

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Sander Kvilhaug Aakre
Pål Rimmereide
Øystein Aarøy Mårstig

Bacheloroppgave i allmenn maskinteknikk

Bergen, Norge 2020





Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Sander Kvilhaug Aakre

Pål Rimmereide

Øystein Aarøy Mårstig

Institutt for Maskin- og Marinfag

Høgskulen på Vestlandet

NO-5063 Bergen, Norge

IMM 2020-M11

S. K. Aakre, P. Rimmereide, Ø. A. Mårstig

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmer

English title: Evaluation of atmospheric CO₂ capture and further use as G-T-L feedstock in Norway

Forfatter(e), studentnummer: Sander Kvilhaug Aakre
Pål Rimmereide
Øystein Aarøy Mårstig

Studieprogram: Allmenn maskinteknikk
Dato: 08.juni.2020
Rapportnummer: IMM 2020-11
Veileder ved HVL: Peter Koch HVL ansatt
Oppdragsgiver: HVL
Oppdragsgivers referanse: Peter Koch

Antall filer levert digitalt:

Forord

Denne oppgaven er skrevet i avdelingen for maskin og marin på Høgskulen på Vestlandet (HVL), og er i studieprogrammet allmenn maskinteknikk. Veilederen vår var Peter Koch, og oppgaven er skrevet for HVL. Vi vil gjerne rette en stor takk til Peter Koch for gode råd og veiledning gjennom dette prosjektet.

Sammendrag

I dette prosjektet er det gjort en undersøkelse på om det er mulig å gjøre luftfarten ved Bergen lufthavn Flesland karbon-nøytral ved å produsere «jet-fuel» ved «Direct Air Capture» (DAC) og Fischer-Tropsch prosessen (FT). Generelt sett er mengden CO₂ i luften altfor høy, og verden er i en «nesten» krise og mengden CO₂ i luften må reduseres. Luftfart er en sektor som står for høyt utslipp av CO₂, så det å gjøre luftfarten karbon-nøytral er et viktig steg mot en karbon-nøytral planet. Det finnes mange metoder man kan redusere mengden CO₂ i luften og en av disse er karbonfangst. Denne oppgaven er delt opp i tre deler; hydrogenproduksjon ved elektrolyse av vann, karbonfangst ved DAC og produksjon av «jet-fuel» ved Fischer-Tropsch prosessen.

Karbonfangst går ut på å fange CO₂ fra luften og lagre den, denne prosessen heter «Direct Air Capture». Elektrolyse av vann går ut på å produsere H₂ og O₂ ved å skille hydrogen- og oksygen-ion fra hverandre ved hjelp av elektrisk energi. Fischer-Tropsch prosessen er en gas-to-liquid (Gtl), gass-til-væske prosess, som går ut på å lage Gtl-produkter (kerosin, nafta, diesel, voks, div smøremidler) av naturgas. Denne oppgaven setter søkelys på hvordan bruke H₂ og CO₂ fra henholdsvis elektrolyse av vann og karbonfangst til å produsere Gtl-produkter. At det lar seg gjøre å fange CO₂ ved karbonfangst, produksjon av H₂ ved elektrolyse av vann og produksjon av Gtl-produkter ved FT-prosessen er ikke noe nytt. Karbonfangst er nokså nytt, men er i stor utvikling og det kommer til å dukke opp flere karbonfangstanlegg rundt omkring i verden i fremtiden. Elektrolyse av vann har lenge blitt brukt til å produsere H₂, og er veldig i fokus da man ønsker å redusere CO₂ utslipp fra biler og båter og bruke hydrogen som drivstoff. Fischer-Tropsch prosessen blei først industrialisert i 1935, men har siden den gang blitt ganske vanlig til produksjon av drivstoff.

Gjennom arbeidet med denne problemstillingen er målet å finne ut om det lønner seg å gå helt over til egenprodusert «jet-fuel» ved karbonfangst og grønn strøm i stedet for vanlig konvensjonell «jet-fuel», hvor mye brennstoff som kan produseres, om det er nok til å dekke behovet til Bergen Lufthavn Flesland og hvor mye det vil koste å gå helt over til egen produsert grønn «jet-fuel».

Abstract

This report examines whether it is possible to make the aviation traffic at Bergen Airport Flesland carbon neutral by producing “jet-fuel” by “Direct Air Capturing” (DAC) and the Fischer-Tropsch process (FT). The amount of CO₂ in the atmosphere is far too high, and it needs to be reduced. The world is almost at crisis and therefore the amount of CO₂ must be reduced. Aviation is a sector that accounts for high emissions of CO₂, so making aviation carbon-neutral is an important step towards a carbon-neutral planet. There are many ways to reduce the amount of CO₂ in the air and one way is by carbon capture (DAC). This task is divided into three parts: hydrogen production by electrolysis of water, carbon capture by DAC and production of “jet-fuel” by the Fischer-Tropsch process.

Carbon-capture, also called “Direct Air Capturing” is about catching CO₂ from the ambient air and storing it. Electrolysis of water is used to produce H₂ and O₂ by separating the hydrogen and oxygen ions from each other by using electrical energy. The Fischer-Tropsch process is a gas-to-liquid (Gtl) process, the process is using natural gas to make Gtl products such as naphtha, kerosene, diesel, wax, and different types of lubrication.

That it is possible to capture CO₂ by DAC, producing H₂ by electrolysis of water and producing Gtl products by the FT-process is nothing new. Even though carbon-capture is quite new there is a lot of technology available and in the future, there will emerge a lot of DAC plants around the world. Electrolysis of water has been used for a long time to produce H₂ and is very much in focus as we need to reduce the amount of CO₂ emission from cars and boats and instead use hydrogen as fuel. The Fischer-Tropsch process was first industrialized in 1935, but has since become quite common for production of fuel.

Though the work on this issue, the goal is to find out whether it pays off or not, to fully go over to self-produced “jet-fuel” by carbon-capture and green power instead of regular conventional “jet-fuel”. How much fuel can be produced, it is enough to meet the needs of Bergen Airport Flesland and how much will it cost to go all the way over to own produced green “jet-fuel”.

Innholdsfortegnelse

Forord	5
Sammendrag	7
Abstract	9
Innholdsfortegnelse	11
Nomenklatur	14
Problemstilling	17
1. Innledning	18
2. Metode	21
2.1 Teori	21
Hydrogenproduksjon ved elektrolyse av vann	21
Elektrolyse av vann	22
Hvordan fungerer en elektrolysecelle	23
Karbonfangst	28
Air Contactor	29
Pellet Reaktor	29
Kalsiner	30
Damplesker	31
Fischer Tropsch reaksjon	32
Introduksjon	32
Fischer Tropsch anlegg	33
Anleggets Oppbygning	33
Katalysator	35
Kjedelengde	37
2.2 Metode og feilkilder	37
3. Resultat	39
4. Diskusjon	44
Areal	45
Energibehov per liter	46
Pris per liter	47
Flesland og Norge generelt	48
Fossilt flydrivstoff	49
5. Konklusjon	50
6. Referanser	52

7. Liste over figurer	55
8. Liste over tabeller	56

Nomenklatur

Gtl	Gas to liquid
Ptl	Power to liquid
FT	Fisher-Tropsch
DAC	Direct Air Capture
PEM	Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis
SOEC	Solide Oxide Electrolysis
ATR	Auto Thermal Reforming
POX	Partial Oxidation
SR	Steam Reforming
SBCR	Slurry Bubble Column Reactor
MTFBR	Multitubular Fixed Bed Reactor

aq	Oppløst i vann
g	Gass
l	Flytende
s	Fast form

Problemstilling

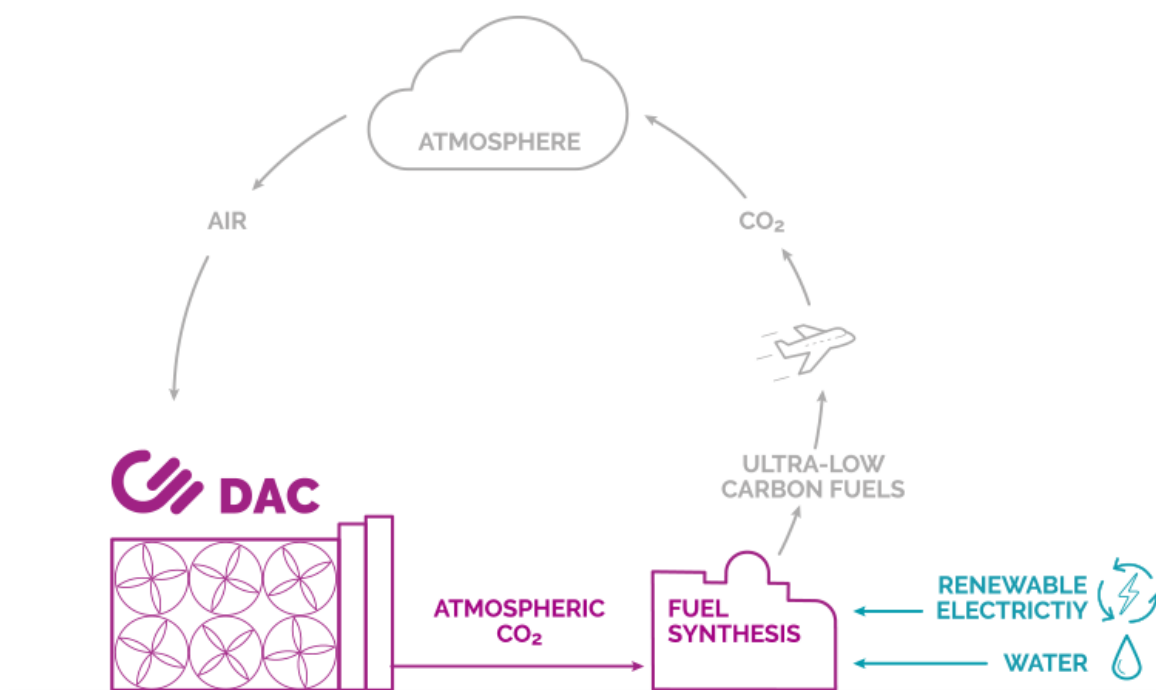
Hva vil det koste å bruke karbonfangst til å lage drivstoff til flytrafikk, som for eksempel Bergen lufthavn Flesland, hvor mye kan produseres og hva skal til for at det skal bli lønnsomt?

Problemstillingen er delt inn i fire deler: fangst av karbondioksid ved “direct air capture” (DAC), produksjon av hydrogen via elektrolyse, bruk av Fischer-Tropsch prosessen til å gjøre hydrogenet og karbondioksidet om til drivstoff og om dette kan brukes på Flesland til å gjøre enkelte flyreiser karbon-nøytrale. Karbonfangsten er det forsket en del på, og det finnes mye informasjon om prosessen. Hydrogenproduksjon via elektrolyse er også svært godt kjent, og drivstoffproduksjon via Fischer-Tropsch syntesen har blitt brukt for å lage drivstoff siden første halvdel av 1900-tallet. Det er likevel begrenset med litteratur om å sette disse sammen til å lage karbon-nøytralt drivstoff. Det skal gjøres en teknisk-økonomisk evaluering av hele prosessen og komme fram til hvor mye brennstoff som kan bli produsert og hva koster denne i forhold til konvensjonelt drivstoff, med hensyn til eksisterende infrastruktur her på Vestlandet, og vurdere om slik produksjon av karbonnøytralt drivstoff til flytrafikken på Flesland er egnet.

Grunnen til at mange er interessert i karbon-nøytralt drivstoff til fly er at flytrafikken slipper ut store mengder CO₂. I dag er den eneste måten å gjøre flytrafikken karbonnøytral å bruke elfly, men elfly har en rekke ulemper. De har kort rekkevidde, lav fart, og kan ikke transportere like mye last. Med å ta i bruk karbonfangst for å lage drivstoff til flytrafikken vil utslippene kunne reduseres betydelig uten at eksisterende fly må byttes ut eller modifiseres.

1. Innledning

Karbondioksid er en drivhusgass, som betyr at den fanger varmen fra solen og varmer opp kloden. Dette kan skape store problemer, og det er derfor viktig at produksjonen av karbondioksid i atmosfæren bremses. Som vist i *Figur 2* er flyindustrien en av de største produsentene av karbondioksid. For eksempel i 2019 produserte flyindustrien 915 millioner tonn karbondioksid [1]. Derfor er det viktig å redusere mengde karbondioksid som flyindustri og -transport forårsaker hvis vi skal nå EU målene om å bli karbon-nøytrale innen 2050 [2]. Det å produsere flydrivstoff fra karbondioksid fanget direkte fra luften kan mulig drastisk redusere hvor mye karbondioksid som blir produsert av flyindustrien, etter som karbondioksidet som flyene slipper ut når de forbrenner drivstoff er av samme mengde som blir fanget av karbonfangstanlegget som produserer drivstoffet. Det blir dermed ikke introdusert nye mengder med karbondioksid til atmosfæren, og balansen i karbonsyklusen blir ikke forverret slik som den blir i dag. Dette konseptet er visualisert i *Figur 1*.

