påvirker levetiden, er det ønskelig å undersøke om NMC-batteriet kan operere med en lavere C-rate enn anbefalt. For opplading av batteriet vil det eneste kravet være at batteriet er fullt oppladet før første drift påfølgende dag. Det er derfor valgt å simulere NMC-batteriet med to ulike verdier for C-rate, herunder 1C og 0,25C.

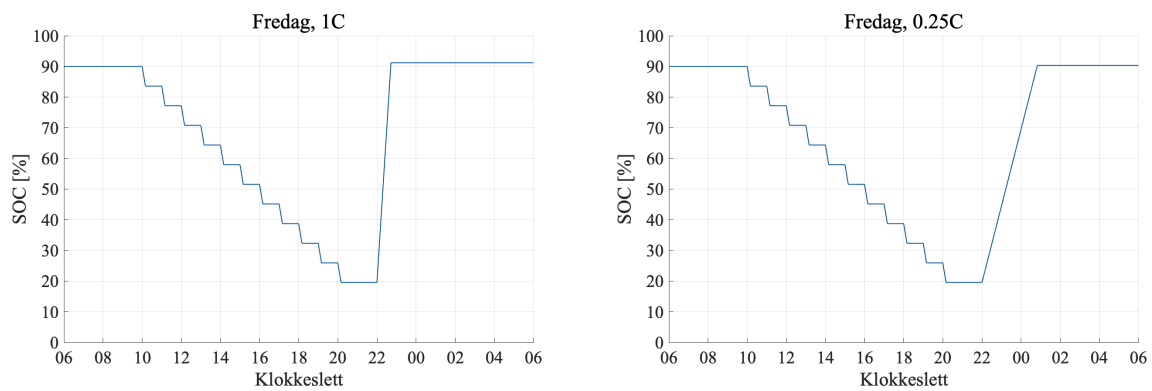
Batteriet vil lades opp ved tidspunkt når behovet på nettet er lavt og lades ut når den bølge-genererende maskinen driftes. For å kartlegge optimale ladetidspunkt er det benyttet data fra oppdragsgiver for effektforbruket på Brattøra. For at oppladningen av batteriet skal inntreffe på tidspunkt når belastningen er lav, defineres en begrensning på 30 kWh/min for maksimal belastning på nettet ved opplading i hverdagene. Data for Brattøras effektforbruk viser at belastningen på nettet for helgedager er generelt lavere enn ukedager, som vist i figur 3.5 i kapittel 3.2. Dette ga grunnlag for å sette en lavere begrensning for helgedager lik 28 kWh/min. Begrensningene er bestemt på bakgrunn av forbruket på Brattøra for 5. - 7. mars, og er basert på en verdi som er høyere enn nødvendig for fullstendig opplading. Trenden for de utvalgte dagene samsvarer med de resterende ukedagene fra 2. - 8. mars, og er dermed svært representativ for uken. Dette vil ikke være representativt for et helt år. Virkningen av dette diskuteres i kapittel 8.3.

Antall drifter den bølge-genererende maskinen har i løpet av en dag avhenger av Pirbadets åpningstider. Disse er presentert i tabell A.1. Antall drifter avgjør batteriets SoC ved slutten av dagen, og dermed batteriets oppladingsbehov. Det antas at første drift igangsettes én time etter åpning og siste drift én time før stenging. Grunnet tidlige åpningstider for mandager, onsdager og fredager igangsettes første drift 3,5 timer etter åpning. Med denne antakelsen driftes bølgemaskinen 11 ganger på mandager, onsdager og fredager, og åtte ganger de resterende dagene i uken.

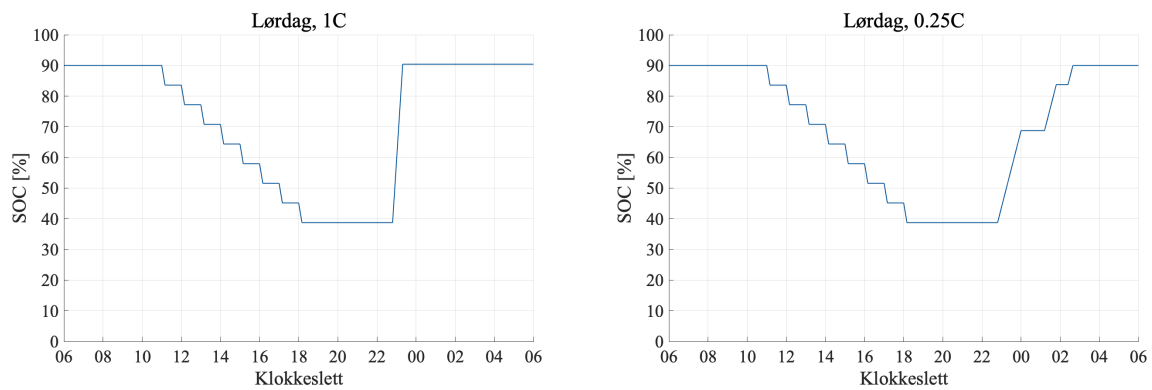
Det er dermed valgt å simulere batteriets opp- og utladningsmønster for tre dager med ulik åpningstid, herunder torsdag, fredag og lørdag. Videre er det for hver av dagene simulert to ulike driftstilfeller for å illustrere C-ratens påvirkning på oppladingstid. Simuleringene er vist som forenklede flytskjema i vedlegg D.2. SoC-kurver for de tre ulike driftsmønstrene for opp- og utlading av batteriet vises i figur 6.8, 6.9 og 6.10. Figur 6.10 utmerker seg i forhold til figur 6.8 og figur 6.9, da oppladningen er inndelt i tre intervaller. Dette er en konsekvens av belastningsbegrensningen. Ved åtte drifter på torsdager og helgedager, er SoC på slutten av dagene 39% og batteriet vil ikke være fullt utladet. Dette kommer frem i figur 6.8 og figur 6.10. Dermed har batteriet ledig kapasitet til tre ekstra driftsintervall som kan disponeres som ønskelig gjennom åpningstiden, dersom pågangen er stor.



Figur 6.8: SoC-kurver for torsdag. Batteriet opplades kontinuerlig på 35 minutter ved 1C, og kontinuerlig på 138 minutter ved 0,25C.

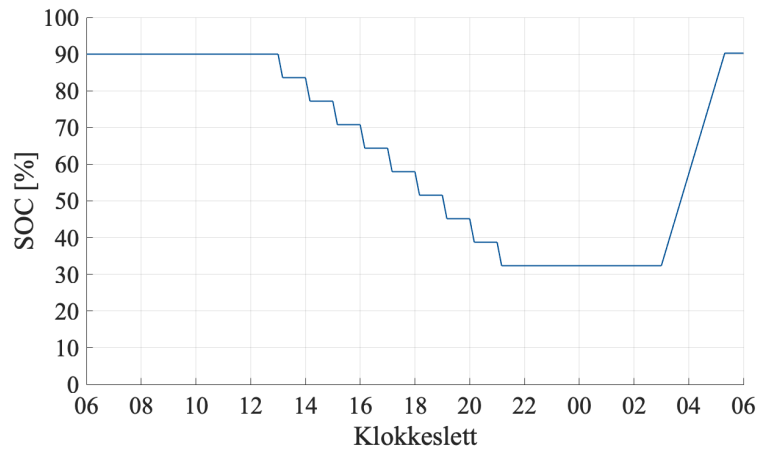


Figur 6.9: SoC-kurver for fredag. Batteriet opplades kontinuerlig på 42 minutter ved 1C, og kontinuerlig på 168 minutter ved 0,25C.



Figur 6.10: SoC-kurver for lørdag. Batteriet opplades kontinuerlig på 31 minutter ved 1C, og over tre ladeperioder på totalt 123 minutter for 0,25C.

For å sikre fullstendig oppladning i løpet av natten ble en nødladingsfunksjon implementert. Funksjonen kan overstyre systemet dersom tre timer gjenstår av oppladingsvinduet og batteriet ikke er fullstendig oppladet. Figur 6.11 viser dette tilfellet basert på 11 drifter. Her er maksimal belastning på nettet for oppladning begrenset til 25 kWh/min. Ettersom belastningen på nettet ikke understeg den maksimale begrensningen, ble nødlading automatisk iverksatt kl. 03:00.



Figur 6.11: SoC-kurve for normal utlading og opplading i form av nødlading.

6.5 Økonomi

For å avgjøre om bruk av bassengovertrekk og batteri vil være lønnsomme investeringer per i dag, har det blitt foretatt beregninger med nåverdimetoden. Nåverdimetoden defineres i likning 6.1, hvor CF_t uttrykker innbetalingsoverskuddet i år t , og CF_0 uttrykker investeringsutgiften. Videre definerer t levetiden til investeringen og i definerer avkastningskravet. Sistnevnte parameter er fastsatt til 4%, et avkastningskrav anbefalt av NVE [74]. Lønnsom investering indikeres ved positiv nåverdi.

$$NV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - CF_0 \quad (6.1)$$

7 Resultat

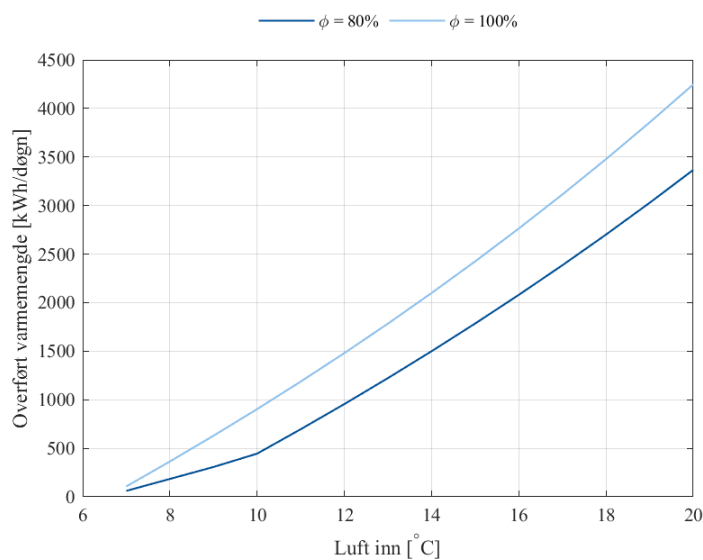
Dette kapittelet er tredelt, hvor hvert underkapittel presenterer resultatene fra simulering av kjølebatteriet, beregning av redusert fordampningstap og analyse av laststyring ved bruk batteri. Alle programmene beskrevet i kapittel 1.7 er benyttet for å oppnå og presentere resultatene på best mulig måte. Alle verdier og delresultater som er nødvendige for sluttresultatet er gitt i vedlegg.

7.1 Reduksjon av fjernvarmeforbruk

Resultatene fra simulering av kjølebatteriet og reduksjon i varmetap fra fordampning har en sterk sammenheng, da begge fører til reduksjon i fjernvarmeforbruk. I kapittel 7.1.1 og 7.1.2 vil resultatene fra henholdsvis overført varmemengde i kjølebatteriet og reduksjon i varmetap presenteres. Avslutningsvis vil resultatene presenteres som en samlet reduksjon i fjernvarmeforbruk i kapittel 7.1.3.