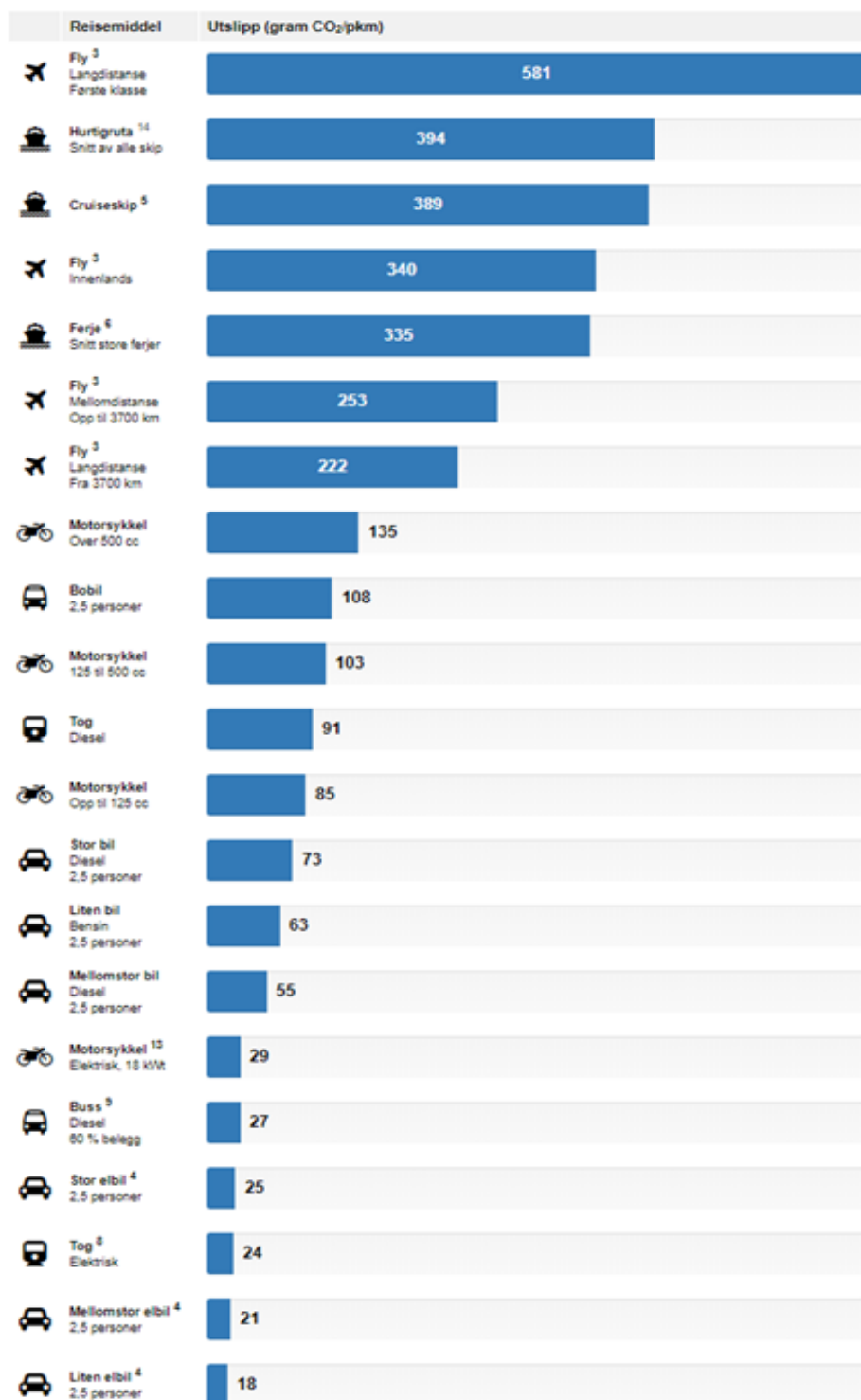


Figur 1 Fra Carbon Engineering som viser hvordan karbonfangst og power to liquid skaper et lukket karbonkretsløp [3].

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Prosessene som skal til for å fange karbondioksid og å produsere syntetisk drivstoff er godt kjent, og har blitt utviklet og forbedret i mange år. For eksempel er det per 2019 mer enn 35 “Power-to-liquid” anlegg i Tyskland [4]. Det er også flere selskaper som har en forretningsmodell basert på å fange karbondioksid fra atmosfæren, som Climeworks, og Carbon Engineering. Carbon Engineering og karbonfangstanlegget deres kommer til å bli omtalt mer i denne oppgaven.

Denne oppgaven skal undersøke den teknisk-økonomiske effekten av å produsere drivstoff til flyindustrien på vestkysten av Norge fra karbondioksid fanget direkte fra luften. Den inkluderer utregninger av massestrømmer gjennom hele prosessen, hvor mye karbondioksid og hydrogen som kreves for å produsere en liter med syntetisk flydrivstoff, og hvor store kostnader, hvor mye energi og hvor stort areal som kreves for denne prosessen. Det blir brukt data fra Carbon Engineering til utregningene på karbonfangstprosessen ettersom det er deres karbonfangstanlegg vi tar utgangspunkt i. Det blir også sett på hvordan forhold på vestkysten av Norge påvirker de forskjellige delene av prosessen. Det er allerede planer om å lage et lite “Power-to-liquid“-anlegg som produserer flydrivstoff i Norge, etter som Nordic Blue Crude planlegger å bygge et slikt anlegg på Herøya [5].



Figur 2 Klimagassutslipp fra ulike reisemåter (CO₂ per passasjer per kilometer) [6].

2. Metode

2.1 Teori

For å finne et svar på problemstillingen er første skritt å sette seg inn i hvordan prosessen faktisk fungerer. Det er fire steg i prosessen som gjøres for å gjøre om karbondioksid i luften til flydrivstoff: Direct Air Capture (DAC), elektrolyse av vann, Fischer-Tropsch syntese og raffinering. Prosessen starter med å fange karbondioksid direkte fra luften via DAC.

Karbondioksidet blir så konvertert til karbonmonoksid, som så blandes med hydrogen som blir produsert av elektrolysen av vann, og blandingen kalles syntesegass [7]. Fischer-Tropsch syntese blir så brukt til å produsere flytende hydrokarboner fra syntesegassen, som senere går gjennom en raffineringssprosess for å separere de ulike stoffene som blir produsert. De neste kapitlene vil gi en mer detaljert beskrivelse av de enkelte prosessene.

Hydrogenproduksjon ved elektrolyse av vann

Bruken av hydrogen i prosessen for å produsere biodrivstoff har økt mye de siste årene [8]. Hydrogen er ikke skadelig for klimaet på grunn av fraværet av klimagasser. Klimagasser fører til økning av drivhuseffekten, som igjen fører til at temperaturen på jorda øker og isen på polene smelter. På grunn av fraværet av klimagasser blir hydrogen mer og mer brukt til å produsere biodrivstoff. Ved bruk av elektrisitet produsert av vannkraft eller vindkraft i elektrolysen, og siden produksjonen foregår lokalt har elektrolysen null utslipp. Det som eventuelt kan gi utslipp er om hydrogen ikke produseres lokalt og må transporteres videre til f.eks. et FT-anlegg [9].

Hydrogen inneholder ikke karbonatomer og kan derfor ikke konvertere CO₂ som er en klimagass. Fra elektrolyse av vann vil det bli produsert H₂ som er en drivhusgass, men denne gassen er ikke like skadelig for miljøet som CO₂. Kilder som biogass, vann, etanol, glyserol blant andre kan brukes til å produsere hydrogen, alle disse kildene er fornybare noe som gjør dem aktuelle å bruke. Noen av disse kildene danner også CO₂, så det er ikke alle disse kildene som er like miljøvennlige å bruke, det kommer også an på hva som gjøres med produktene som ikke er H₂ [8, 9].

Elektrolyse av vann er den mest brukte prosessen til å produsere hydrogen, spesielt når den er kombinert med andre fornybare energi-genererende prosesser som vind og solenergi. Vann og vind er de mest vanlige energikildene å kombinere med elektrolyse av vann i Norge, vann og vind har en stor tilgang på, noe som gjør dette til en enkel metode produsere grønn elektrisitet på [9]. I Brasil f.eks. vil kombinasjonen av sol og vind være den beste [8]. Ved elektrolyse av vann kan man bruke både ferskvann og saltvann, men i dette prosjektet har man tatt utgangspunkt i bruken av ferskvann. Den elektriske strømmen som trengs til elektrolyse av vann kan bli produsert ved hjelp av fornybare energikilder, noen av disse som kan brukes er vindenergi, solenergi, termisk energi (varme) og bølgeenergi. I teorien skal det være ganske enkelt å produsere fornybar energi og kombinere det med produksjon av hydrogen ved elektrolyse av vann, problemet er at det vil komme dager der det verken er vind eller sol, derfor må energien kunne lagres til dager med dårlige forhold.

Det er mange måter man kan produsere H₂ på, metoder som elektrolyse av vann, kull- og biomasse-gassifisering og foto-elektrolyse er de mest vanlige prosessene som er brukt til produksjon av hydrogen. Produksjon av hydrogen blir mer og mer attraktiv da den ikke har noe stor negativ effekt på miljøet. For å redusere mengdene CO₂ i atmosfæren blir hydrogen brukt mer og mer. I kombinasjon med CO₂-fangst kan man produsere flydrivstoff ved Fischer-Tropsch prosessen, dette gjør det mulig å nå klimamålene om redusert CO₂ i atmosfæren. Ulike material-kilder kan brukes til å produsere hydrogengass og kildene som gjør dette mulig er vanligvis av fossilt materiale [8, 10].

Elektrolyse av vann

Det går en elektrisk spenning gjennom vannet (elektrolytt) som gjør at vann splittes til hydrogen og oksygen. Elektrolyser kommer i mange forskjellige størrelser, og de kan variere fra små apparater som er egnet for småskala-hydrogenproduksjon til store sentrale produksjonsanlegg som kan være direkte knyttet til fornybare former for elektrisitetsproduksjon [11].

En elektrolyse består av en positivt ladet elektrode (anode) og en negativt ladet elektrode (katode) som er separert av en elektrolytt. Elektrolyser fungerer forskjellig utefra hvilken elektrolytt materiale som er involvert i elektrolyseprosessen [12]. «Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer» (PEM elektrolyser) er den elektrolysen som er mest brukt. Det finnes også «Alkaline Electrolyzers» og «Solid Oxide Electrolyzers». I «Alkaline

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Electrolyzers» blir kaliumhydroksid brukt som elektrolytt. I «Solid Oxide Electrolyzers» blir det brukte en solid membran av keramisk materiale som elektrolytt. I

Tabell 1 kan man se fordeler og ulemper ved de ulike typene elektrolyser [10, 11].

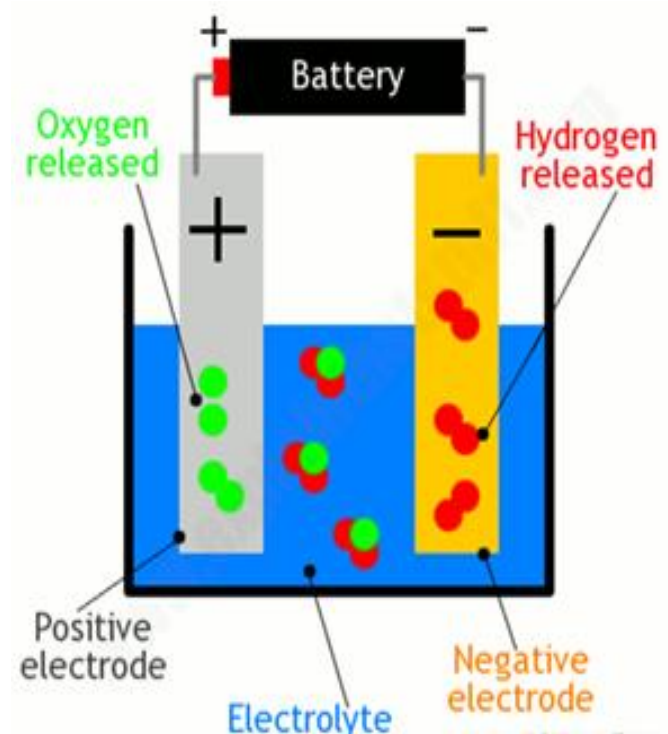
Tabell 1 Sammenligning av forskjellige typer elektrolyser [13].

Alkaline Electrolysis	Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis (PEM)	Solide Oxide Electrolysis (SOEC)
Fordeler		
Vel-etablert teknologi	Høy strømtetthet	Virkningsgrad opp mot 100%; termoneutral
Ikke-edle katalysatorer	Høy spenningseffektivitet	Virkningsgrad > 100% m/varm damp
Høy stabilitet over lang tid	Godt delbelastningsområde	Ikke-edle katalysatorer
Relativt lav kostnad	Rask systemrespons	Høyt driftstrykk
Kostnadseffektiv	Kompakt systemdesign	
	Høy gassrenhet	
	Dynamisk drift	
Ulemper		
Lav strømtetthet	Komponentene er kostbare	Labratorie stadie
Lav gassrenhet (krysning av gasser)	Sure etsende miljø	Omfangsrikt design
Lavt delbelastningsområde	Lav holdbarhet/varighet	Lav holdbarhet (består av skjøre keramiske komponenter)
Lav dynamikk	Kommersialisering	Ingen pålitlig kostnadsinformasjon
Lavt driftstrykk		
Etsende flytende elektrolytt		

Hvordan fungerer en elektrolysecelle

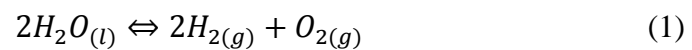
Som vist i *Figur 3* kommer det frem at den positive og den negative elektroden er koblet opp mot batteriet der begge elektrodene er omringet av vann (elektrolytt). I dette tilfelle er vann brukt som elektrolytt, dette er mer vanlig i små laboratoriet elektrolyser. I større elektrolyser bruker man ofte en solid polymer membran (PEM elektrolyse) som elektrolytt i lag med vannet, denne membranen er av et solid plastisk materiale. Membranen er med på å øke ytelsen til elektrolysen og gjør at hydrogen- og oksygen-ionene beveger seg fort gjennom den. Når den elektriske strømmen går gjennom vannet (vist som to røde og en grønn kule i *Figur 3*) vil energien fra den elektriske strømmen splitte vannet til positive ladete hydrogen-ioner (vist som røde kuler i *Figur 3*) og negativt ladete oksygen-ioner (vist i *Figur 3* som grønne kuler). De positive hydrogen-ionene blir tiltrukket mot den negative elektroden (katoden), mens de negative oksygen-ionene blir tiltrukket mot den positive elektroden

(anoden). Ved katoden blir det dannet hydrogengass (H₂) og ved anoden blir det dannet oksyngass (O₂) [10, 11, 14].



Figur 3 Oversikt over elektrolyseprosessen [14].

Følgende reaksjonsligning skjer i elektrolyseprosessen [14]:



Fra ligning en kan vi se at det vil bli dannet dobbelt så mye hydrogengass som oksyngass. Dette er basert på antall hydrogenmolekyl og oksygenmolekyl i vannet, man kan også se i Tabell 2 fra McPhy at dette stemmer.

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Tabell 2 Oversikt over egenskapene og energibehov for små og medium elektrolyser [15].

	Pressure (barg)	Max H ₂ flow rate (Nm ³ /h)	Max O ₂ Flow rate (Nm ³ /h)	Electrical power @ nominal load (kW)
Baby Piel	1	0.4	0.2	3
P1,5	1-2.5	1	0.5	7
P2,4	1-2.5	1.6	0.8	11
M3,6	1-2.5	2.4	1.2	16
M5,1	1-2.5	3.4	1.7	20
M6,6	1-2.5	4.4	2.2	23
G10,2	1-2.5	6.8	3.4	38
G12	1-2.5	7.6	3.8	41
Dodicimila	1-4	8	4	42
Quindicimila	1-4	10	5	52
Diciottimila	1-4	12	6	63
S4,5 MP	4-8	3	1.5	16
S6 MP	4-8	4	2	21
S9 MP	4-8	6	3	31
S12 MP	4-8	8	4	42
S15 MP	4-8	10	5	52
S18 MP	4-8	12	6	63

I kolonne nr. 1 er de forskjellige typene elektrolyser. I kolonne nr. 2 vises vanntrykket som trengs. Kolonne nr. 3 vises hydrogenproduksjonsraten i M³/h. Kolonne nr. 4 viser oksygenproduksjonsraten i m³/h. Kolonne nr. 5 viser energibehovet som elektrolysen trenger [15].

Tabell 3 Oversikt over egenskaper og energibehov for store elektrolyser [16].

	Pressure (barg)	Nominal hydrogen flow rate (Nm ³ /h)	Nominal power	DC Energy Consumption @ nominal flow rate (kWh/Nm ³)
McLyzer 10-10	10	10	ca. 57 kW	5.25
McLyzer 10-30	30	10	ca. 52 kW	4.54
McLyzer 60-30	30	60	ca. 0.3 MW	4.43
McLyzer 100-30	30	100	ca. 0.5 MW	4.5
McLyzer 200-30	30	200	ca. 1 MW	4.5
McLyzer 400-30	30	400	ca. 2 MW	4.5
McLyzer 800-30	30	800	ca. 4 MW	4.5

Kolonne nr. 1 viser de forskjellige typene elektrolyser. Kolonne nr. 2 viser vann trykket som trengs inn i elektrolysen. Kolonne nr. 3 viser hydrogenproduksjonsraten i m³/h. Kolonne nr. 4 viser energibehovet. Kolonne nr. 5 viser energiforbruk pr. produksjonsrate i kWh/m³ [16]. Man kan også koble flere av typene elektrolyser sammen til ett stort anlegg. McPhy har et anlegg der de har 25 moduler av den 4MW elektrolysen (som vist i nederste rad i Tabell 3) koblet sammen til ett stort 100 MW anlegg. Dette anlegget har en hydrogenproduksjonsrate på 20 000 m³/h, det vil si mer enn 42 tonn hydrogen per dag. Det eneste som kan være negativt med et slikt anlegg er at man trenger en god del plass, et anlegg på 100 MW krever et areal på 4.500m² [17].

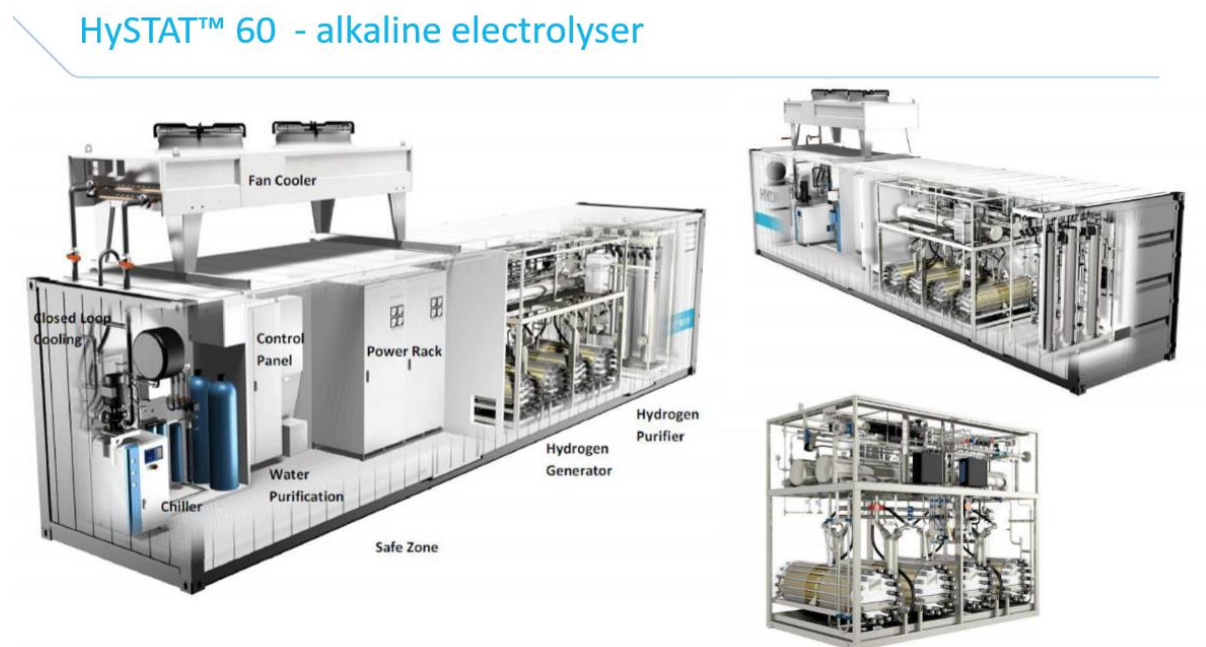
Fordelen med små elektrolyser er at de ikke har så stort arealbehov og at energibehovet er nokså lavt som kommer frem i Tabell 2. Siden energibehovet er så nokså lavt er det enkelt å produsere den nødvendige energien man trenger ved bruk av egenprodusert fornybar energi, f.eks. solcellepanel eller en liten vindmølle. Små elektrolyser er mer brukt av folk privat i egne hjem eller til bruk i små laboratorieforsøk. Ulempen med små elektrolyser er at de ikke produserer så mye hydrogen, som vist i Tabell 2.

Fordelen med store elektrolyser er at det kan produseres mye hydrogen, som vist i Tabell 3. Ulemper med store elektrolyser er at de trenger veldig mye energi og de krever veldig stort arealet, som vist i Tabell 3, noe som kan gjøre det vanskelig å få på plass et så stort anlegg. Ulempen med at det kreves så mye energi er at det kan bli vanskelig å produsere denne energien med egenprodusert fornybar energi, så det trenges et anlegg som er tilrettelagt slik at

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

det er mulig å produsere nok fornybar energi. Dette kan være plasser der det er ekstremt vindutsatt eller at solforholdene er veldig gode. Norge har veldig mye vind, så akkurat det vil nok ikke blitt et problem, problemet ville heller være å få plass til et stort elektrolyseanlegg nærme nok til en stor vindpark eller lignende.

Hydrogenics er et selskap som har lang erfaring når det kommer til design, produksjon og installering av elektrolysesystemer til hydrogenproduksjon. Hydrogenics har et containersystem som vist i *Figur 4*, der en vanlig 40-fots container inneholder et elektrolyseanlegg [18].



Figur 4 Container systemet til Hydrogenics [18].

Komponenter:

- Fan Cooler: Vifte som kjøler ned temperaturen i containeren
- Hydrogen Purifier: Hydrogenrensner
- Hydrogen Generator
- Power Rack: Kraft sentral
- Control Panel: Kontrollpanel
- Water Purification: Vannrensing
- Chiller: Kjøler
- Closed Loop Cooling: Lukket sløfjekjøling

Hydrogenics har to ulike elektrolysesystemer som de opererer med og de to er «Alkaline Elektrolyser» og «Proton Exchange Membrane» (PEM) elektrolyse, egenskapene til disse kommer frem i *Figur 5* [18].

	Alkaline			PEM (Proton Exchange Membrane)		
	HySTAT®-15-10	HySTAT®-60-10	HySTAT®-100-10	HyLYZER®-300-30	HyLYZER®-1.000-30	HyLYZER®-5.000-30
Output pressure	10 barg (27 barg optional)			30 barg		
Number of cell stacks	1	4	6	1	2	10
Nominal Hydrogen Flow	15 Nm ³ /h	60 Nm ³ /h	100 Nm ³ /h	300 Nm ³ /h	1.000 Nm ³ /h	5.000 Nm ³ /h
Nominal input power	80 kW	300 kW	500 kW	1.5 MW	5 MW	25 MW
AC power consumption (utilities included, at nominal capacity)	5,0-5,4 kWh/Nm ³			5,0-5,4 kWh/Nm ³		
Hydrogen flow range	40-100%	10-100%	5-100%	1-100%		
Hydrogen purity	99,998% O ₂ < 2 ppm, N ₂ < 12 ppm (higher purities optional)			99,998% O ₂ < 2 ppm, N ₂ < 12 ppm (higher purities optional)		
Tap water consumption	<1,4 liters / Nm ³ H ₂			<1,4 liters / Nm ³ H ₂		
Footprint (in containers)	1 x 20 ft	1 x 40 ft	1 x 40 ft	1 x 40 ft	2 x 40 ft	10 x 40 ft
Footprint utilities (optional)	Incl.	Incl.	Incl.	1 x 20 ft	1 x 20 ft	5 x 20 ft

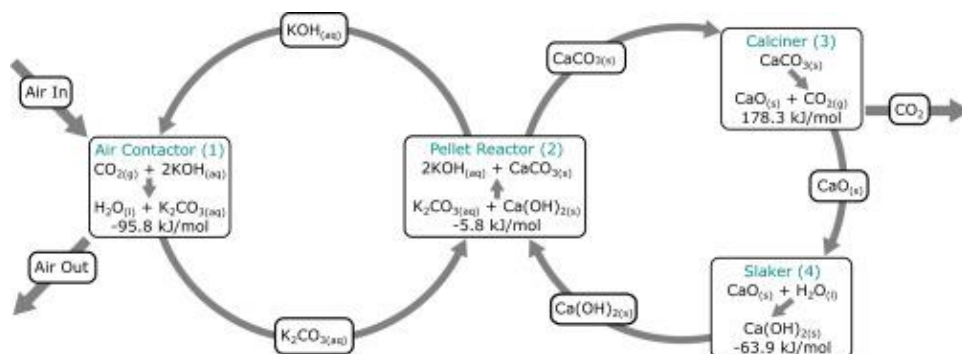
Figur 5 Oversikt over Alkaline og PEM elektrolyse sine egenskaper [18].

Det største elektrolyseanlegget til Hydrogenics som består av 10 40-fots containere som vist i *Figur 5*. En 40-fots container er 12,19 m lang og 2,44 m bred [19], det vil si at en container har et areal på ca. 30 m². Det største anlegget til Hydrogenics som består av 10 slike 40-fots containere vil det da trenge et areal på ca. 300 m². I Norge har vi et vindkraftverk som ligger i Berlevåg kommune, dette anlegget heter Raggowidda vindkraftverk. Anlegget har en kapasitet på 190 GW/h og strekker seg over et areal på ca. 10 km². Anlegget til Hydrogenics trenger en krafttilførsel på 25 MW, ved å bruke kraften fra Raggowidda vindkraftverk ville det være nok til et nok et par slike elektrolyseanlegg [20].

Karbonfangst

Fangst av karbondioksid direkte fra luften skjer via en prosess som heter DAC (Direct Air Capture). Det er flere måter DAC prosessen kan virke på, men i denne oppgaven er det satt søkelys på prosessen som blir brukt av Carbon Engineering. Carbon Engineering sine anlegg har fire hovedkomponenter, som heter «Air Contactor», «Pellet Reaktor», «Kalsiner» og «Damplesker», som henger sammen i to kjemiske løkker, som vist i *Figur 6*.

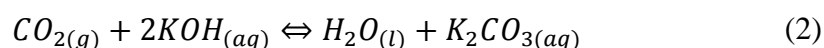
Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart



Figur 6 Oversikt over kjemien i et karbonfangstanlegg [21].

Air Contactor

Air Contactor er maskinen som fanger CO_2 direkte fra luften. Måten den virker på er å bruke store vifter til å fange inn luft, og så blåse det over en væske som består av kalsiumhydroksid og kaliumkarbonat oppløst i vann. Når luften passerer gjennom “Air Contactor”-en fester det meste av karbondioksidet seg til denne, og resten av luften blir blåst ut igjen. Væsken og karbondioksidet som nå har festet seg til den, blir så sendt til neste steg i prosessen. Når væsken går inn i “Air Contactor”-en og ikke har bundet seg til karbondioksid ennå, er formelen på stoffet KOH (aq), og etter å ha bundet seg til karbondioksidet er den K_2CO_3 . Hydrogenet forsvinner fordi det binder seg til oksygen og lager vann. Reaksjonen er:



I “Air Contactor”-en strømmer væsken nedover gjennom en pakning av plast og er rundt 50 μm i tykkelse. Pakningen har en “cross-flow”- konfigurasjon, som betyr at den er horisontal i forhold til luftstrømmen.