7.1.1 Kjølebatteri

Resultatet for overført varmemengde som funksjon av luft-temperatur og relativ fuktighet fra simuleringen i Aspen HYSYS, er vist i figur 7.1. Simuleringen er utført med en volumstrøm lik $24\,654\text{ m}^3/\text{h}$ for $\phi = 80\%$ og $\phi = 100\%$.



Figur 7.1: Overført varmemengde fra luft til isvann ved varierende lufttemperatur.

Det ble foretatt en øyeblikksmåling i ventilasjonsanleggets avkastkanal, hvor resultatet viste $12^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. Som vist i vedlegg B.1 er dette temperaturen kjølebatteriet er dimensjonert for. Beparelser i fjernvarmeforbruk er vist i tabell 7.1. På bakgrunn av antakelsen om mettet vanddamp i kjølebatteriets inn-luft, vil resultatet fra overført varmemengde ved $\phi = 100\%$ benyttes videre.

Tabell 7.1: Energibesparelse for 12 °C og ulik relativ fuktighet.

ϕ	Besparelse
80%	955,4 kWh/døgn
100%	1480 kWh/døgn

7.1.2 Fordampningstap

Fordampningsmassestrøm fra de valgte bassengene ved $\phi = 64,3\%$ og $\phi = 80\%$ tilsvarer gjennomsnittet av resultatene fra likningene vist i tabell 5.2. Gjennomsnittlig varmetap og fordampningsmassestrøm er vist i tabell 7.2.

Tabell 7.2: Fordampningsvarmetap fra idrettsbasseng, bølgebasseng og boblebad.

Bassengtype	Areal [m^2]	Temperatur [$^{\circ}C$]	ϕ	Fordampning [kg/h]	Varmetap [kW]
Idrettsbasseng	1082	27	80%	21,75	14,72
			64,3%	59,94	40,58
Bølgebasseng	288	31	80%	23,96	16,16
			64,3%	36,98	24,94
Boblebad	3 stk. à 4,91	38	80%	3,80	2,55
			64,3%	4,56	3,06

Tabell 7.3 viser årlig energitap fra bassengene, samt besparelse og lønnsomhet ved investering i bassengovertrekk. Beregningene er basert på antakelse om at badet er åpent 365 dager i året. I tillegg antas det også at idrettsbassenget kan tildekkes i gjennomsnitt 8,29 timer per døgn, mens bølgebasseng og boblebad kan benytte overtrekk i gjennomsnitt 11,36 timer i døgnet. Prisen på fjernvarme er oppgitt av teknisk driftsansvarlig på Pirbadet til 70 øre/kWh, og det antas at varmetap kan reduseres med 50% ved bruk av overtrekk. Overtrekkenes levetid er oppgitt av leverandør til 10 år.

Tabell 7.3: Energitap, besparelse og nåverdi ved investering i overtrekk.

Bassengtype	ϕ	Energitap [kWh/år]	Kostnad energitap [kr/år]	Investeringskostnad [kr]	Nåverdi
Idrettsbasseng	80%	44 396	31 077	1500 000	-1 373 968
	64,3%	122 389	85 673		-1 152 560
Bølgebasseng	80%	66 822	46 776	400 000	-260 305
	64,3%	103 128	72 190		-157 239
Boblebad	80%	10 544	7 381	3stk. · 8 000	5932
	64,3%	12 653	8 857		11 920

Dersom alle de valgte bassengene dekkes til utenom brukstid, er det mulig å spare totalt 106,04 kWh/dag ved 80% luftfuktighet. Dette vil utgjøre 0,71% av det totale dagsforbruket av fjernvarme. Dersom luftfuktigheten derimot er 64,3% vil reduksjonen være 326,26 kWh/døgn og utgjøre 2,19% av totalt fjernvarmeforbruk.

Som vist i tabell 7.3, er bruk av bassengovertrekk til boblebadene den eneste økonomisk lønnsomme investeringen. Figur 7.4 viser fjernvarmereduksjon og kostnadsbesparelse for overtrekk av boblebad.

Tabell 7.4: Besparelse ved bruk av overtrekk på boblebad

ϕ	Fjernvarmereduksjon [kWh/år]	Kostnadsbesparelse [kr/år]
64,3%	6326	4427
80%	5272	3690

7.1.3 Total reduksjon i fjernvarmeforbuk

I dette delkapittelet presenteres resultatene fra kapittel 7.1.1 og 7.1.2 som en samlet prosentvis reduksjon av fjernvarmeforbruk for hver kvartil og relativ luftfuktighet, basert på tabell 3.1. Det forutsettes at boblebadene er de eneste bassengene som bidrar til redusert fjernvarmeforbruk ettersom bassengovertrekk til boblebadene er den eneste lønnsomme investeringen. Videre er overført varmemengde for en luft-temperatur på 12°C og $\phi = 100\%$ benyttet, da dette er den antatte relative luftfuktigheten ved den eneste temperaturmålingen i ventilasjonssystemets avkastkanal. Total prosentvis reduksjon i fjernvarmeforbruk er vist i tabell 7.5.

Total fjernvarmereduksjon for luftfuktighet $\phi = 64,3\%$: 1494 kWh/døgn

Total fjernvarmereduksjon for luftfuktighet $\phi = 80\%$: 1497 kWh/døgn

Tabell 7.5: Prosentvis reduksjon i fjernvarmeforbruk.

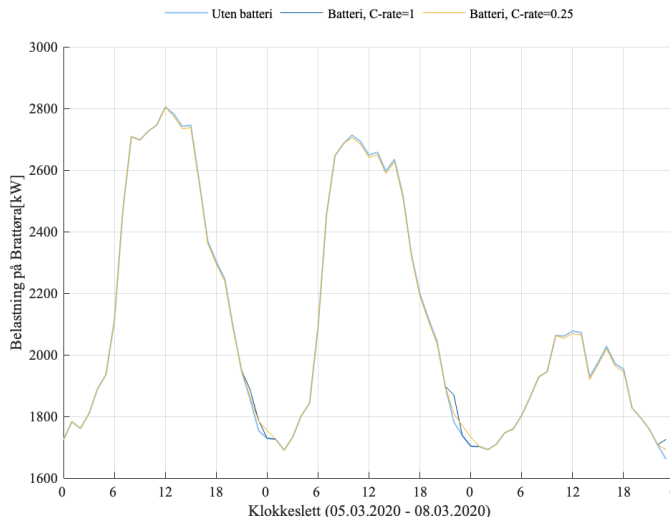
Kvartil	ϕ [%]	Prosentvis reduksjon i fjernvarmeforbruk per døgn [%]
Q_1	80	8,72
	64,3	8,74
Q_2	80	12,84
	64,3	12,86
Q_3	80	13,19
	64,3	13,22
Q_4	80	8,33
	64,3	8,35

7.2 Batteri

Dette underkapittelet viser resultatene fra simuleringer knyttet til batteridrevet drift av den bølge-genererende maskinen. Batteriet er dimensjonert for 312,7 Ah, som tilsvarer en energikapasitet på 124,9 kWh. Resultatene fra simuleringen er vist for et tidsintervall fra 5. - 8. mars, og gjenspeiler de tre ulike driftsmønstrene for den bølge-genererende maskinen.

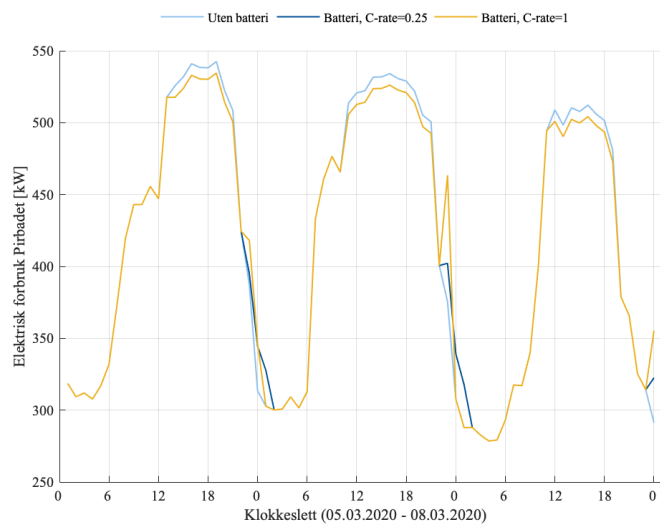
De ulike oppladingshastighetene resulterte i endret oppladingsmønster. Dette førte videre til en endring av det elektriske forbruksmønsteret til Pirbadet og belastningen på det lokale nettet. Figur 7.3 og 7.2 sammenligner dagens tilfelle uten batteri med implementeringen av batteri for henholdsvis Pirbadet og Brattøra.

Figurene viser identisk elektrisitetsforbruk for alle driftstilfeller inntil første drift av den bølge-genererende maskinen. For kurven som viser dagens driftstilfelle uten batteri, vil driften kreve elektrisk energi direkte fra nettet. For tilfellene med batteri, vil elektrisitetsforbruket i tidsintervallet reduseres. Videre vil kurvenes differanse tydeliggjøres kl. 22:00, når opplading er programmert til å begynne. Dette forutsetter at belastningsbegrensningen ikke overstiges. Batteriet vil ha lengre oppladingstid ved C-rate på 0,25C, men vil til gjengjeld kreve mindre effekt per tidsenhet sammenlignet med opplading ved C-rate på 1C. Slik som vist i figur 7.2, er det tydelig at batteridrift resulterer i minimal reduksjon i total belastning på det lokale nettet på Brattøra.



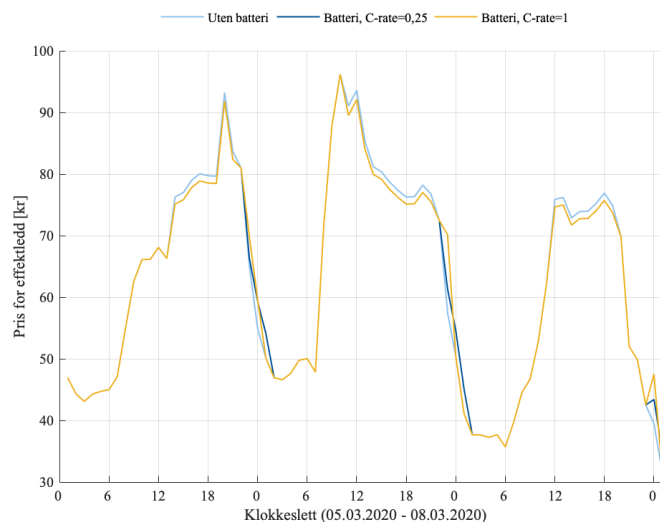
Figur 7.2: Endring i belastningen på det lokale nettet for batteri av ulik C-rate for opplading.

Effekten av laststyringen tydeliggjøres i figur 7.3 hvor Pirbadets elektriske forbruk, både med og uten batteri, fremstilles grafisk.