Pellet Reaktor

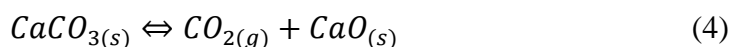
Pellet reaktoren er en fluidisert sjikt-reaktor, og er maskinen som fjerner karbonatet fra væsken som blir brukt av “Air Contactor” til å fange karbondioksidet fra luften. En fluidisert sjikt reaktor er en tank fylt med korn av et fast stoff, og en væske eller en gass blir sprøytet inn på bunnen slik at kornene oppfører seg som et fluid. Pellet reaktoren inneholder en løsning som består av $K_2CO_{3(aq)}$ fra “Air Contactor”, $Ca(OH)_{2(aq)}$ som kommer fra dampleskeren og pellets som består av $CaCO_3$. Kornene har en diameter på 0,1 – 0,9 mm og flyter rundt i løsningen. $Ca(OH)_2$ kommer inn i tanken fra bunnen som en del av en oppslemming, der $Ca(OH)_2$ utgjør 30% av innholdet. I tanken reagerer Ca^{2+} med CO_3^{2-} og danner $CaCO_3$ som gitt av formelen:



Det nye CaCO₃-et som blir dannet og binder seg til pelletene av CaCO₃ som flyter rundt i løsningen, og får dem til å vokse. Når de blir store nok synker de til bunnen av tanken, og der blir de fjernet og sendt videre til dampleskeren og kalsineren. Væsken inneholder nå for det meste K⁺ og OH⁻ (KOH (aq)) som så blir sendt tilbake til "Air Contactor"-en, og dette lukker den første kjemiske løkken.

Kalsiner

Når CaCO₃ pelletene fjernes fra pellet reaktoren sendes de til dampleskeren for å bli tørket og oppvarmet, og så til kalsineren. Kalsineren er en maskin som består hovedsakelig av en stor tank, med ildfast murstein på innsiden. Oppgaven dens er å kalsinere CaCO₃ for å danne CO₂ og CaO.



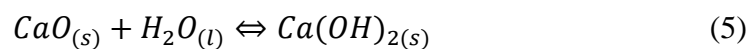
Reaksjon fire krever veldig høye temperaturer for å finne sted. Pelletene må derfor bli varmet opp til en svært høy temperatur, som her blir gjort trinnvis. Først blir pelletene varmet opp til 300°C i dampleskeren. Så går de inn i en forvarmer der en gass som består av 82,57% CO₂, 14,99% H₂O, 1,28% N₂ og 1,16% O₂, som er avgassene fra kalsineren. Den har en temperatur på 650°C før den kommer inn i forvarmeren, og kjøles til 450°C når den varmer pelletene til den samme temperaturen. Før denne gassen blir brukt i denne forvarmeren blir den brukt i den andre forvarmeren, der den kommer inn med en temperatur på 900°C. Den blir der kjølt til 650°C mens den varmer pelletene til samme temperatur. Etter å ha nådd 650°C går pelletene inn i selve kalsineren, som er en oksygenfyrt sirkulerende fluidisert sjiktreaktor [21]. En sirkulerende fluidisert sjiktreaktor er svært lik en vanlig fluidisert sjiktreaktor, men den har to fluidiserte sjikter istedenfor bare en. Den første brukes til pyrolysen, og den andre foretar en forbrenning som produserer varmen som det første sjiktet trenger [22]. En gass, som for det meste består av oksygen, blir tilført bunnen av tanken for å fluidisere innholdet. Det blir også tilført naturgass via en rekke lanser, som sprøyter inn gassen rett over platen der fluidiseringsgassen blir sprøytet inn. Etter at pelletene av kalsiumkarbonat splittes til kalsiumoksid og karbondioksid sendes kalsiumoksidet til en forvarmer. Forvarmeren varmer oksygenet som sprøytes inn i kalsineren til det oppnår en temperatur på 674°C, og samtidig kjøler kalsiumoksidet ned til 674°C. Deretter sendes det til dampleskeren. Pellet-baserte kalsinere som denne har en termisk virkningsgrad på 78%, som er mye mer enn tradisjonelle

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

kalkslam-baserte kalsinere som har en virkningsgrad på bare 39%. Gassene som forlater kalsineren blir som nevnt over først sent til forvarmeren til pelletene av kalsiumkarbonat, og så til en maskin som fjerner vanndampen, før den til slutt blir sendt gjennom en karbondioksid-kompressor. Til slutt får vi ut en gass som består av 97,12% karbondioksid, 1,36% oksygen, 1,51% nitrogen og 0,01% vanndamp, og denne gassen har en temperatur på 40°C og et trykk på 151 bar. Denne gassen er det endelige produktet som karbonfangstanlegget produserer.

Damplesker

Dampleskeren er altså den komponenten kalsiumoksidet som produseres i kalsineren sendes til. I likhet med både pelletreaktoren og kalsineren er dette også en fluidisert sjiktreaktor. Den fluidiserende gassen er vanndamp, som også er en del av reaksjonen som finner sted i reaktoren.



Reaksjonen er eksoterm, og vist av ligning fem. Partiklene av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som blir produsert i reaksjonen er mye mindre enn partiklene av CaO , og blir filtrert ut av dampleskeren. Når de forlater dampleskeren blir varmen brukt til å tørke og oppvarme CaCO_3 pelletene til 300°C. Dampen fra tørkingen er nok til å holde reaksjonen i dampleskeren gående. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -et blir deretter transportert til pellet reaktoren, og dette lukker den andre kjemiske løkken.

I tillegg til disse fire komponentene er det også mange mindre komponenter som for eksempel ASUen, som avkjøler og kondenserer luft for å lage oksygenet som brukes som fluidiseringsgass i kalsineren, og kompressoren, som komprimerer karbondioksidet før det forlater anlegget [21]. Det er også verdt å nevne vannbehovet til anlegget.

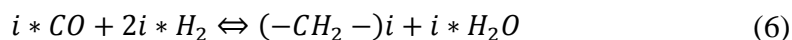
Karbonfangstanlegget har et vannbehov på 531 tonn i timen, der bare ferskvann benyttes. vannet blir først brukt til å rengjøre gassene fra kalsineren før de går inn i kompressoren, og så blir det tilført kalsiumhydroksidet fra dampleskeren når den er på vei til pellet reaktoren. Karbonfangstanlegget er beskrevet i større detalj i jouleartikkelen "A process for capturing CO_2 from the atmosphere" (2018) [21].

Det å kunne fange karbondioksid direkte fra luften er svært gunstig fra et miljøperspektiv, men et stort problem med karbonfangst er at det vanligvis ikke er lønnsomt. Dette problemet kan løses med å bruke Fischer-Tropsch reaksjon til å lage flytende drivstoff fra karbondioksidet, selv om dette til en viss grad vil redusere hvor gunstig karbonfangst er for klimaet.

Fischer Tropsch reaksjon

Introduksjon

Fischer-Tropsch reaksjonen er en reaksjon mellom karbonmonoksid og hydrogen som kan produsere store hydrokarboner lik de som finnes i råolje.

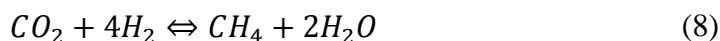


Reaksjonen er beskrevet av ligning seks og er svært eksoterm. Hvilke hydrokarboner som blir produsert er i stor grad bestemt av temperaturen, og dette sammen med at reaksjonen er svært eksoterm gjør at reaktoren trenger en effektiv måte å bli kvitt overfladisk varme [23].

Før karbondioksidet som er produsert av karbonfangstanlegget kan brukes i en Fischer-Tropsch reaktor til å lage drivstoff, må det konverteres til karbonmonoksid. For å gjøre dette benyttes revers vann-gass skift reaksjonen, som er vist av ligning sju.



Denne reaksjonen er endoterm, og finner sted i en revers vann-gass skiftreaktor. Reaksjonen er temperaturavhengig. Den vil favorisere revers vann-gass skift ved høye temperaturer og vann-gass skift og metanproduksjon ved lavere temperaturer [24]. Metanproduksjon er vist av ligning åtte.



Fischer-Tropsch (FT) syntesen er oppkalt etter to tyske kjemikere, F. Fischer og H. Tropsch. I årene mellom 1925-1935 gikk Fischer og Tropsch fra bare å ha gjort små laboratorieforsøk om FT prosessen til å industrialisere den til tekniske anvendelser i industriell skala. Allerede i 1902 hadde den grunnleggende reaksjonen i FT-syntesen blitt beskrevet av to franskmenn, Sabatier og Senderens. Fisher og Tropsch bygget videre på det Sabatier og Senderens jobbet frem på starten av 1900-tallet og industrialiserte det i 1935. Fischer-Tropsch syntesen er en gass til væske (Gtl) prosess, der naturgass blir konvertert til flytende drivstoff, blant annet diesel og kerosin (flydrivstoff). Syntesegass/syngas produseres av biomasse og består av H₂ og CO, og er en viktig komponent når det kommer til konvertering av naturgass til Gtl-produkter. Fischer-Tropsch syntesen er en god måte å bruke naturgass på som ellers ikke kan blir brukt til noe annet, på grunn av økonomi eller på grunn av lokasjonen til naturgassreservoaret [25].

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

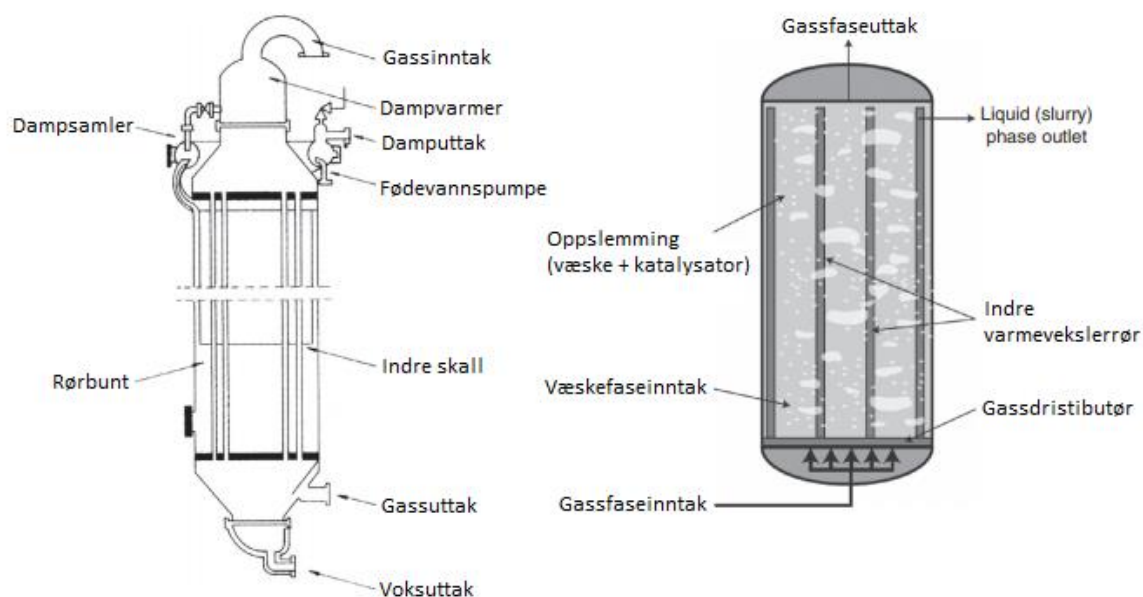
Fischer Tropsch anlegg

Det finnes en del Gtl anlegg rundt omkring i verden som bruker Fischer Tropsch prosessen til å produsere drivstoff. Noen av disse er ORYX anlegget i Qatar som er eid av Qatar Petroleum og Sasol. Dette anlegget har en kapasitet til å produsere 34 000 bbl/dag. En bbl tilsier rundt 159 l/dag [26], det vil si at dette anlegget produserer ca. 5 372 000 l/dag. To andre anlegg er Shell Bintulu anlegget i Malaysia og PEARL anlegget i Qatar. PEARL anlegget er verdens største anlegg til å konvertere naturgass til “renere-brennende” drivstoff og smøremiddel. Tre måneder etter at anlegget startet å produsere sendte de sitt første produkt, dette var i juni 2011. I slutten av 2012 nådde anlegget sitt fulle produksjonspotensiale og vil produsere ca. 3 milliarder fat av oljeekvivalent i løpet av sin levetid. PEARL anlegget er koblet opp mot et enkelt gassfelt, verdens største, “The North Field” i den Arabiske Gulven. Gassfeltet strekker seg lang kysten av Qatar og inneholder mer enn 900 billioner kubikkfot med gass, det vil si ca.150 milliarder fat med olje. Anlegget produserer ca. 260 000 bbl/dag av Gtl-produkter, noe som tilsvarer ca. 41 340 000 l/dag. Dette anlegget produserer: renere-brennende diesel, flydrivstoff, smøremidler, nafta til å lage plastikk og parafin til vaskemidler. PEARL anlegget produserer nok diesel til å fylle over 160 000 biler per dag [25, 27].

Anleggets Oppbygning

Det er tre prosesser som foregår i et Gtl anlegg, disse tre er forberedelse/produksjon av syngass, selve FT-syntesen og klargjøring av produkter. Det er mange måter man kan forberede syngassen, de mest brukte er: “Steam Reforming” (SR), “Auto Thermal reforming” (ATR) og “Partial Oxidation” (POX), man kan også kombinere flere av disse. Det er produksjonen av selve syn-gassen som er den mest kostbare delen av FT-prosessen. Det finnes to hovedtyper av reaktorer som kan brukes i FT-prosessen. Den ene heter “Slurry Bubble Column” (SBCR) og den andre “Multitubular Fixed Bed Reactor” (MTFBR). Rørreaktoren består av mange tusen rør som er fylt med små kuler eller ekstruderinger som fungerer som katalysator (2-3 mm i diameter). Rørene er et par centimeter i diameter og rundt 10 m lange. Gassen blir tilført på toppen av reaktoren mens produktet blir hentet ut fra bunnen. I Slurry Bubble Column reaktoren bruker man katalysatorpulver (korndiameter på 50 μ m). Reaktoren er sammensatt av en vertikal tank der de tre forskjellige seksjonene er i kontakt med hverandre. Gassen blir tilsatt på bunnen av reaktoren mens produktet kommer ut på toppen. Slurry Bubble Column reaktoren har en ekstern varmeveksler som produserer

damp som hjelper til å fjerne varmen i reaktoren [23]. Oversikt over oppbygningen til de to forskjellige reaktorene er vist i *Figur 7*.



Figur 7 Oversikt over oppbygningen til en Multitubular Fixed Bed Reactor (venstre) og en Slurry Bubble Column Reactor (høyre) [23].

Et Gtl anlegg kan bestå av flere reaktorer i serie (train). Disse reaktor-seriene kan bestå av et uvisst antall reaktorer, avhengig av hvor mye som skal produseres. Et anlegg kan bestå av en serie på fem reaktorer, som også er i parallell med flere serier av reaktorer. PEARL anlegget i Qatar består av 24 reaktorer, der en reaktor veier 1 200 tonn. Hver reaktor består av 29.000 rør, hvis alle rørene er var plassert etter hverandre ende til ende rørene strukket seg fra Doha til Tokyo. Dette sier bare litt om hvor stor plass et slikt anlegg som PEARL tar [28]. Viktige parameter når det kommer til reaktor er [23]:

- Varmeutvinning, FT syntesen er en høyeksotermisk reaksjon og de isoterme forholdene trenger å bli opprettholdt for at produktutbyttet blir bra.
- Separasjon av de forskjellige produktene som blir produsert: Gass, væsker og tunge hydrokarboner.
- Katalysator behandling: Erstatning/tilføring av katalysatormateriale må være lett tilgjengelig.

Fordeler med Slurry Bubble Column [23].

- Effektiv varmeoverføring.

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

- Bruken av pulver som katalysator gjør at en unngår intragranulære diffusjonsbegrensninger.
- Lett å tilføre og kvitte seg med katalysatorpulveret.
- Kan produsere under isoterme forhold.

Ulemper med Slurry Bubble Column [23].

- Vanskelig å skalere den opp i stor skala, på grunn av designkriteriene.

Fordeler med Multitubular Fixed Bed Reactor [23].

- Varmeutvinning gjøres enkelt ved å sette vann under trykk rundt rørene som produserer damp.
- Lett å skalere opp, men krever den del plass.

Ulemper med Multitubular Fixed Bed Reactor [23].

- Kan ikke produsere under isoterme forhold.
- Begrenset kapasitet.
- Når man skal skalere opp trengs det et høyt antall parallelle rør.
- Trenger en del plass.
- Vanskelig å tilføre ny katalysator, krever masse tid.
- Begrenset kapasitet per reaktorserie.

Katalysator

Det finnes i hovedsakelig to forskjellige typer FT-prosesser, høy og lav-temperatur-prosesser. Lav-temperatur FT-prosesser opererer på ca. 200°C og produserer i hovedsak tunge hydrokarboner (diesel og voks). Lav-temperatur FT-prosesser kan bruke både kobolt og jern som katalysator. Høy-temperatur FT-prosesser opererer på rundt 330 - 350°C og produserer i hovedsak lette hydrokarboner (nafta). Høy-temperatur FT-prosesser kan bare bruke jern som katalysator. Når det kommer til bruk av katalysatormateriale i reaktorene finnes det to hovedtyper av disse som blir brukt, de to materialene er kobolt (Co) og jern (Fe) [25]. Koboltkatalysatoren er mer motstandsdyktig mot slitasje enn jernkatalysatoren, men jernkatalysatoren produserer mer alkener enn koboltkatalysatoren. Siden kobolt katalysatoren er mer motstandsdyktig mot slitasje er denne bedre å bruke i «slurry» reaktoren. Viktige egenskaper for katalysatoren [23].

- Moderat stor overflate

- Porøst volum, slik at store parafinmolekyl kan diffundere igjennom
- God termisk stabilitet
- Billig
- Lett å få tak i
- Tilgjengelig i store mengder

I denne oppgaven er reaktor-typen SBCR valgt. Katalysatoren er lettere å bytte ut på en SBRC enn en MTFBR, og dette er en stor fordel fordi katalysatoren må byttes ut ofte. Noe som er minst like viktig er at reaktoren må kunne bli kvitt varme effektivt fordi reaksjonen er eksoterm og bør samtidig ideelt sett skje under isoterme forhold. SBCR har bedre kjøleegenskaper, som er til stor fordel. En ulempe er at SBCR ikke er like enkel å oppskalere som MTFBR, men akkurat her oppveier fordelene med SBCR denne ulempen. Fra

Tabell 4 kan man også se at SBCR reaktoren har nesten tre ganger så stor kapasitet som MTFBR reaktoren, noe som gjør SBCR reaktoren mer attraktiv enn MTFBR reaktoren [23].

Tabell 4 Sammenligning av Fischer-Tropsch reaktorer [23]

Type reaktor	MTFBR	SBCR
Katalysator	Ball/kuler eller ekstruderinger (2-3mm)	Pulver (10-100 µm)
Katalysatormateriale	Jern eller Kobolt	Kobolt
Temperatur (°C)	200-250	200-250
Trykk (bar)	15-25	15-25
Faser	Gass-væske-fast	Gass-væske-fast
Varmeutvinning	Skall og rør	Bunt
Isoterm	Medium	Veldig god
Trykktap	Høyt	Lavt
Katalysatorutmatting	Veldig lav	Lav til høy
Produkt/katalysator-seperering	Normal	Filtrering
Oppskalering	Lett	Vanskelig
Kapasitet per reaktorserie (l/dag)	317974,59	794936,47

Kjedelengde

I Fischer-Tropsch reaktoren blir det produsert flere ulike typer hydrokarboner, selv om det i dette tilfellet bare er parafin man trenger. Selv om reaktoren ikke bare kan produsere det man trenger, og at karbonmonoksid og hydrogen kan «sløses» bort på produksjon av andre ting er det mulig å gjøre justeringer på hvor mye man får ut av de ulike hydrokarbonene som blir produsert. Sannsynligheten for kjedevækst (α) er tett koblet til molforholdet definert av ligning ni når n er antall karboner.

$$\alpha = \frac{C_{n+1}}{C_n} \quad (9)$$

Dette gjelder ikke for metan og andre stoffer med mindre enn to karbonatomer. Tallet α er avhengig av katalysatoren, temperaturen og trykket i reaktoren og komposisjonen til gassen som blir brukt. For å optimalisere produksjonen av hydrokarboner som trengs til å lage flydrivstoff bør α være rundt 0,85 [23].

Selv etter å ha justert forholdene i Fischer-Tropsch for å optimalisere produksjon av flydrivstoff blir det produsert store mengder av større hydrokarboner. Etter Fischer-Tropsch reaksjonen blir produktene separert og de større hydrokarbonene blir brutt ned til mindre hydrokarboner ved å bruke høye temperaturer, som er en prosess kalt krakking. Krakking gjør at det blir en større andel parafin som blir produsert.

2.2 Metode og feilkilder

For å komme fram til tall på ulike prosesser har det blitt gjennomgått ulike artikler og publikasjoner. Tallene som har kommet fram er enten fra simuleringer gjort av samme eller lignende prosesser, eller fra reelle anlegg. Massestrømmene er regnet ut fra støkiometri, som vil si at det antas at 100% av karbonet blir brukt, noe som er nært det virkelige tallet på rundt 98% [29]. Energibehov, kostnader og arealbehov er avhengig av massestrømmene og tallene er basert på andre artikler.

En feilkilde er at drivstoffprisene kan variere mye i løpet av et år, og det er ting som kan spille inn på hvordan prisene beveger seg. 2020 har vært et spesielt år hvor prisene på drivstoff har gått betraktelig ned, mye på grunn av Covid-19 pandemien som har herjet rundt om i verden. På grunn av at prisen på drivstoff har gått ned, gir dette oss en feilkilde, men vi har prøvd å regne gjennomsnittsverdier for 2020, så feilkilden skal ikke være så altfor stor. En annen feilkilde som alltid vil være til stede er at det stadig skjer ting ved utvikling av teknologien. Dette gjør at man alltid kan finne en bedre måte å gjøre ting på. For eksempel vil

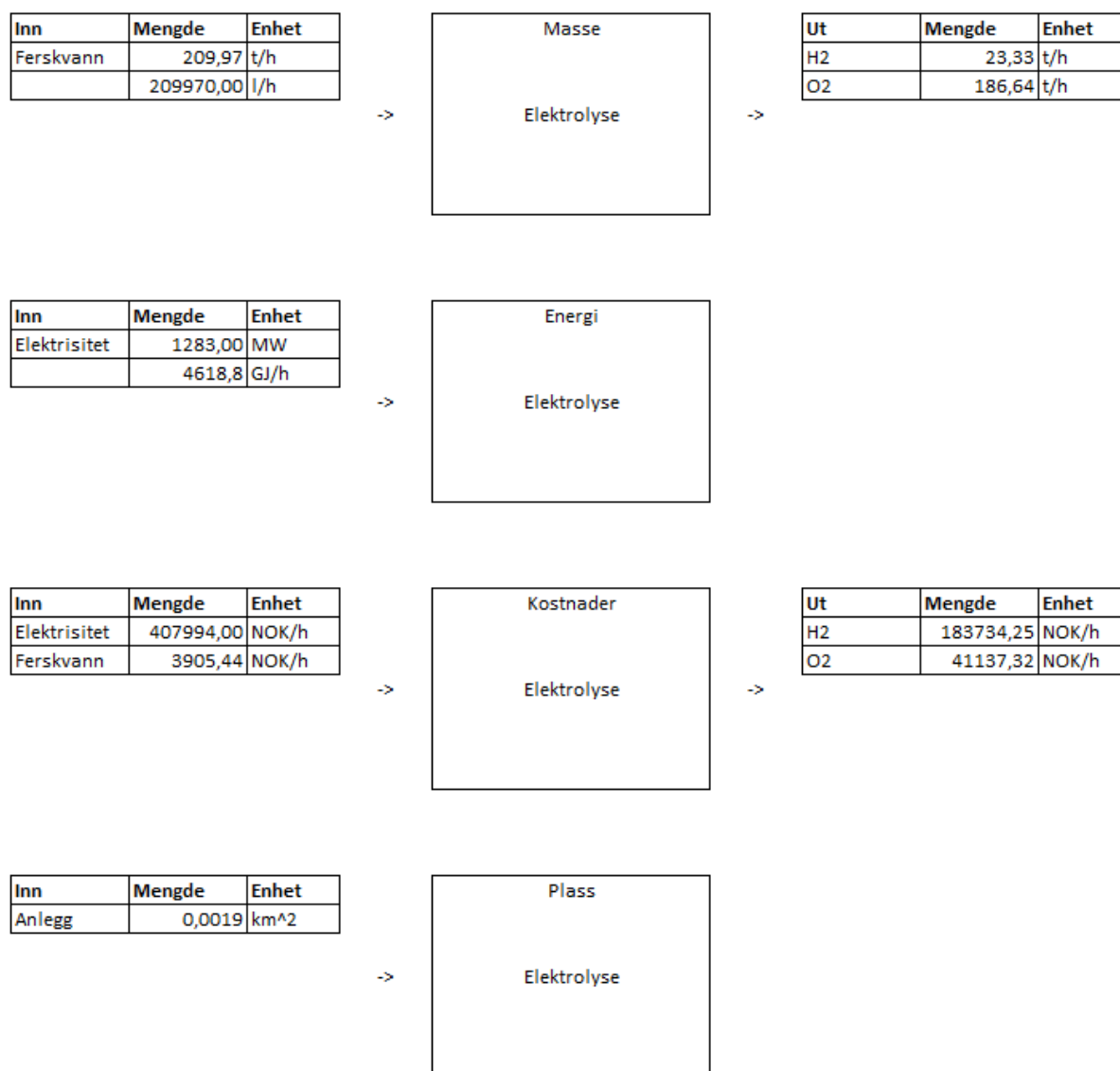
ny teknologi fra Sunfire redusere behovet for elektrisk energi som trengs for en kg hydrogen fra 55 kWh, som er vanlig for PEM, til 41,4 kWh ved å bruke spillvarme fra industri [30]. Karbonfangst som er relativt nytt blir stadig jobbet med for å bli forbedret. Elektrolyse og FT-prosessen har lenge vært til stede, men teknologien vil alltid utvikle seg. Vi har tatt utgangspunkt i Carbon Engineering sin teknologi og denne er fra 2018, så det er en del teknologi som kan ha blitt utviklet i løpet av disse to årene. En er alltid på utkikk etter utviklinger for å optimalisere, noe som vil føre til feilkilder ved bruk av utdatert teknologi.

3. Resultat

I denne delen presenteres massestrømmer, energibehov, kostnader assosiert med massestrømmer/energiebehov og landareal som trengs for hver enkelt prosess.