Figur 7.3: Endring i det elektriske forbruksmønsteret for Pirbadet med batteri av ulik C-rate for opplading.

Dersom Pirbadet investerer i batteri, vil kostnad tilknyttet effektledet endres. Kostnadsendringen for effektledet er vist i figur 7.4. Bruk av batteri med C-rate på 1C gir en besparelse på 2,98 kr for effektledet i perioden 5. - 8. mars. For et batteri med en C-rate på 0,25C er besparelsen beregnet til 3,97 kr for samme periode.



Figur 7.4: Endring i kostnad tilknyttet effektledet for ulike driftstilfeller med og uten batteri.

Data for det elektriske forbruket på Pirbadet gjennom 2019, ble benyttet til å beregne besparelse for et helt år. Resultatet er presentert i tabell D.1 i vedlegg som besparelse per uke i hver måned. For et batteri med 1C vil den årlige besparelsen være 698,6 kr, og for et batteri med 0,25C vil besparelsen være 2071,1 kr per år dersom det antas fire uker i hver måned.

For å avgjøre om implementering av batteri er en lønnsom investering per i dag, er det foretatt en økonomisk analyse med nåverdimetoden. Beregningen er utført for begge simulerte C-rater. Basert på litteratur som omhandler aldring av batterier i kapittel 4.4.1, er det beregnet levetid for batteriet vist i tabell 7.6. Med bakgrunn i antatt investeringskostnad per kWh, gitt i tabell 6.4.1, vil batteriet koste 899 401,7 kr ved investering. Slik vist i tabellen er begge nåverdiene negative. Dette indikerer at investeringen av batteri ikke er lønnsom.

Tabell 7.6: Nåverdi for NMC batteri med C-rate lik 1C og 0,25C

C-rate	Levetid [år]	Nåverdi [kr]
1C	8	-895 698
0,25C	10	-882 603

8 Diskusjon

Dette kapittelet tar for seg diskusjon av resultatene fra de ulike analysene og simuleringene. Først diskuteres resultatene fra simulering av kjølebatteriet i Aspen HYSYS. Deretter diskuteres reduksjon av fordampningstap og tiltakets lønnsomhet. Videre diskuteres batteriets funksjonalitet og innvirkning på Pirbadets og Brattøras lastprofil. Avslutningsvis diskuteres fokusområdene helhetlig i et perspektiv av energieffektivitet og fleksibilitet.

Forbruksdata for Pirbadet er hentet fra *Optima Entro*. Data i dette programmet loggføres med timesoppløsning. For simulering av batteri til drift av den bølge-genererende maskinen er det nødvendig med mer detaljert oppløsning, ettersom maskinen driftes i 10-minutters intervall. Det er i dette prosjektet dermed valgt å utvide til minuttsopløsning ved å dividere hver måling med antall minutter per måling. Det antas derfor likt minuttforbruk i en hel time. Dette vil høyst sannsynlig ikke være tilfelle i en reell situasjon. De plottede forbruksdataene vil derfor avvike fra realiteten ved stabilt forbruk i hver hele time. Tilsvarende antakelse er også gjort for Brattøra sitt forbruk, da forbruksdata er loggført i 36-minutters intervall. Endring av forbruksdata vil også påvirke den utførte kostnadsanalysen da denne er dirkete avhengig av minuttforbruket. Simulering ved korrekte minuttmålinger vil gi endring på minuttbasis, mens timesgjennomsnittet ikke vil bli påvirket.

8.1 Kjølebatteri

Som tidligere beskrevet mistenkes en relativ luftfuktighet i storhallen på 80%. Dette er omtrent 15% høyere enn anbefalt grense for svømmeanlegg i vinterhalvåret, og omtrent 25-30% høyere enn anbefalt i sommerhalvåret. Dette gir videre mistanke om at ventilasjons- og avfuktningssystemene ikke opererer optimalt, til tross for installasjon av luftdyser i taket. Basert på dette bør ikke sett-verdiene til aggregatene justeres for å redusere forbruk, men derimot justeres slik at avtrekks- og tilluftsmengden øker. Dette vil bidra til en forbedret termisk komfort som også er tryggere for bygningskonstruksjonen. Dersom sett-verdiene justeres for å redusere forbruket, kan det gå på bekostning av bygningskonstruksjon og hensyn til kunder.

Som tidligere beskrevet ble Aspen HYSYS benyttet for simulering av kjølebatteriet. Som vist i figur 6.2 under kapittel 6, simuleres kjølebatteriet som et system av en varmeveksler og separator. Det dimensjonerte kjølebatteriet fra vedlegg B.1 er designet med et antall finner og rørrekker for å øke varmeoverføringen. Dette var svært krevende å implementere i den simulerte modellen, da Aspen HYSYS kun opererer med U-rørsvekslere og ikke kryssvekslere. Dette medfører at kjølebatteriets geometri for økt varmeoverføring ikke er tilstrekkelig representert i modellen. Konsekvensen av dette er at overført varmemengde kan tenkes å være noe større enn hva resultatet antyder.

Videre er det antatt rent vann som kjølemedie i simuleringen av kjølebatteriet, da dette også er benyttet som et dimensjonerende kriterie av leverandør. Dette til tross for at isvannet som skal sirkulere i kjølebatteriet består av 50% glykol og 50% vann. Ettersom glykol har lavere varmekapasitet enn rent vann, vil isvannets evne til å ta opp varmeenergi reduseres. Det kan derfor være nødvendig å øke isvannets massestrøm for å oppnå den samme overførte varmemengden som ville blitt overført, dersom kjølemediet bestod av rent vann. Dette begrunnes ved den overførte varmemengdens direkte avhengighet av spesifikk varmekapasitet og massestrøm, vist i likning 5.10.

I tillegg kan det mistenkes at kjølebatteriet er underdimensjonert med hensyn på den relative luftfuktigheten, da kjølebatteriet er dimensjonert for $\phi = 80\%$. Avtrekksluften går først gjennom platevarmeveksleren i ventilasjonsaggregatet, videre gjennom den integrerte varmepumpens fordampere, og til slutt kjølebatteriet i avkastkanalen. I henhold til litteratur omtalt i kapittel 5.1.2, vil gjenværende vanddamp i fuktig luft etter nedkjøling til under duggpunktstemperatur være tilnærmet mettet med $\phi = 100\%$. Dette vil da være luftens relative fuktighet inn på kjølebatteriet. Resultatet fra det psykometriske diagrammet vist i vedlegg E.1, støtter antakelsen om $\phi = 100\%$ i avkastluften med de gitte forutsetningene. Hvorvidt denne antakelsen er gjeldende for hele året avhenger sterkt av temperatur og relativ fuktighet på både innendørs og utendørs luft.

Vinterhalvåret er preget av lave lufttemperaturer med lavt fuktinnhold i forhold til innendørs luft, noe som gir økt avfuktingskapasitet. Dersom inneluftens reelle relative luftfuktighet er 80%, vil høyst sannsynlig avkastluften være mettet etter avfukting. Dette vil sannsynligvis også være tilfellet dersom inneluftens relative fuktighet er på anbefalt nivå for vinterhalvåret, selv om den da er 20% - 25% lavere enn den reelle relative fuktigheten. Under sommerhalvåret vil uteluften ha høyere temperatur og fuktinnhold. Følgelig vil avfuktingskapasiteten være lavere i sommerhalvåret sammenlignet med vinterhalvåret. Avtrekksluften avgir dermed mindre varme til friskluften. Ettersom kjøleteknisk avfukting normalt ikke benyttes ved høyere utetemperaturer, kan det være sannsynlig at luften har en relativ fuktighet som er lavere enn 100% ved kjølebatteriets inngang. Hvor stor luftfuktigheten faktisk vil være er vanskelig å estimere, da det er et ulineært forhold mellom lufttemperatur og luftens evne til å ta opp fukt.

Som vist i figur 7.1, har luften større potensiale for varmeoverføring ved større relativ fuktighet på grunn av økt innhold av latent varmeenergi. Fra figur 7.1 kommer det også tydelig fram at den latente varmeenergien er avgjørende for varmeoverføringen, da kurven for overført varme ved $\phi = 100\%$ stiger raskere enn kurven for $\phi = 80\%$ inntil kondenseringsprosessen tiltrer. Som tidligere diskutert reduseres avfuktingskapasiteten under sommerhalvåret og avtrekksluften avgir mindre varmeenergi til friskluften. Det kan derfor betraktes som usannsynlig at lufttemperaturen inn på kjølebatteriet vil være så lav at kondenseringsprosessen ikke tiltrer.

Volumstrømmen av luft i avkastkanalen er kun beregnet for normal friskluftsdrift, som utgjør ventilasjonssystemets driftsmodus i gjennomsnitt 14,8 timer per dag. De resterende 9,2 timene driftes ventilasjonssystemet varierende mellom redusert friskluftsdrift og omluftsdrift. I omluftsdrift har avkastspjeldet en spjeldåpning som er så liten at varmeoverføringen til kjølebatteriet anses som neglisjerbar. I redusert friskluftsdrift kan det, basert på analyse av spjeldåpninger, være stor nok volumstrøm i avkastkanalen til å få merkbar varmeoverføring.

På grunn av manglende målinger er denne parameteren ukjent. Det er derfor forventet at overført varmemengde vil være noe større enn resultatet antyder. Likevel antas det at differansen ikke vil utgjøre betydelig forskjell, basert på antall driftstimer i redusert friskluftsdrift.

Som beskrevet i kapittel 6.2, må to varmpumper operere i parallell for å overføre varmeenergien fra kjølebatteriet til varmeanlegget. For Pirbadets del må det derfor drøftes hvorvidt økonomisk besparelse fra redusert forbruk av fjernvarme, vil overgå den økonomiske kostnaden for drift av varmpumpene. Fra +CityxChange sitt perspektiv er det positivt at Pirbadet øker sin energieffektivitet, til tross for økt elektrisk forbruk og belastning på nettet. Hvor stor innvirkning dette vil ha på det lokale nettet er usikkert, da varmpumpene ikke er installert og ikke har et fastsatt driftsmønster. Likevel er det rimelig å anta at varmpumpene vil være i mer eller mindre kontinuerlig drift i løpet av åpningstiden. Bakgrunnen for dette er Pirbadets kontinuerlige behov for oppvarming av rom og bassengvann fra ventilasjonssystem og fjernvarme. Som tidligere nevnt driftes ventilasjonssystemet i normal friskluftsdrift i gjennomsnitt 14,8 timer per dag. For maksimal utnyttelse av kjølebatteriet og restenergien i avkastluften, må derfor varmpumpene driftes i minst samme intervall. Dette vil medføre økt belastning på nettet gjennom ventilasjonssystemets driftstid i normal friskluftsdrift, som hovedsakelig er innenfor Pirbadets åpningstider når behovet på nettet allerede er stort.