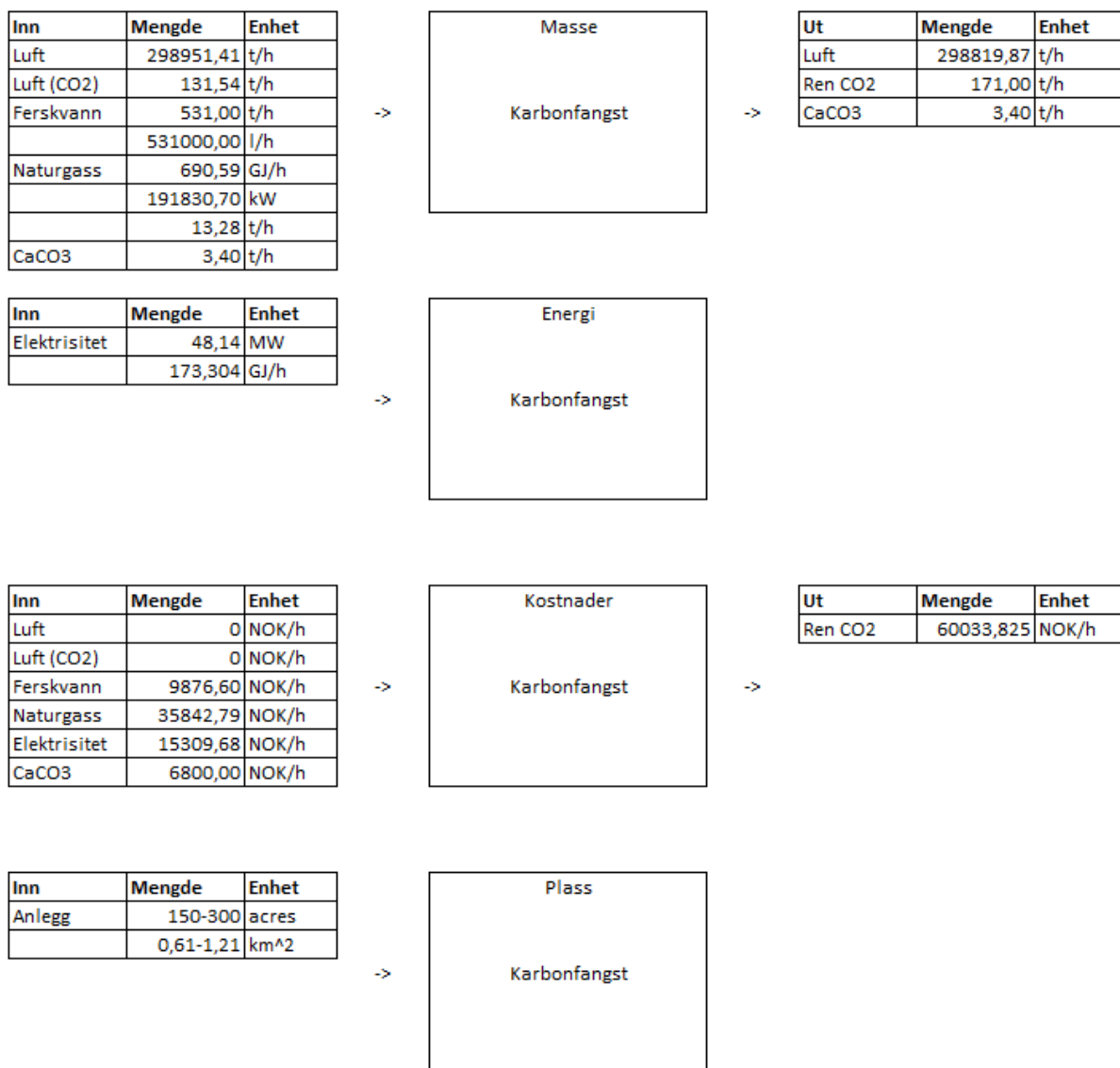
I tillegg presenteres en ressursoversikt over hvor store ressurser som blir brukt til å produsere en liter med parafin.

Figur 8, Figur 9, Figur 10 og Figur 11 viser hva som går inn i en prosess på venstre side og hva som kommer ut på høyre side. For boksen med kostnader blir det på høyre side verdien på det som kommer “ut”.



Figur 8 Prosessoversikt for elektrolyse

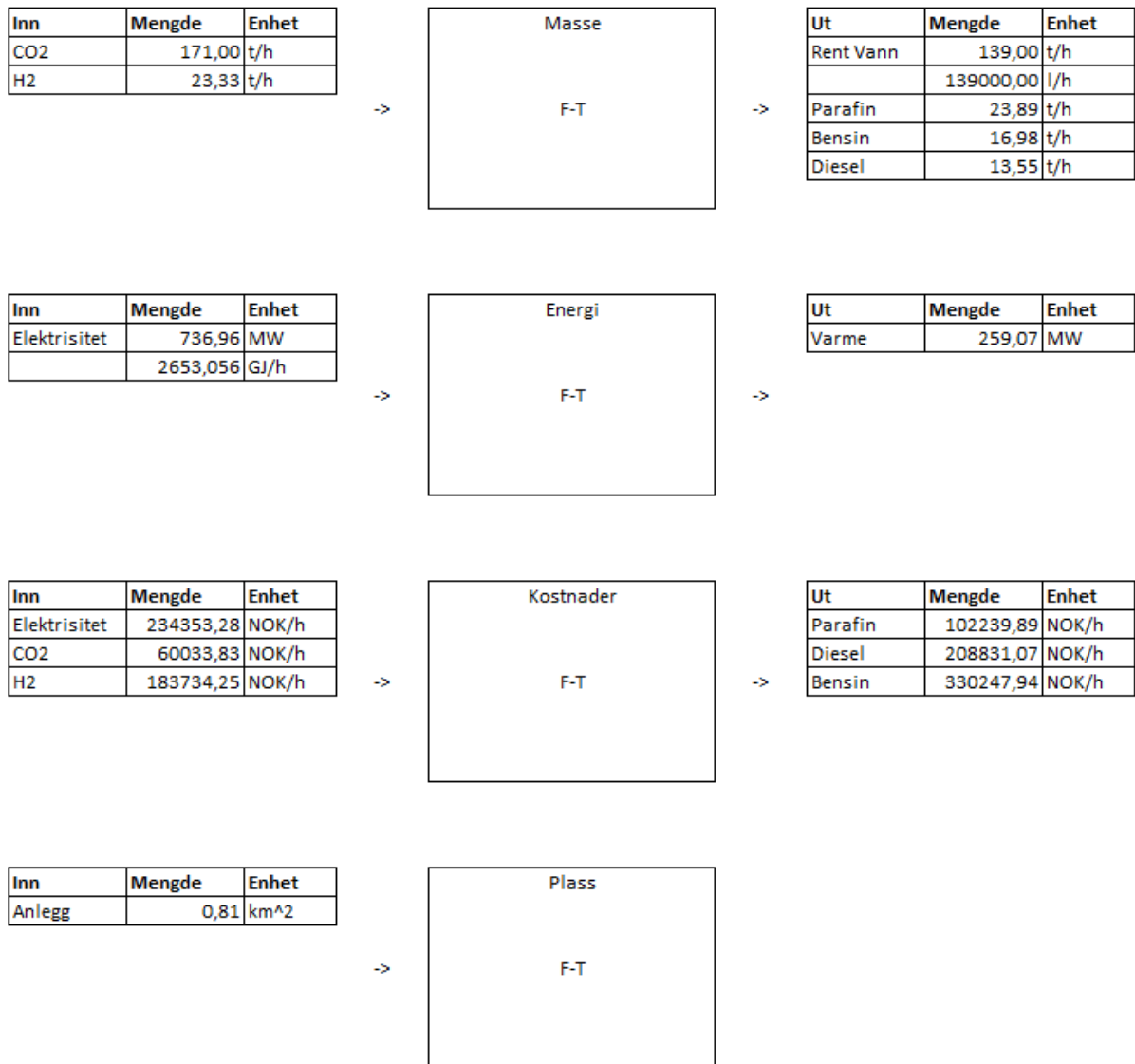
Som vist i *Figur 8* blir det fra elektrolysen produsert en stor del oksygen som ikke blir brukt i videre prosesser, men som kan selges. Elektrolysen er den prosessen som krever størst mengde energi, noe som gjør den ganske kostbar. Den krever også et stort landareal for å få plass til alle elektrolyseenhetene som trengs for å produsere nok hydrogen.



Figur 9 Prosessoversikt for karbonfangst

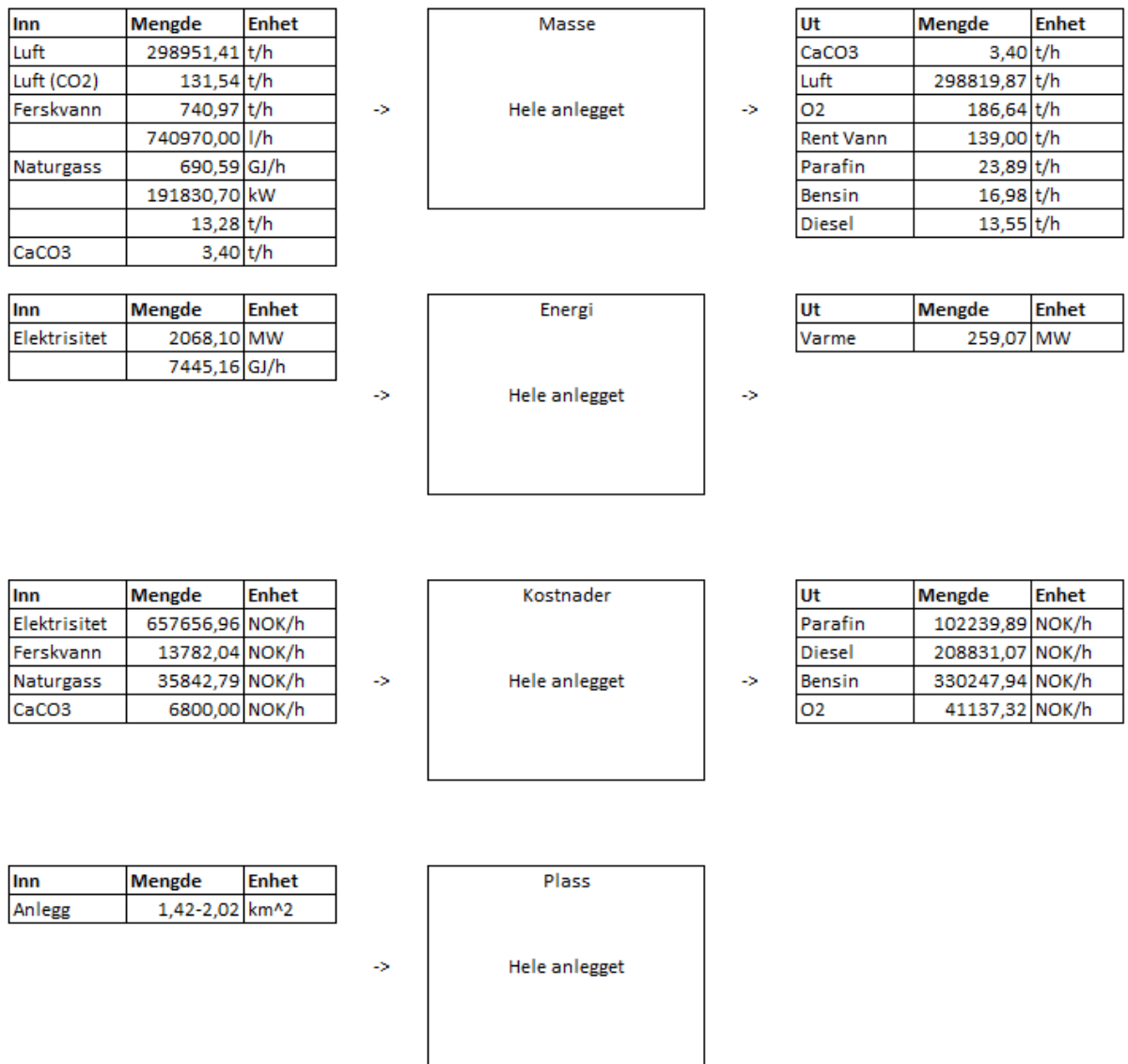
For *Figur 9* er alle tallene fra artikkelen skrevet av Carbon Engineering [21], og er hva resten av prosessene er basert på, siden mengden på flydrivstoff som blir produsert er avhengig av hvor mye CO₂ som blir fanget.

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart



Figur 10 Prosessoversikt for Fischer-Tropsch reaksjon

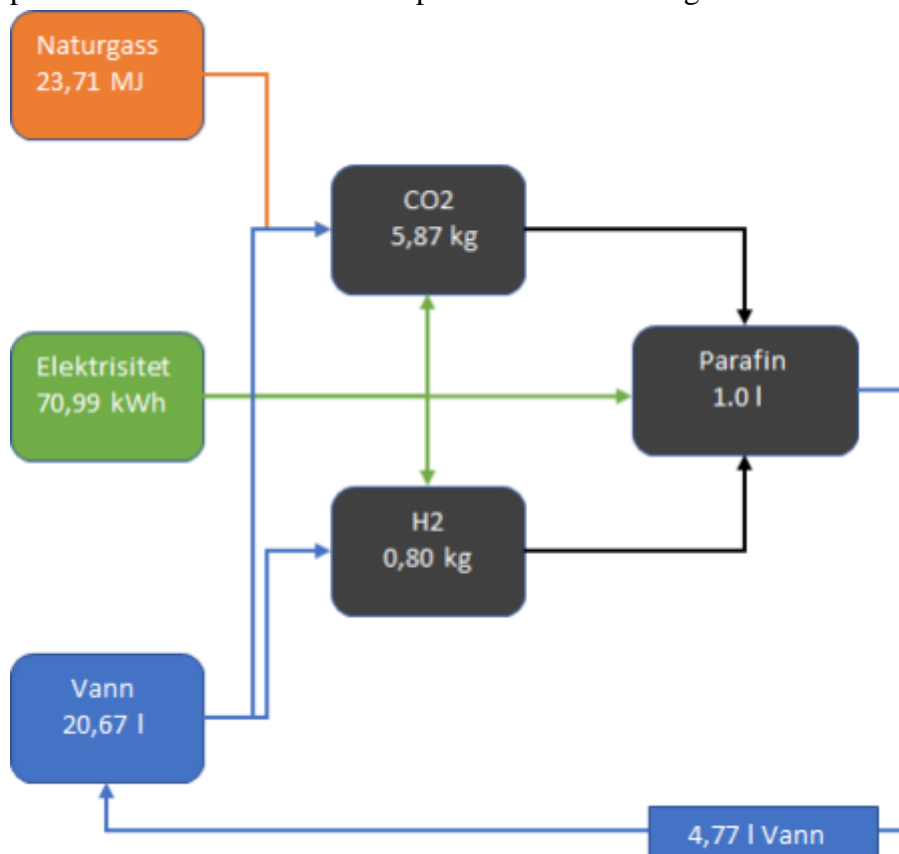
Figur 10 viser prosessoversikten for Fischer-Tropsch reaksjonen, og her er revers vann-gass skiftreaksjonen og raffineringen tatt med.