8.2 Fordampningstap

Varmetap som følge av fordampning fra de utvalgte bassengene har blitt beregnet for $\phi = 80\%$ og $\phi = 64,3\%$. Dersom den reelle luftfuktigheten i hallen er 80% , vil fordampningstapet være svært lavt og bassengovertrekk vil gi minimal reduksjon i fjernvarmeforbruk. Som tidligere beskrevet er $\phi = 80\%$ svært høyt, og langt over normal standard. Dersom tiltak innføres for å redusere luftfuktigheten til anbefalt nivå, vil varmetapet fra fordampning øke betraktelig i henhold til resultatene vist i kapittel 7.1.2. I dette tilfellet kan bruk av bassengovertrekk være gunstig for både bygningskonstruksjonen og inneklimate, da dette vil føre til ytterligere reduksjon av luftens fuktinnhold.

I henhold til figur 6.7 vil boblebadene ha størst varmetap per kvadratmeter på grunn av høy vanntemperatur. Dette er likevel bassengene med minst varmetap, da overflatearealene er svært små i forhold til idretts- og bølgebassengets overflateareal. Temperaturen i idretts- og bølgebassenget er 2°C lavere enn romtemperaturen slik at varmetap per m^2 fra fordampning er, som forventet, svært lite. Til tross for dette fører størrelsen til at idrettsbassenget utgjør

det største tapet av de undersøkte bassengene. Selv om idrettsbassenget har det største fordampningsvarmetapet, er tildekking av dette bassenget den minst lønnsomme investeringen.

Som vist i tabell 7.3, er tildekking av boblebadene den eneste lønnsomme investeringen basert på nåverdi-metoden. Ved å sammenlikne investeringskostnadene er det tydelig at kostnaden av bassengovertrekkene til boblebadene er svært lave, noe som gjør overtrekkene til en lønnsom investering til tross for lavt varmetap. Overtrekkene til bølge- og idrettsbassenget vil kreve opprullingsystemer på grunn av bassengenes størrelse, som mest sannsynlig er årsaken til de høye investeringskostnadene. Ved slike investeringer må det også tas hensyn til det korrosive miljøet i storhallen. Selv om overtrekkets levetid er oppgitt til 10 år, kan det tenkes at det mekaniske opprullingsystemet vil kreve vedlikehold eller utskifting grunnet slitasje før endt levetid. Det forventes derfor at tilleggskostnader vil påløpe, som reduserer investeringens lønnsomhet ytterligere.

Som et alternativ, er det sannsynlig at analyse av velværebassenget vil avsløre et betydelig større varmetap fra fordampning, da vanntemperaturen er opptil 5°C høyere enn luft-temperaturen og overflatearealet er betydelig større enn boblebadenes overflateareal. Likevel antas det å ikke være en økonomisk lønnsom investering på grunn av bassengets struktur og form, som vil gjøre det være svært krevende å benytte bassengovertrekk for fullstendig dekking. Til tross for dette kan lønnsomheten vurderes i forhold til eventuelle utbedringer i bygningskonstruksjonen, da det mistenkes at den høye luftfuktigheten og damptrykket allerede har medført fuktskader i bygningsmaterialet.

I tillegg til å redusere påkjenningen på bygningskonstruksjonen, vil redusert fuktinnhold i luften begrense belastningen på ventilasjons- og avfuktningsaggregatene. Som tidligere beskrevet, vil det ikke være gunstig å justere sett-verdier på ventilasjons- og avfuktningsaggregatene for å redusere elektrisk forbruk på dagtid. Derimot kan det elektriske forbruket reduseres i tidsintervallet der overtrekket benyttes, som kun vil være utenom Pirbadets åpningstider. I dette tidsintervallet er det potensiale for ytterlige energibesparelser. Analyse av ventilasjonsaggregatenes spjeldåpninger avdekket et usammenhengende driftsmønster i løpet av natten, bestående av korte tidsintervall for hver driftsmodus. Dersom fordampningstapet reduseres kan aggregatene driftes i omluftdrift i større tidsintervall, noe som reduserer elektrisitetsforbruket i viftene da denne driftsmodusen opererer med lavere avtrekks- og tilluftsmengder.

Ettersom bassengovertrekk reduserer fordampet massestrøm, vil følgelig behovet for vanntilførsel reduseres de timene overtrekket benyttes. Dette medfører redusert belastning på pumpene, og dermed lavere elektrisk forbruk. Vannpumpene tilknyttet de analyserte bassengene har ikke et kartlagt forbruk, og eventuell reduksjon vil derfor være vanskelig å estimere. Likevel antas det at redusert forbruk som følge av redusert fordampningstap, vil utgjøre minimal differanse i Pirbadets totale elektriske forbruk tilknyttet vannpumpene.

8.3 Batteri

Batteriet er dimensjonert til å utlades og opplades over 24 timer, i henhold til den bølgegenererende maskinens 11 drifter. En alternativ løsning er å benytte et mindre batteri som opplades mellom hver drift. Et slikt batteri vil kreve en batterikapasitet som er mye lavere enn det simulerte batteriet, men vil til gjengjeld kreve en utladingshastighet som NMC batteri ikke er egnet for. Det vil derfor være nødvendig å benytte en annen batteritype med flere antall ladesyklus, da bruk av NMC batteri vil medføre flere utskiftninger per år ved et slikt driftsmønster. For at dette skal kunne vurderes som et lønnsomt alternativ, er det forutsatt opplading av batteriet benytter elektrisk energi fra lokal fornybar kraftproduksjon. Dette kan være mulig dersom Pirbadet har mulighet til å kjøpe billig overskuddskraft fra Powerhouse eller annen lokal fornybar kraftproduksjon.

Som beskrevet i kapittel 2, kan pluss-kunder selge effekt opp til 100 kW. Produksjon over 100 kW må strupes. Mengden effekt som kan selges fra Powerhouse strider derfor med energilovforskriften. Det er derimot utarbeidet en femårig midlertidig avtale mellom Powerhouse og NVE, som tillater salg av effekt over 100 kW. Med dette som bakgrunn er det mulig for Pirbadet å kjøpe overskuddsstrøm fra Powerhouse, slik at et mindre batteri kan vurderes. Slik som situasjonen er i dag, mottar ikke Pirbadet overskuddsstrøm fra Powerhouse direkte. Inntil dette muliggjøres, vurderes døgnopplading av batteriet som en gunstig løsning.

Det simulerte batteriet er programmert for å operere med et SoC-intervall fra 20-90%. Dette gir en DoD på 70% basert på anbefalte maksimalverdier. Dersom et batteri dimensjoneres med en lavere DoD enn 70%, vil dette redusere oppladningens påkjenning på batteriet og følgelig gi lengre levetid. Til gjengjeld krever dette betydelig større batterikapasitet, som også krever høyere investeringskostnad. Det er usikkert om den økte investeringskostnaden ved økt batterikapasitet vil overstige kostnad for utskiftning av batteri med lavere kapasitet. Likevel vurderes maksimering av SoC-intervall som en akseptabel løsning, selv om dette kan ha negativ innvirkning på batteriets levetid. Nedskalering av DoD er ikke analysert i dette prosjektet, og bør analyseres for vurdering av lønnsomhet dersom tiltaket skal innføres.

Slik som vist i figur 7.2, vil effekttoppproduksjonen være lik for C-rater på 1C og 0,25C. Dette illustreres ved at kurvene overlapper på effekttoppene gjennom uken. Forskjellige C-rater vil derimot påvirke batteriets oppladingshastighet. En høyere C-rate vil gi kortere oppladingstid, og dermed trekke større mengde effekt fra nettet. Dersom batteriet lades opp med en C-rate på 0,25C vil oppladingsperioden gå over et lengre tidsintervall, og fordele forbruket over tid. Ettersom et fleksibilitetsmarked vil kreve flere energilagringseenheter, er det hensiktsmessig å fordele opplading over tid. Dersom flere batterier dimensjoneres for hurtig opplading når forbruket er lavt, øker risiko for dannelse av ny effekttopp på natten.

Begrensningene som er valgt for opplading baseres på belastning på nettet kun for en uke i mars, og vil ikke være representative for et helt år. Ettersom belastningen på nett varierer med sesongene, vil det derfor være nødvendig å implementere begrensinger som samsvarer med den aktuelle lastprofilen. Om belastningsbegrensning er en gunstig måte å styre opplading av batteri på, vil avhenge av muligheten for å estimere effektforbruk ved Brattøra frem i tid. Effektforbruket vil styres av en rekke faktorer som vil være vanskelige å forutsi, spesielt med økt mengde integrert uregulerbar kraftproduksjon.

Dersom belastningsbegrensningen forhindrer batteriet fra full opplading, er batteriet programmert for å nødlade til SoC = 90%. Tidspunkt for nødlading er definert fra kl. 03.00 - 06.00 for å sikre fulloppladet batteri ved bølgemaskinens første drift, uten å risikere opplading etter kl. 06.00 da belastningen på nettet stiger. Nødlading tar ikke hensyn til nettbelastning, og er derfor fordelaktig å unngå. For et batteri med C-rate på 1C vil det være mulig å redusere nødladingsintervallet. Dette tillater oppladingsperioden å reguleres etter belastning på nettet i et lengre tidsintervall, noe som vil være gunstig for nettbelastningen.

Som vist i figur 7.2 utgjør den bølge-genererende maskinen en svært liten del av Brattøras totale forbruk. Dette medfører at differansen i belastning på nett, som følge av forskjellige C-rater, vil være svært liten forutsatt opplading på natten. Forskjellen i C-rate vil påvirke Pirbadets forbruk i større grad enn Brattøras totale forbruk, slik som vist i figur 7.3. Begge figurene uttrykker en effekttoppreduksjon som er minimal i forhold til totalt forbruk. Dersom effekten av laststyring ved bruk av batteri skal tydeliggjøres, må laststyring benyttes for laster med betydelig større forbruk. Majoriteten av lastene på våt sone er reduserbare laster som ikke egnest for laststyring, da disse lastene har et jevnt forbruksmønster. I motsetning til reduserbare laster, har den bølge-genererende maskinen et syklisk forbruksmønster med effekttopper i korte tidsintervall. Disse forekommer innenfor Pirbadets åpningstid når behovet på nettet også er høyt. På bakgrunn av dette vurderes den bølge-genererende maskinen som den best egnede lasten for laststyring, til tross for lavt forbruk. Dersom laststyring skal være økonomisk gunstig, er det nødvendig å innføre økonomisk stønad som vil gjøre det lønnsomt å delta i fleksibilitetsmarkedet.

Innbetalingsoverskuddet fra redusert belastning på dag og økt belastning på natt, vil variere gjennom året, slik som vist i tabell 4.1. Overskuddet avhenger sterkt av endringer i strømpriser på nettet. Som avdekket utgjør ikke batteridrift av den bølge-genererende maskinen tilstrekkelig reduksjon for å operere med lavere effekttariff, som hos Pirbadet styres etter timesbasert gjennomsnitt. Dersom dette skal være mulig å oppnå, er Pirbadet avhengig av å redusere eller flytte annet elektrisk forbruk. En annen mulighet kan også være å operere med en effekttariff som styres i henhold til høyeste effekttopp, eller et redusert gjennomsnittlig tidsintervall.

8.4 Helhetlig vurdering

Som vist i tabell 1.1, har flere av Pirbadets laster blitt analysert for å kartlegge forbruksmønsteret. De fleste lastene er tilknyttet våt sone, som også utgjør majoriteten av Pirbadets forbruk. Likevel har svært få laster tilknyttet tørr sone blitt analysert. Som tidligere beskrevet består tørr sone av blant annet resepsjon, kjøkken, kontorer og treningssenter, og vil derfor ha en lastprofil som er ulik lastprofilen fra våt sone på grunn av ulike åpningstider og forbruksmønster. Samlet vil disse områdene utgjøre en betydelig del av Pirbadets totale forbruk.

Skal Pirbadet ha mulighet til å delta aktivt i et fleksibilitetsmarked, gjenstår kartleggingsarbeid av effektforbruk og forbruksmønster, spesielt i tørr sone. Høyst sannsynlig vil dette også kreve ytterligere energieffektiviserende tiltak, ettersom Pirbadet er et svært energikrevende bygg. Dersom forbruket på tørr og våt sone kartlegges fullstendig, kan dette avsløre andre muligheter for reduksjon eller laststyring som hverken er oppdaget i dette prosjektet eller tidligere arbeid.

Innenfor tørr sone er blant annet treningssenter, kjøkken og kontorarealer områder som ikke har et kartlagt forbruk. Treningssenteret er svært avhengig av å stille med tilgjengelighet for brukere, slik at laststyring kan bli krevende å implementere. Likevel kan muligheter for eventuelle lastreduksjoner avdekkes ved nærmere analyse. En annen mulighet for lastreduksjon ligger i ventilering av kontorareal. I følge driftsansvarlig Trond Sigernes, driftes ventilasjonanleggene på alle byggets kontorarealer, til tross for at flere står ubrukte. Her kan det også være muligheter for betydelig reduksjon, da ventilasjon utgjør lasten med det største elektriske forbruket. På kjøkkenet kan det være mulighet for å benytte mer energieffektive apparater, likevel vil det være krevende å implementere laststyring på grunn av kundehensyn. I likhet med treningssenteret, er kjøkkenet dårlig merket slik at nøyaktig forbruk vil være vanskelig å estimere. Dersom flere måleenheter installeres, kan forbruket enklere kartlegges og estimeres.

Kjøp av eventuell billig overskuddskraft fra selvforsynte bygg som Powerhouse, kan utgjøre et økonomisk insentiv for Pirbadet til å øke sin fleksibilitet. Transformasjon av Pirbadet fra forbruker til prosument vil kreve flere slike økonomiske insentiver og stønader. Likevel er det tvilsomt at Pirbadet vil bli selvforsynt med elektrisk energi, basert på Ingvild Skaftuns masteroppgave. Til tross for dette kan Pirbadet bidra i form av energieffektiviserende tiltak, som også vil være viktig for deltakelse i et fleksibilitetsmarked. Herunder ligger også muligheter for energibesparelser ved utredning av Pirbadets bygningskropp.

9 Konklusjon

På bakgrunn av tidligere arbeid er det i dette prosjektet valgt å analysere mulighet for implementering av kjølebatteri i ventilasjonssystem, reduksjon av fordampning og laststyring av den bølge-genererende maskinen. Bruk av kjølebatteri vil øke byggets energieffektivitet og være økonomisk lønnsomt for Pirbadet. Tiltaket vil på den andre siden føre til økt elektrisk forbruk fra varmpumpesystemet som skal implementeres i Pirbadets varme- og kjøleanlegg. Til tross for dette vurderes tiltaket som lønnsomt fra et energiperspektiv, da det øker byggets energieffektivitet og dermed legger til rette for deltakelse i fleksibilitetsmarkedet.

Dersom fordampning skal reduseres bør det kun investeres i overtrekk til boblebadene, basert på den økonomiske analysen. Reduksjon av fordampning vil føre til redusert påkjenning på bygningskonstruksjonen og ventilasjonssystemet, som følgelig vil gi energigevinst. Simulering av batteri til drift av den bølge-genererende maskinen resulterte i liten reduksjon av Brattøras totale forbruk. Til tross for dette anses tiltaket som Pirbadets beste mulighet for laststyring, basert på tidligere arbeid og undersøkelser. Tiltaket vil ikke være økonomisk lønnsomt uten økonomiske stønader.

Ettersom Pirbadet er et service-bygg, må kundenes interesser prioriteres. På bakgrunn av dette har bygget liten brukerfleksibilitet, som diskuterte tiltak bærer preg av. Blant annet fører dette til begrenset mulighet for laststyring. Pirbadets største potensiale for tilrettelegging av fleksibilitet ligger i reduksjon av laster og ytterligere energieffektivisering. Dette kan gjøres ved blant annet å investere i bassengovertrekk til boblebadene og drifte ventilasjonsanlegget i omluftdrift større deler av natten. Likevel er det den helhetlige vurderingen av byggets forbruksmønster og dets potensielle fleksibilitet som vil avgjøre hvilken rolle Pirbadet kan ha som potensiell deltaker i fleksibilitetsmarkedet på Brattøra.

Tidligere arbeid har konkludert med at det ikke er økonomisk lønnsomt for Pirbadet å delta som prosument i et fleksibilitetsmarked. Basert på dette prosjektets resultat vil det heller ikke være lønnsomt for Pirbadet å benytte laststyring for aktiv deltakelse i markedet. Pirbadets rolle i et fleksibilitetsmarked vil eventuelt være som passiv forbruker, hvor bygget i hovedsak vil kunne bidra ved reduksjon av eget forbruk.

10 Videre arbeid

For å vurdere Pirbadets evne til deltakelse i et fleksibilitetsmarked må det foretas fullstendig kartlegging av Pirbadets laster, samt videre undersøkelse av muligheter for laststyring og lastreduksjon. Herunder er det nødvendig å installere flere effektmålere med høy oppløsning, spesielt i tørr sone. I tillegg vil det være nødvendig å undersøke Pirbadets bygningskropp for å identifisere kilder til varmetap.

Et tiltak som må undersøkes er muligheten for omlegging av elektrisk oppvarming av badstuer til fjernvarme. Det antas at dette vil redusere en betydelig andel av det elektriske forbruket på dagtid, og være et hensiktsmessig tiltak for deltakelse i et fleksibilitetsmarked.

For å estimere nøyaktig overført varmemengde i kjølebatteriet, anbefales det å installere temperaur- og relativ fuktighetsmålere i avkastkanalen. Som tidligere beskrevet mistenkes for høy relativ fuktighet i storhallen, som et resultat av dårlig sirkulasjon. For å bekrefte eller avkrefte mistanken, anbefales det å utføre en røyktest i storhallen.

Hvilken nytte de ulike tiltakene vil ha, vil avhenge av belastningen på nettet og effektforbruket til nærliggende bygg. Etersom Brattøra skal bli et fremtidig fleksibilitetsmarked, som en del av +CxC-prosjektet, vil det være nødvendig å foreta en grundig energianalyse av alle bygningene som skal inngå i markedet.

Referanser

- [1] Olje- og energidepartementet. *Verdens energibruk øker*. Apr. 2018. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/verdens-energibruk-oket/id2599737/> (sjekket 04.02.2020).
- [2] Carl Andreas Veie m.fl. *Analyse og framskriving av kraftproduksjon i Norden til 2040*. 2019. URL: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_43.pdf (sjekket 04.02.2020).
- [3] +CityxChange Context. URL: <https://cityxchange.eu/context/> (sjekket 04.02.2020).
- [4] TrønderEnergi. URL: <http://tronderenergi.no/om-tronderenergi> (sjekket 04.02.2020).
- [5] +CityxChange Partners. URL: <https://cityxchange.eu/team/> (sjekket 04.02.2020).
- [6] +CityxChange Homepage. URL: <https://cityxchange.eu/> (sjekket 04.02.2020).
- [7] Powerhouse. URL: <https://www.powerhouse.no/> (sjekket 09.05.2020).
- [8] Powerhouse Brattørkaia – the World’s Northernmost Energy-Positive Building. URL: <https://snohetta.com/projects/456-powerhouse-brattorkaia-the-worlds-northernmost-energy-positive-building> (sjekket 09.05.2020).
- [9] *Local Flexibility Markets in Smart Cities: Interactions between Positive Energy Blocks*. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2618615/Backe.pdf?sequence=6&isAllowed=y> (sjekket 07.02.2020).
- [10] Trond Bøhlerengen m.fl. *Bade- og svømmeanlegg, Håndbok 52*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 2004. (Sjekket 01.03.2020).
- [11] *Alt om oss-Pirbadet*. URL: <https://www.pirbadet.no/alt-om-oss/> (sjekket 04.02.2020).
- [12] Olje- og energidepartementet. *Strømnettet*. URL: <https://energifaktanorge.no/no/rsk-energiforsyning/kraftnett/> (sjekket 19.03.2020).
- [13] NVE. *Kraftproduksjon*. URL: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/?ref=mainmenu> (sjekket 25.02.2020).
- [14] Olje- og energidepartementet. *Strømforsyning og strømnettet*. Redaksjonellartikkel. Des. 2014. URL: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/stromnettet/stromforsyning-og-stromnettet/id2353792/> (sjekket 26.02.2020).
- [15] Hafslund Nett. *Forskjellen på strøm og nett*. URL: <https://www.hafslundnett.no/artikkel/Forskjellen-pa-strom-og-nett> (sjekket 26.02.2020).
- [16] Hafslund Strøm. *Slik fungerer strømmarkedet*. URL: https://www.hafslundstrom.no/strom/bedrift/slik_fungerer_strommarkedet/2063 (sjekket 26.02.2020).
- [17] Olje- og energidepartementet. *Kraftmarkedet og strømpris*. 2014. URL: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/stromnettet/kraftmarkedet-og-strompris/id2076000/> (sjekket 17.04.2020).