Figur 11 Prosessoversikt for hele anlegget

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Figur 12 er en oversikt over hvilke og hvor store ressurser som trengs for å lage en liter parafin. Pilene indikerer hvilke prosesser ressursene går til.



Figur 12 Ressursoversikt for en liter parafin

Det er også regnet ut enkelte verdier på behovet til Vestland, som er vist i Figur 13.

Tallverdiene for utslipp og forbruk av parafin er hentet fra en artikkel fra Statistisk Sentralbyrå [31].

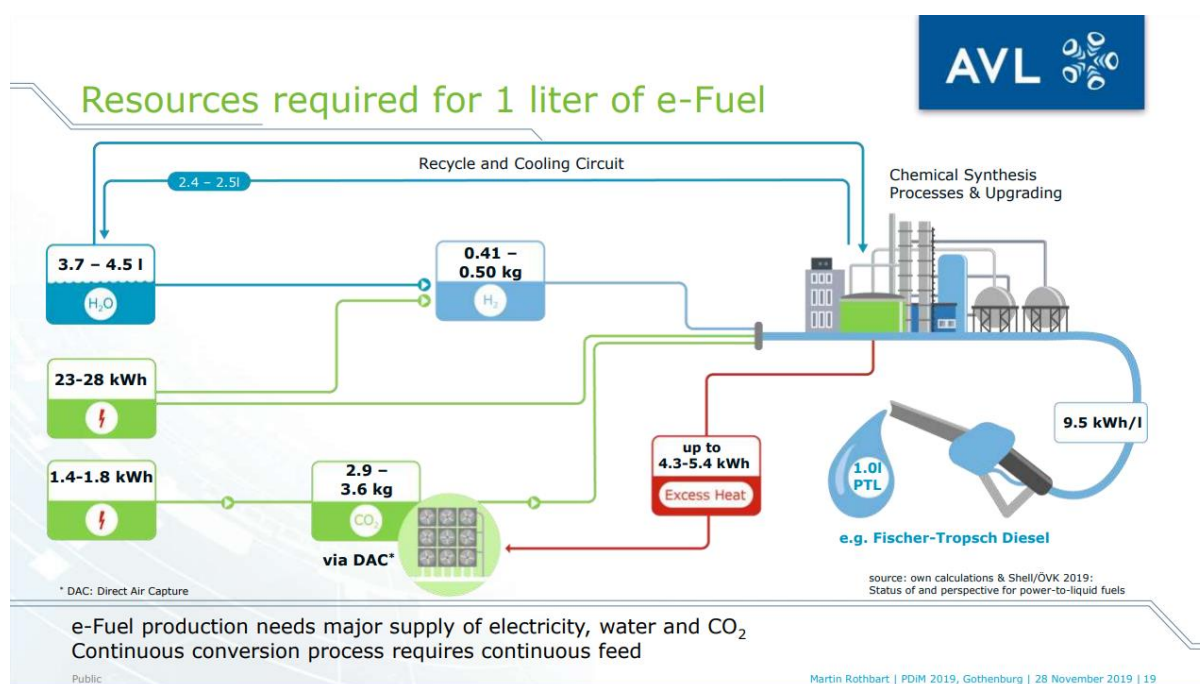
Årlig forbruk av jetparafin til rutetrafikk: 194,6 kilotonn	Produksjon av parafin fra ett PTL anlegg 23,89 t/h	
Plass	209276,4 tonn i året	
Trenger	1,42-2,02 km ²	Pris per liter: 8,35 NOK
Per full skala anlegg		Pris for å dekke Norges behov: 2031137500 NOK
	NOx (tonn/år)	CO (tonn/år)
Total utslipp sivile flyplasser per år:	1284	1898
Flesland:	183	235
Prosent av total fra Flesland:	14,25233645	12,38145416

Figur 13 Utklipp fra vedlagt exceldokument som omhandler Norge og Flesland

4. Diskusjon

Det finnes allerede flere analyser av hva som kreves av ressurser for å produsere syntetisk drivstoff fra karbondioksid fanget direkte fra luften. For eksempel AVL publiserte i 2019 en slik analyse [32], og samme år ble det også laget en rapport kalt «Nordic GTL -a pre-feasibility study on sustainable aviation fuel from biogas, hydrogen and CO₂» av flere selskaper i samarbeid [33].

Det finnes mange typer flydrivstoff, og de blir definert av kjemiske egenskaper heller enn hvilke hydrokarboner de er laget av. For å holde det enkelt er fokus i denne oppgaven på parafin, selv om flydrivstoff vanligvis også inneholder andre hydrokarboner. En viktig forskjell mellom AVL-rapporten og denne oppgaven er at her er det regnet ut hva som kreves for en liter parafin, mens i AVL rapporten er det regnet ut for en liter av alle drivstofftypene som blir produsert til sammen. Dette gjør at ressursbehovet i AVL-rapporten er en god del mindre enn i denne oppgaven. Parafin utgjør 43,90% av drivstoffene, som betyr at for å produsere en liter av hele mengden syntetisk drivstoff blir energibehovet omtrent halvert. Energibehovet for å produsere en liter av hele mengden av syntetisk drivstoff blir da omtrent 35,5kWh, som er omtrent det samme som det øvre estimatet til AVL. AVL estimerer at det vil kreve totalt 28,7-35,2kWh med energi å produsere en liter av hele mengden av syntetisk drivstoff, som vist i *Figur 13*. Dette tyder på at å optimalisere for parafinproduksjon ikke fører til store tap i energieffektiviteten.



Figur 14 Ressursoversikt fra AVL, ressurser for en liter syntetisk drivstoff [32]

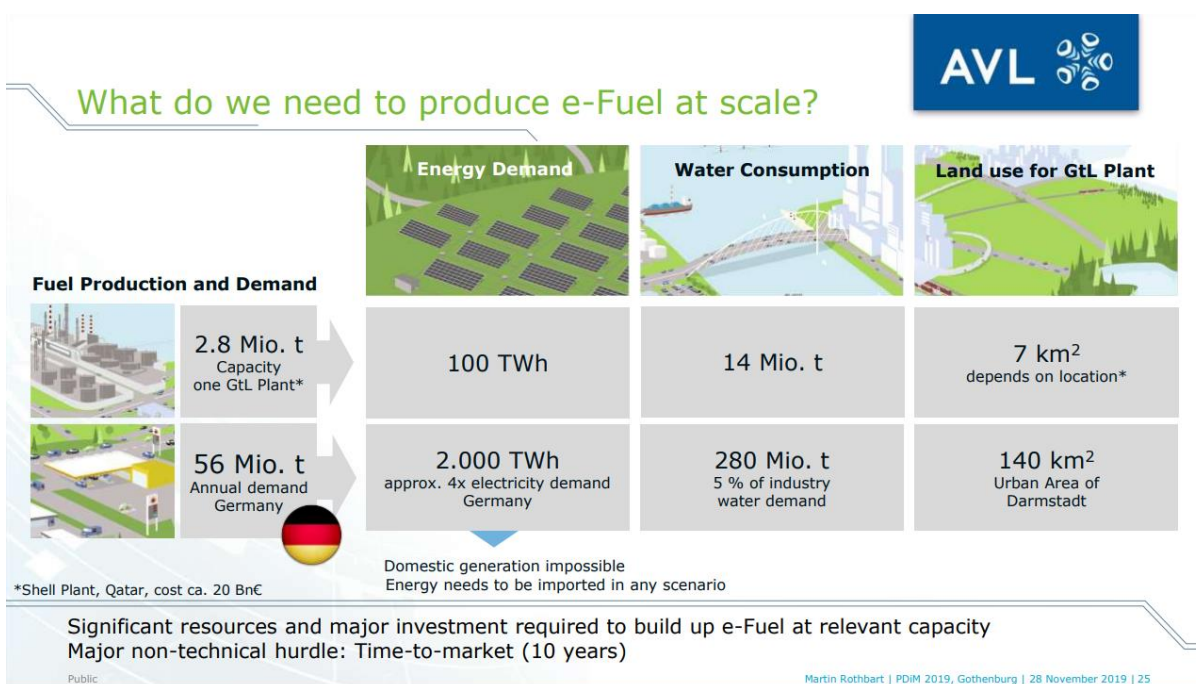
Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

Vannforbruk er der derimot annerledes med. For å produsere en liter parafin kreves det fire ganger mer vann enn det AVL har beregnet. Hvis vi gjenvinner vannet som blir produsert i prosessen reduseres vannbehovet for å produsere en liter parafin fra 20 liter til 15,23 liter. Selv om vi i tillegg kompenserer for at parafin utgjør under halvparten av drivstoffene som blir produsert, er vannbehovet fortsatt betydelig større enn de maks 4,5 literne som er beregnet av AVL.

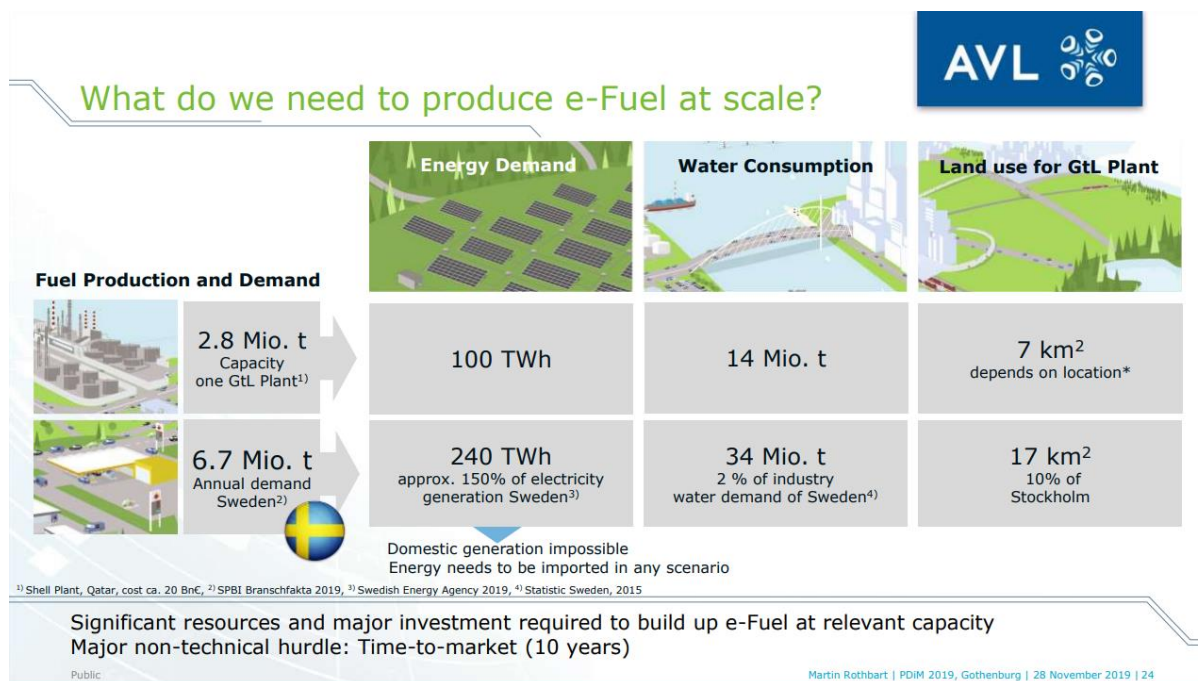
Areal

Ifølge beregningene i denne oppgaven kreves det 1,42-2,02 km² for å lage et anlegg som kan produsere 23,89 tonn parafin i timen. 23,89 tonn i timen tilsvarer 209 276,4 tonn i året hvis vi antar at anlegget er i drift hele døgnet hver dag. Dette betyr at det blir produsert omtrent 105000 tonn parafin per km² i året. Totalt blir det produsert 54,42 tonn av hele mengden av syntetisk drivstoff i timen, som tilsvarer 476 719,2 tonn i året og omtrent 238 000 tonn per km² i året. Fra *Figur 15* og *Figur 16* ser vi i AVLs rapport at anlegget krev et areal på 7 km² og produserer 2,8 millioner tonn i året.

Dette betyr at det vil bli produsert 400 000 tonn av hele mengden av syntetisk drivstoff per km² i året. Anlegget i AVLs rapport bruker dermed plassen en god del mer effektivt. AVL har basert utregningene på at alt skjer i ett stort anlegg. Dette gjør at plassbruken blir mer effektiv, men hvis etterspørselen for syntetisk drivstoff synker, vil det være mindre økonomisk å holde i drift et stort anlegg sammenlignet med et mindre anlegg.