- [18] Ingvild Skaftun. *Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)*. 2019. URL: <https://ntnu.uopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2625678/no.ntnu%5C%3Ainspera%5C%3A2523177.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (sjekket 26.02.2020).
- [19] Agder Energi Nett. *Effektmåling*. URL: <http://www.aenett.no/kundeforhold/kundebetingelser/kundebetingelser-bedriftskunde/effektmaling/> (sjekket 26.02.2020).
- [20] THEMA Consulting Group. *Sammenligning av ulike effekttariffer*. 2016. URL: <https://www.energinorge.no/contentassets/e9be03a275af43868b6f2c6d187e8296/thema-sammenligning-av-ulike-effekttariffer.pdf> (sjekket 17.04.2020).
- [21] Tensio. *Avtale*. URL: <https://ts.tensio.no/kunde/avtaler> (sjekket 17.04.2020).
- [22] Tensio. *Nettleie bedrift 2019*. URL: <https://ts.tensio.no/kunde/avtaler/2019-nettleie-bedrift> (sjekket 10.05.2020).
- [23] NVE-RME. *Plusskunder*. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/nettjenester/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/> (sjekket 15.05.2020).
- [24] *About +CityxChange*. URL: <https://cityxchange.eu/about-cityxchange/> (sjekket 26.02.2020).
- [25] Søren Østergaard Jensen mfl. “IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings”. I: *Energy and Buildings* 155 (nov. 2017), s. 25–34. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.044. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817317024> (sjekket 26.02.2020).
- [26] Pål Meland. *Forbrukerfleksibilitet i det norske kraftmarkedet*. Nov. 2006. URL: http://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2006/oppdragsrapportA2006_07.pdf (sjekket 26.02.2020).
- [27] Emilie Chartrand. *Energy flexibility in buildings: an overview*. TrønderEnergi Lerkendal, nov. 2019. (Sjekket 06.02.2020).
- [28] Xian He mfl. “How to engage consumers in demand response: A contract perspective”. en. I: *Utilities Policy* 27 (des. 2013), s. 108–122. ISSN: 0957-1787. DOI: 10.1016/j.jup.2013.10.001. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178713000593> (sjekket 21.05.2020).
- [29] K. O. Aduda, T. Labeodan og W. Zeiler. “Towards critical performance considerations for using office buildings as a power flexibility resource-a survey”. I: *Energy and Buildings* 159 (jan. 2018), s. 164–178. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.096. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817316626> (sjekket 26.02.2020).
- [30] Karen Byskov Lindberg. *Hvordan påvirker nullutslippsbygg effektbruken i Norge?* URL: https://www.sintef.no/globalassets/project/virkemidler-som-virker/4_karen-byskov-lindberg-hvordan-pavirker-nullutslippsbygg-effektbruken.pdf (sjekket 06.04.2020).

- [31] Enova. *Enovas Byggstatistikk 2015*. 2015. URL: https://www.enova.no/download/?objectPath=upload_images/B47F533CABC14B8F914648D8E7794EE3.pdf (sjekket 24.02.2020).
- [32] D P Kothari, I J Nagrath. *Electric Machines*. 4. utg. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2010. (Sjekket 24.04.2020).
- [33] H. Ibrahim, A. Ilinca og J. Perron. "Energy storage systems—Characteristics and comparisons". I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12.5 (jun. 2008), s. 1221–1250. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.023. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238> (sjekket 17.04.2020).
- [34] NVE. *Energilagring*. URL: <https://www.nve.no/energibruk-effektivisering-og-teknologier/teknologier/energilagring/?ref=mainmenu> (sjekket 25.03.2020).
- [35] Hallgeir Hole & Jarand Horne. *Batterier vil bli en del av kraftsystemet*. Norsk. 2019. URL: http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_14.pdf (sjekket 02.04.2020).
- [36] Ola Nilsen. *Hvordan fungerer et batteri? - Kjemisk institutt*. Nov. 2010. URL: <https://www.mn.uio.no/kjemi/forskning/tema/batterier/artikler/batteriprinsipp.html> (sjekket 25.03.2020).
- [37] MIT Electric Vehicle Team. *A Guide to Understanding Battery Specifications*. Des. 2008. URL: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf (sjekket 24.03.2020).
- [38] CK-12. *Galvanic Cells Foundation*. URL: https://www.ck12.org/book/cbse_chemistry_book_class_xii/section/3.2/ (sjekket 20.04.2020).
- [39] Store norske leksikon. *Ladningskapasitet – bilbatterier*. Apr. 2019. URL: http://snl.no/ladningskapasitet_-_bilbatterier (sjekket 21.04.2020).
- [40] Stuart Honsberg & Christina Bowden. *Battery Capacity — PVEducation*. URL: <https://www.pveducation.org/pvc/drom/battery-characteristics/battery-capacity> (sjekket 14.04.2020).
- [41] Knut Hofstad. *Energitetthet*. Aug. 2019. URL: <http://snl.no/energitetthet> (sjekket 21.04.2020).
- [42] Odne Stokke Burheim. "Secondary Batteries". I: *Engineering Energy Storage*. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2017, s. 111–145. ISBN: 978-0-12-814100-7. (Sjekket 06.03.2020).
- [43] Shuyu Fang mfl. *Anode-originated SEI migration contributes to formation of cathodeelectrolyte interphase layer*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775317312697> (sjekket 21.03.2020).
- [44] Aiping Wang mfl. *Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase(SEI) for lithium-ion batteries*. 2018. URL: <https://www.nature.com/articles/s41524-018-0064-0.pdf> (sjekket 03.04.2020).

- [45] Greg Albright mfl. *A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications*. Mar. 2012. URL: <https://www.batterypoweronline.com/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf> (sjekket 20.03.2020).
- [46] Fraser mfl. *Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries*. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300334> (sjekket 02.04.2020).
- [47] Olav Andreas Opdal. “Batteridrift av ferger”. I: (okt. 2010), s. 20–22. URL: <https://zero.no/wp-content/uploads/2016/05/batteridrift-av-ferger.pdf> (sjekket 05.04.2020).
- [48] Zubi mfl. *The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728> (sjekket 17.03.2020).
- [49] Naoki Nitta mfl. “Li-ion battery materials: present and future”. I: *Materials Today* 18.5 (jun. 2015), s. 252–264. ISSN: 1369-7021. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118> (sjekket 21.05.2020).
- [50] Thomas S. Brinsmead mfl. (PDF) *Future energy storage trends: An assessment of the economic viability, potential uptake and impacts of electrical energy storage on the NEM 2015–2035*. URL: https://www.researchgate.net/publication/282737404_Future_energy_storage_trends_An_assessment_of_the_economic_viability_potential_uptake_and_impacts_of_electrical_energy_storage_on_the_NEM_2015-2035 (sjekket 24.04.2020).
- [51] Peter Van den Bossche. *Standardisation and testing of powertrain components*. 2014. URL: <https://egvi.eu/wp-content/uploads/2018/04/VUB-presentation.pdf> (sjekket 05.04.2020).
- [52] Julio Romel Martinez-Bolanos mfl. “Economic feasibility of battery energy storage systems for replacing peak power plants for commercial consumers under energy time of use tariffs”. I: *Journal of Energy Storage* 29 (jun. 2020), s. 101373. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2020.101373. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19316251> (sjekket 17.04.2020).
- [53] Let’s Talk Science. *How does a lithium-Ion battery work?* URL: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work> (sjekket 21.04.2020).
- [54] Zenit mfl. “Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner”. I: (2019). URL: <https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/8a4e22f34a3147d8b7c94e2843abfd3d/sintef-rapport--alternative-driftsformer-for-ikke-elektrifiserte-baner.pdf> (sjekket 01.03.2020).
- [55] Yu Miao mfl. “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements”. I: *Energies* 12.6 (jan. 2019). Number: 6 Publisher:

- Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 1074. DOI: 10.3390/en12061074. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1074> (sjekket 19.04.2020).
- [56] Cenate. *Centrifugal nanotechnology*. URL: <https://www.cenate.com> (sjekket 13.05.2020).
- [57] Derek J Kamali & Ali Reza Fray. "Review on Carbon and Silicon Based Materials as Anode Materials for Lithium Ion Batteries". I: (), s. 14. URL: https://www.researchgate.net/publication/268883225_Review_on_Carbon_and_Silicon_Based_Materials_as_Anode_Materials_for_Lithium_Ion_Batteries (sjekket 14.04.2020).
- [58] Qianran Ashuri & Maziar He & Leon L. Shaw. "Silicon as a potential anode material for Li-ion batteries: where size, geometry and structure matter". I: *Nanoscale* 8.1 (des. 2015). Publisher: The Royal Society of Chemistry, s. 74–103. ISSN: 2040-3372. DOI: 10.1039/C5NR05116A. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/nr/c5nr05116a> (sjekket 13.05.2020).
- [59] Cate Hoedemaker. *Battery aging in full electric ships*. Sep. 2017. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%5C%3A81aee798-31bc-4628-82a7-ab03937d1161?collection=education> (sjekket 10.04.2020).
- [60] Vojislav Novakovic m.fl. *ENØK i bygninger*: 3. utg. NTNU - SINTEF, 2007. (Sjekket 28.02.2020).
- [61] Norges Astma- og allergiforbund (NAAF). *Inneklima og innemiljø*. URL: <http://www.inneklima.com/index.asp?key=RF> (sjekket 28.02.2020).
- [62] Michael J. Moran mfl. *Principles of Engineering Thermodynamics*. 8. utg. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-118-96088-2. (Sjekket 15.02.2020).
- [63] Zhigang Li & Per Kvols Heiselberg. *CFD Simulations for Water Evaporation and Airflow Movement in Swimming Baths*. Aalborg Universitet, 2005. URL: <https://vbn.aau.dk/en/publications/cfd-simulations-for-water-evaporation-and-airflow-movement-in-swi-2> (sjekket 12.03.2020).
- [64] Mirza Mohammed Shah. "Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces". I: (), s. 15. URL: https://www.researchgate.net/publication/287857391_Methods_for_calculation_of_evaporation_from_swimming_pools_and_other_water_surfaces (sjekket 10.04.2020).
- [65] Carlos Martinez. *2011 ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications SI Edition*. URL: https://www.academia.edu/33775815/2011_ASHRAE_HANDBOOK_HVAC_Applications_SI_Edition (sjekket 31.03.2020).
- [66] Muhammed Enes Kuyumcu & Recep Yumrutasb. *THERMAL ANALYSIS AND MODELING OF A SWIMMING POOL HEATING SYSTEM BY UTILIZING WASTE ENERGY REJECTED FROM A CHILLER UNIT OF AN ICE RINK*. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/304608306_Thermal_analysis_and_modeling_of_a_swimming_pool_heating_system_by_utilizing_waste_energy_rejected_from_a_chiller_unit_of_an_ice_rink (sjekket 05.04.2020).

- [67] Ilona Rzeźnik. "Study on water evaporation rate from indoor swimming pools". I: *E3S Web of Conferences 22* (2017). Red. av B. Kaźmierczak mfl., s. 00150. ISSN: 2267-1242. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200150. URL: <http://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20172200150> (sjekket 30.03.2020).
- [68] Enwa Badeanlegg. *Bassengovertrekk til svømmebasseng*. URL: <https://www.enwa.no/enwa-badeanlegg/produkter/alle-produkter/bassengutstyr/bassengovertrekk> (sjekket 20.04.2020).
- [69] Peter Blom & Sivert Uvsløkk. *Bygg tett*. Tekn. rapp. SINTEF Byggforsk. URL: https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/fagartikler/v__info_public_utgivelser_prosjektrapport_sintef-byggforsk-prosjektrapporter_sb-prapp-98_nettsb-prprapp-98.pdf (sjekket 19.05.2020).
- [70] Marianne Ruud. *Pressure controlled ventilation of the swimming pool*. 2019. URL: https://www.godeidrettsanlegg.no/system/files/sites/default/files/Publikasjoner/Masteroppgaver/Marianne_Ruud_Master_Thesis_2019.pdf (sjekket 03.02.2020).
- [71] Bjørn Aas. *Effektiv energibruk i svømmeanlegg (2016) Gode idrettsanlegg*. Nov. 2016. URL: https://www.godeidrettsanlegg.no/publikasjon/artikkel-effektiv-energibruk-i-sv%C3%5C%B8mmeanlegg-2016?fbclid=IwAR3yFc-Lim4vuriQ1_k1ilavXsDdZpePW99zSbT7qeDzmZrF6jFdj4I2VKw (sjekket 17.03.2020).
- [72] TTC Norge AS. *Kjølebatteri type CW*. URL: <http://www.ttc.no/wp-content/uploads/2017/11/Kj%C3%5C%B8lebatterier-CW.pdf> (sjekket 02.03.2020).
- [73] DenForm. *Spalokk til andre merker - rundt spabad*. URL: <https://www.denform.no/spabad/spalokk/product/spalokk-til-andre-merker-rundt-spabad> (sjekket 20.05.2020).
- [74] Finansdepartementet. *NOU 2012: 16*. NOU. Okt. 2012. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2012-16/id700821/> (sjekket 14.05.2020).

A Pirbadet

Dette vedlegget presenterer essensiell informasjon om Pirbadet som det valgte bygget. Vedlegget inkluderer åpningstider og plantegning som benyttes til å bestemme valgt systemgrense.

A.1 Pirbadets åpningstider

Ordinære åpningstider er tider der badet er åpent for alle besøkende. Utenom disse tidene har Norges teknisk- naturvitenskapelige universitets idrettsforening (NTNUI) og Trondheim svømme- og livredningsklubb (TS&LK) egne treningstider. Attraksjoner som bølgebasseng, vannsklier og boblebad er kun åpne i ordinære åpningstider, mens idrettsbassenget er i bruk hele den totale åpningstiden. A.1 viser en oversikt over Pirbadets åpningstider.

Tabell A.1: Pirbadets åpningstider.


	Ordinær	NTNUI	TS&LK	Total
Mandag	06:30 - 21:00	21:00 - 22:30	06:00 - 08:00	06:00 - 22:30
Tirsdag	12:00 - 21:00	21:00 - 22:30	06:00 - 12:00	06:00 - 22:30
Onsdag	06:30 - 21:00	20:30 - 22:00	06:00 - 08:00	06:00 - 22:00
Torsdag	12:00 - 21:00	–	06:00 - 12:00	06:00 - 22:00
Fredag	06:30 - 21:00	20:30 - 22:00	06:00 - 08:00	06:00 - 22:00
Lørdag	10:00 - 19:00	–	08:00 - 10:00	08:00 - 19:00
Søndag	10:00 - 19:00	–	18:00 - 21:00	10:00 - 21:00

B Kjølebatteri

Dette vedlegget presenterer essensiell informasjon om kjølebatteriet som en tenkt installasjon i ventilasjonssystemet. Herav er dataark fra en aktuell produsent og rådata fra driftsmønsteret av ventilasjonssystemet implementert.

B.1 Dataark

Dette vedlegget inneholder tilbudet Pirbadet har fått fra TTC Norge på kjølebatteri. Dataarket inneholder merkeverdier og verdier brukt i simulering, i tillegg til fysiske mål av det aktuelle batteriet.

		Kunde Attention Tilbud	Pirbadet Trond Sigernes 20200315 / haraldoe	TTC NORGE AS, P.O. Box 54, N-1851 Mysen. Tlf. +47 69 84 51 00 Versjon 7.7.7 Dato 25.02.2020, Side 1
Referanse : 1 - Produktkode : CW-ES-2,5-1800-1500-5R-56-S-Cu/Al				
Kapasitet		70,29 kW		
Luft Data				
Barometrisk trykk	101,325	kPa		
Tetthet	1,225	kg/m ³		
Luftmengde	6,944	m ³ /s		
Luft hastighet	2,6	m/s		
Lufttemperatur inn/RH	12,0 / 80,0	°C / %		
Lufttemperatur ut/RH	6,5 / 98,5	°C / %		
Følbar kjøling	0,68			
Kondensatmengde	0,540	l/min		
Trykkfall luft	93	Pa		
Væskedata				
Medium : Vann				
Væske inn	4,0	°C		
Væske ut	6,0	°C		
Væskemengde	8,39	l/s		
Væskehastighet	1,37	m/s		
Spesifikk vekt	999,700	kg/m ³		
Spesifikk varme	4 188,00	J/kg/K		
Varmeledningsevne	0,580	W/m/K		
Viskositet	1,307	mPa.s		
Trykkfall væske	29,24	kPa		
Fysiske data				
Preliminær Nettovekt	234	kg	Overflate	285,16 m ²
Rør	Cu, 0.40		Internt volum	60,01 dm ³
Samlestokk(L)	Cu		Finner	Al, 0.13
Prelim. Utv.[B" x H" x L']	2 026 x 1 620 x 500		Ramme	Galv. - 2,0mm
Innløp dim.	1 x 2 1/2" BSP		Utløp dim.	1 x 2 1/2" BSP
Design Pressure	10	bar		
Pris & Levering				
Pris pr. stk	56 000,00	NOK	Levering fra fabrikk	4-6 Arb.uke(r)
Antall	1			

Figur B.1: Dataark fra kjølebatteri.

B.2 Rådata fra ventilasjonssystemet

Vedlegget viser en oversikt over ventilasjonssystemets driftstid i friskluftsmodus f.o.m 28.02.2020 t.o.m 02.03.2020. Utenfor de oppgitte intervallene i tabell B.1, driftes anlegget enten i redusert friskluftsdrift eller omluftsdrift.

Tabell B.1: Oversikt over ventilasjonssystemets driftstid i friskluftsmodus for 28. og 29 februar.

Friskluftdrift					
Dato	Klokkeslett	Intervall [min]	Dato	Klokkeslett	Intervall [min]
28.02.2020	00:09 - 00:26	17	29.02.2020	00:00 - 00:02	3
	01:04 - 01:19	15		00:45 - 01:16	31
	02:02 - 02:19	17		02:05 - 02:28	23
	03:02 - 03:16	14		02:44 - 03:09	25
	04:01 - 04:14	13		03:55 - 04:14	19
	05:00 - 05:14	14		04:32 - 04:46	14
	06:00 - 06:17	17		05:11 - 05:22	11
	06:37 - 07:04	27		05:43 - 05:53	10
	07:30 - 08:32	62		06:24 - 06:44	20
	09:35 - 11:34	119		07:22 - 07:44	22
	11:59 - 22:29	630		09:06 - 09:53	47
	23:21 - 23:49	28		10:36 - 19:51	555
	23:53 - 23:59	6		23:18 - 23:31	13
				23:34 - 23:48	14
01.03.2020	00:11 - 00:21	10	02.03.2020	00:04 - 00:16	12
	00:29 - 00:32	3		00:33 - 00:48	15
	01:02 - 01:20	18		01:05 - 01:20	15
	01:59 - 02:17	18		01:36 - 01:49	13
	02:57 - 03:13	16		02:08 - 02:22	14
	03:53 - 04:12	19		02:42 - 03:53	11
	04:49 - 05:02	13		03:12 - 03:26	14
	05:35 - 05:45	10		03:43 - 03:56	13
	06:25 - 06:39	14		04:21 - 04:33	12
	07:23 - 07:35	12		04:53 - 05:04	11
	09:07 - 10:03	56		05:25 - 05:36	11
	10:45 - 20:07	562		05:57 - 06:03	6
	23:21 - 23:44	23		06:06 - 06:09	3
				06:34 - 09:52	198
				10:30 - 10:57	27
				11:25 - 13:43	138
				14:16 - 21:34	438
				22:11 - 22:28	17
				23:23 - 23:38	15
				23:53 - 23:59	6

C Tabulerte verdier

I dette vedlegget ligger tabulerte verdier for mettet vann og luft i SI-enheter [62, s. 801, s. 837]. Ulike verdier for temperatur, trykk og entalpi er funnet fra tabellene og benyttet i energianalyser.

Tabell C.1: Tabulerte verdier for vann.

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

H ₂ O	Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
			Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
			.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4	
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5	
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6	
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8	
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10	
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11	
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12	
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13	
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14	
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15	
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16	
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17	
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18	
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19	
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20	
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21	
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22	
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23	
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24	
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25	
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26	
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27	
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28	
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29	
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30	
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31	
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32	
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33	
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34	
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35	
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36	
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38	
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40	
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45	

Tabell C.2: Tabulerte verdier for luft.

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)											
T	h	u	s°	when Δs = 0 ¹		T	h	u	s°	when Δs = 0	
				p _r	v _r					p _r	v _r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.48	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.23	2.58810	30.38	67.07
420	421.26	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53
430	431.43	307.99	2.06533	4.915	251.1	730	745.62	536.07	2.61803	33.72	62.13
440	441.61	315.30	2.08870	5.332	236.8	740	756.44	544.02	2.63280	35.50	59.82

1. p_r and v_r data for use with Eqs. 6.43 and 6.44, respectively.

D Batteri

Vedlegget inneholder økonomisk analyse og flytskjema for driftsmønster av batteri til drift av den bølge- genererende maskinen på Pirbadet.

D.1 Økonomisk analyse

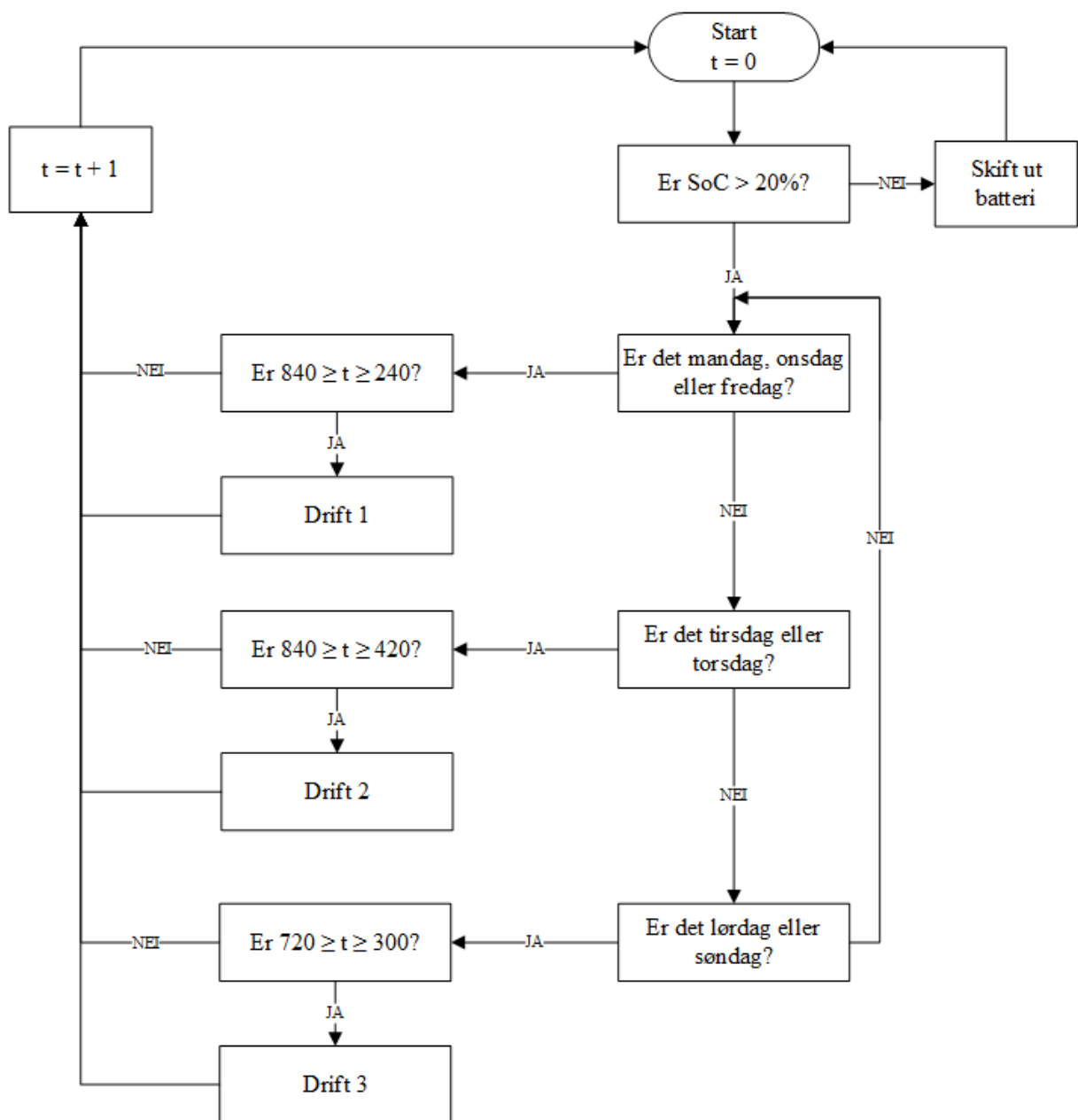
Tabell 4.1 viser ukentlig besparelse basert på en uke for hver måned i 2019. Den økonomiske besparelsen er mulig å oppnå dersom induksjonsmotoren til den bølge-genererende maskinen driftes med batteri fremfor uttak fra nett.

Tabell D.1: Reduksjon i strømutfgifter ved bruk av batteri.

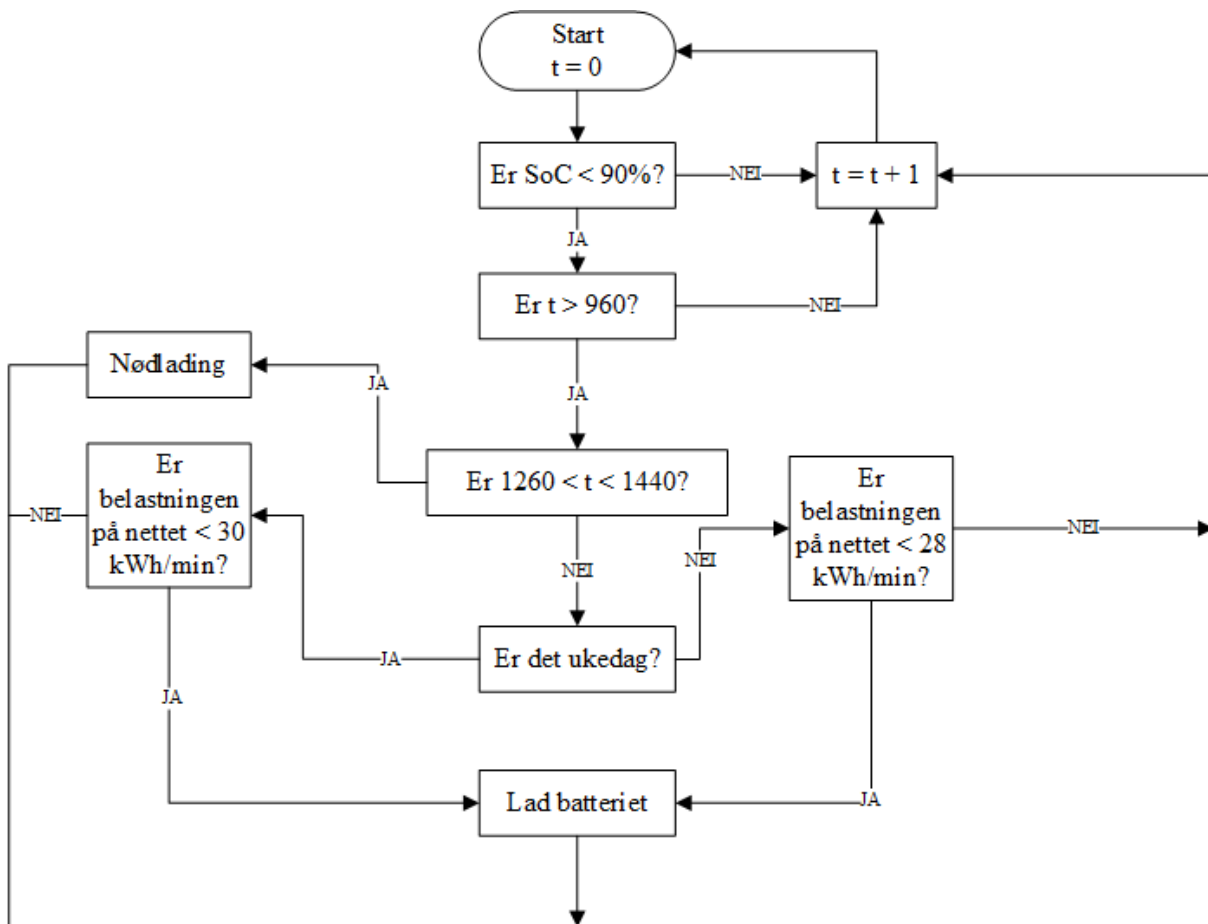
Måned	Besparelse [kr/uke] Batteri, 1C	Besparelse [kr/uke] Batteri, 0,25C
Januar	13,3869	49,7993
Februar	18,9668	53,9316
Mars	12,2269	43,2556
April	9,5079	37,7730
Mai	2,8166	34,6701
Juni	30,1407	42,8585
Juli	1,5393	23,4399
August	3,6717	33,7084
September	13,9522	45,9383
Oktober	11,7114	37,9196
November	35,9037	65,4717
Desember	20,8262	49,0208

D.2 Flytskjema

Dette vedlegget inneholder flytskjema for simulering av opp- og utlading av batteriet. Simuleringen starter ved $t = 0$ og er satt til kl. 06:00, som er det seneste tillatte tidspunktet for ferdigladet batteri. Simuleringen kjører gjennom løkken en gang per minutt, hvor t er antall minutter etter kl. 06:00. Drift 1, 2 og 3 er tilpasset til Pirbadets åpningstid og maskinens driftstider den gjeldende dagen. Flytskjema for utlading er vist i figur D.1 og flytskjema for oppladning er vist i figur D.2.



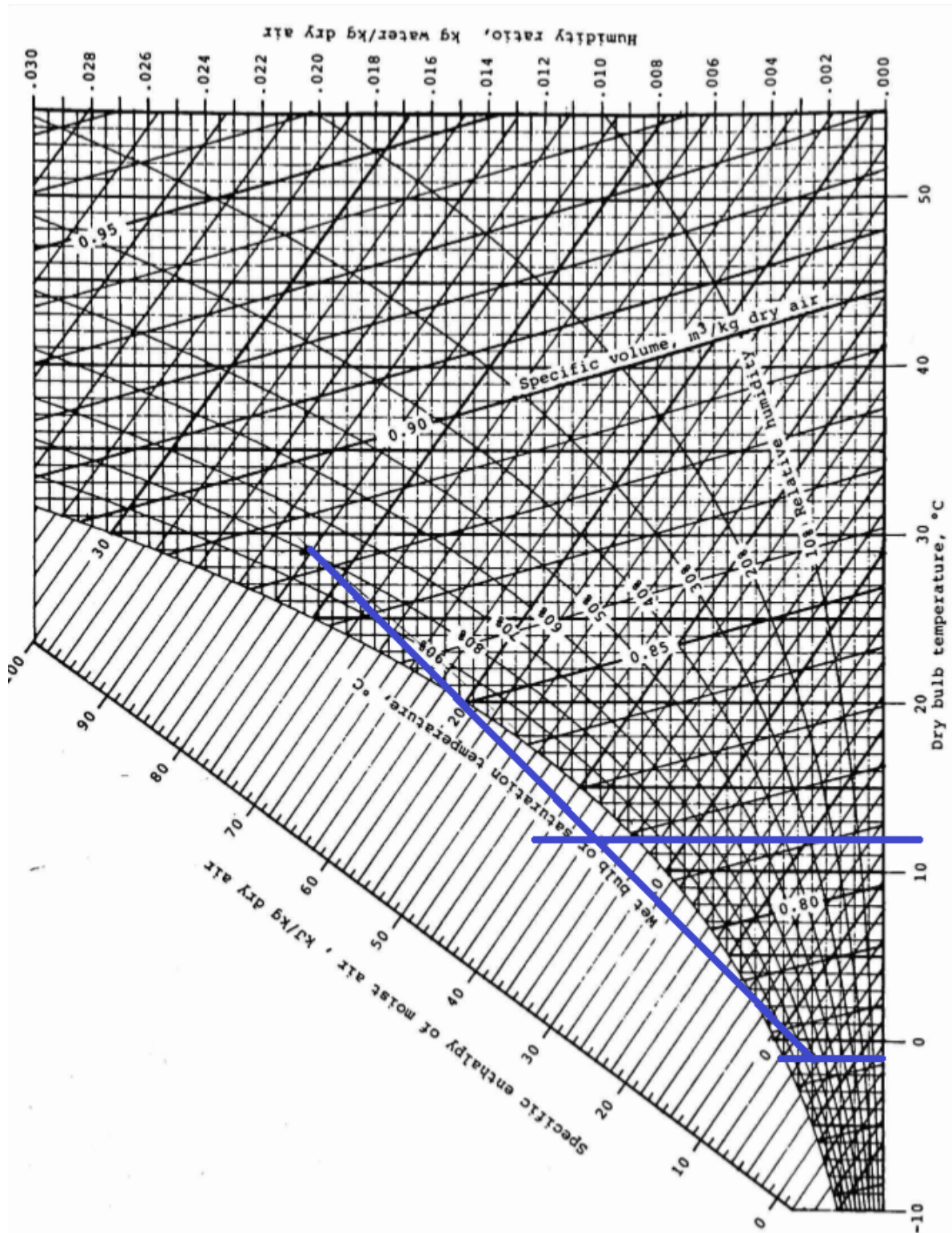
Figur D.1: Flytskjema for utlading av batteriet.



Figur D.2: Flytskjema for opplading av batteriet.

E Psykometrisk diagram

Figur E.1 viser det psykometriske diagrammet benyttet for å estimere relativ fuktighet på luftstrømmen i avkastkanalen etter platevarmeveksleren. Avtrekkstemperatur og relativ fuktighet på 29°C.



Figur E.1: Psykometrisk diagram for fuktig luft. [62, s.856]