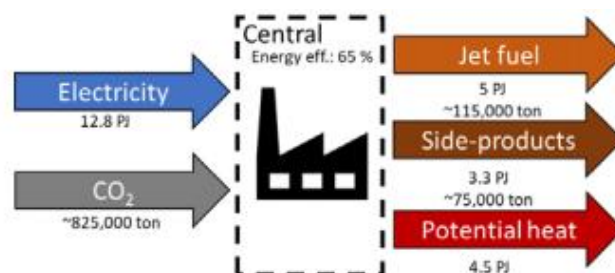
Figur 15 Ressursoversikt fra AVL, produksjon av syntetisk drivstoff i Tyskland [32]



Figur 16 Ressursoversikt fra AVL, produksjon av syntetisk drivstoff i Sverige [32]

Energibehov per liter

I Nordic GTL-rapporten er det også optimalisert for parafinproduksjon, og det er i tillegg beregnet hvor mye flydrivstoff som blir produsert. Figur 17 viser at det kreves 12,8 PJ med elektrisk energi å produsere 115 000 tonn flydrivstoff.



Figur 17 Forenklet oversikt over produksjon av drivstoff fra karbonfangst fra Nordic PTL [33].

Det vil si at det kreves 111,3 MJ for å produsere et kilo flydrivstoff pluss biprodukter. Siden tettheten til flydrivstoff er omtrent 0,8 kg/L vil det si at det krever 89 MJ for å produsere en liter flydrivstoff, som tilsvarer 24,7 kWh/L [34]. Dette er lavere enn for reaktorene i både AVLs rapport og i denne oppgaven. Her er de ikke blitt tatt hensyn til energibehovet til karbonfangstanlegget. Hvis man bruker andelen av energibehovet til å lage en liter drivstoff som går til karbonfangstanlegget i denne oppgaven, som er 1,65 kWh, og legger den til

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

energibehovet til drivstoffproduksjonen i Nordic GTL rapporten får vi 26,35 kWh/L, som fortsatt er lavere enn energibehovet i denne oppgaven og AVLs rapport.

Energieffektiviteten til prosessen i denne oppgaven kan optimaliseres ved å utnytte spillvarmen. Det blir produsert mye varme i Fischer-Tropsch reaktoren, og dette kan brukes til delvis å dekke varmebehovet til karbonfangstanlegget, slik at mindre elektrisk energi må brukes til oppvarming. Det kan i tillegg muligens brukes spillvarme fra andre industrier til videre reduksjon av energikravet. Spillvarmeutnyttelse vil likevel ikke ha en dramatisk virkning på energibehovet, siden det meste av energibehovet kommer fra elektrolysen av vann, som dessverre ikke kan dra nytte av spillvarmen.

Pris per liter

Som vist i *Figur 12* kreves det 23,71 MJ naturgass, 70,00 kWh elektrisitet og 20,67 liter vann for å produsere en liter parafin. I prosessen blir det produsert 4,77 liter vann som kan brukes igjen av prosessen, som reduserer vannbehovet til 15,90 liter. Kostnadene til naturgass, elektrisitet og vann kan variere, men i denne oppgaven er det antatt en strømpris på 318 NOK/MWh, naturgass pris på 2,699 NOK/kg og en vannpris på 2EUR/t [35, 36, 37]. Siden 1 MJ naturgass tilsvarer omtrent 0,02 kg betyr det da at prisen på naturgassen som kreves for å lage en liter parafin er 1,28 NOK [38]. Strømkostnadene er 22,26 NOK og vannkostnadene er 0,041 EUR. Gjennomsnittsverdien på euro har vert omtrent 9,3 NOK i gjennomsnitt over de siste ti årene, så vannkostnadene blir da omtrent 0,38 NOK [39]. Totalt blir kostnadene for å produsere en liter parafin dermed 23,92 NOK hvis vi ser bort fra biproduktene, arbeidskraft og vedlikehold. For hvert kilo parafin som blir produsert blir det også produsert blant annet 0,71 kg bensin, 0,57 kg diesel og 7,81 kg oksygen. Disse stoffene kan selges, som vil gjøre produksjonen av flydrivstoff mer økonomisk. Siden parafin har en tetthet på omtrent 0,8 kg/L betyr det at for hver liter parafin som produseres blir det produsert omtrent 0,57 kg bensin, 0,46 kg diesel og 6,25 kg oksygen. Prisene på disse stoffene kan variere en god del, og her er verdiene som er brukt 19,45 NOK/kg for bensin, 15,41 NOK/kg for diesel og 23,7 EUR/t for oksygen brukt. Fortjenestene blir dermed 11,09 NOK for bensin, 7,09 NOK for diesel og 1,38 NOK for oksygen for hver liter parafin som blir produsert. Med en fortjeneste på 19,56 NOK fra biproduktene for hver liter parafin som blir produsert ser det ut til at produksjonen er svært lønnsom, men utregningene av hva det vil koste å produsere drivstoffet tar ikke hensyn til arbeidskraft og vedlikehold, som vil tilføre ekstra kostnader.

Det er vanskelig å finne ut hva arbeidskraft, vedlikehold, skatt osv vil koste, men det kan estimeres. I artikkelen «Cost calculations for three different approaches of biofuel production

using biomass, electricity and CO₂» [40] beregnes det at slike kostnader vil utgjøre omtrent 11 % av kostnadene. Artikkelen beregnet også at kostnader for å betale lån kom til å utgjøre 17 % av driftskostnadene, og har ikke inkludert karbonfangstanlegget. For å holde det enkelt ser man vekk i fra dette og sammenligner kostnadene for arbeidskraft og vedlikehold med kostnadene for råvarene og energien, og antar at karbonfangstanlegget ikke krever spesielt store utgifter til å betale ansatte. Omtrent 70% av kostnadene gikk til råvarer og strøm, som betyr at dette koster omtrent syv ganger mer enn arbeidskraft og vedlikehold. Dette vil øke prisen for å produsere en liter parafin fra 23,92 NOK til 27,91 NOK.

Som regnet ut tidligere kan biproduktene fra produksjonen av en liter parafin selges for 19,56 NOK. Hvis fortjenestene går til å dekke produksjonskostnadene vil det da koste 8,35 NOK å produsere en liter parafin. Denne verdien er ganske usikker av flere grunner. Priser på bensin, diesel, oksygen og strøm er varierende. Dessuten bruker flere av utregningene en god del forenklinger. Likevel er denne verdien sammenlignbar med Nordic GTL. Nordic GTL beregner at det i 2030 kommer til å koste 0,7-1,2 EUR for å lage en liter flydrivstoff. Dette tilsvarer 6,51-11,16 NOK. Dermed er altså tallene svært like, som øker sannsynligheten for at de er riktige.

Flesland og Norge generelt

Men hvilken betydning har disse verdiene for om slik produksjon egner seg på Vestlandet i Norge? I Norge var det rapporterte jetparafinforbruket fra rutefly/charterfly på 194,6 kilotonn i 1995 (SAS ikke inkludert) [31]. Hvis det koster 8,35 NOK å produsere en liter syntetisk flydrivstoff vil det koste over 2 milliarder kroner å dekke Norges behov for drivstoff til rutefly. Ett PTL anlegg med et karbonfangstanlegg fra Carbon Engineering produserer 209,3 kilotonn i året hvis det er i drift konstant. Forbruket har vært i stigning lenge, og for innenriksfart steg det med 70% fra 1985 til 1995, og har også mest sannsynlig fortsatt med å stige frem mot 2020 [31]. Anlegget kommer heller ikke til å være i drift hele tiden, så ett anlegg er mest sannsynlig ikke nok til å dekke hele dette behovet i dag.

Men hva med kun Flesland? Flesland står bak omtrent 12% av karbonmonoksid og 14% av NO_x utslippene til alle norske sivile flyplasser [31]. Selv om det kan være vanskelig å finne tall på hvor mye drivstoff Flesland trenger, kan det estimeres fra utslippene til å være et sted rundt 13% av behovet til all rutetraffikk i Norge. Drivstoffbehovet blir da omtrent 25 kilotonn i året. Et anlegg nedskalert til å dekke dette behovet vil ikke ha et arealbehov på mer enn 185-263 m² hvis beregningene stemmer. Det er også enkelte forhold på Vestlandet som er gunstig for karbonfangst. Vestland er fylket som produserer mest energi i Norge, og står bak hele

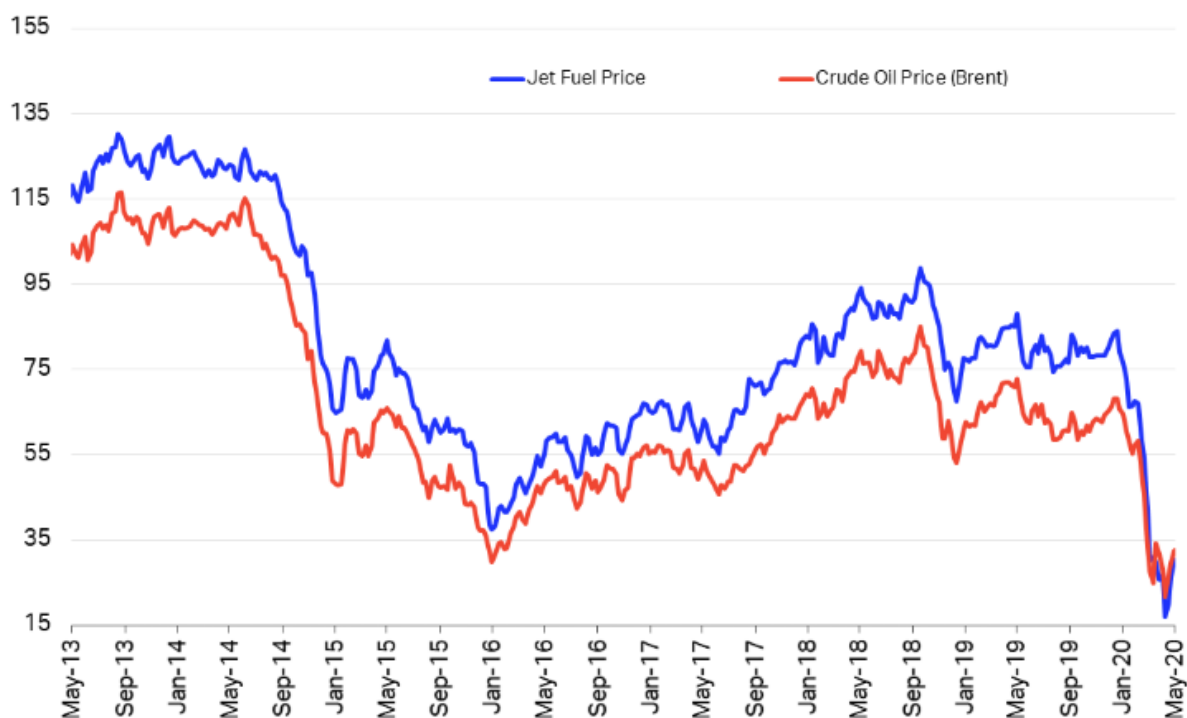
Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

25% av landets strømproduksjon. Strømmen kommer hovedsakelig fra vannkraft [41].

Vestland har altså rikelig med ferskvann og energi, som fører til at hvis et PTL anlegg bygges på Vestlandet vil logistikk-kostnadene være lave ettersom ressursene har kort reisevei.

Fossilt flydrivstoff

Prisen på fossilt flydrivstoff varierer kraftig. Som vist i *Figur 18* var den over 95 EUR per fat i september 2013, mens i januar 2016 hadde den sunket til under 35 EUR per fat på det laveste. Koronaviruset og oljepriskrigen mellom Russland og Saudi-Arabia har gjort at våren 2020 er prisen enda lavere, og i mai var den rundt 15 EUR per fat [42]. Siden prisen kan variere mye, kan det være vanskelig å sammenligne den med prisen på andre ting, som for eksempel syntetisk drivstoff. Prisen som blir brukt i denne oppgaven er en estimert gjennomsnittspris fra de siste syv årene. I tillegg blir det brukt ulike priser fra ulike tidspunkt, og dette er for å få en oversikt over variasjonen i lønnsomhet.



Figur 18 Graf som viser prisen på flydrivstoff over tid (USD/barrel) [42].

5. Konklusjon

Et anlegg slik det som er omtalt i denne oppgaven vil kunne fange 131 tonn karbondioksid i timen. En stor fordel med anleggene til Carbon Engineering er at de er modulære og dermed skaleres etter behov, slik at hvis det er nødvendig å fange mer karbondioksid enn denne verdien, eller hvis et mindre anlegg er ønsket, kan det lett bli laget i den ønskede størrelsen [21]. Ut ifra beregningene vil det produseres 23,89 tonn parafin per time fra Fischer-Tropsch prosessen, som utgjør ca. 600 tonn parafin per dag. Det produseres også 16,98 tonn bensin per time fra Fischer-Tropsch anlegget som kan selges eller brukes. Det samme gjelder også for diesel, der det blir produsert 13,55 tonn per time. Det produserer også en del vann fra FT-anlegget, 139 tonn per time, som kan brukes til å dekke deler av vannbehovet til elektrolysen og/eller karbonfangstanlegget. Via elektrolysen produseres det 23,33 tonn H₂ per time som blir brukt i Fischer-Tropsch anlegget til å produsere Gtl-produkter. Det produseres også 186 tonn oksygen per time fra elektrolysen som kan selges. Det som gjør at elektrolyseprosessen har så høye kostnader er at den krever veldig mye energi, og ut ifra beregningene er energibehovet 1 283 MW elektrisitet for å produsere 23,33 tonn H₂ per time. Fra karbonfangstanlegget blir det produsert 171 tonn ren CO₂ per time, som går videre til FT-anlegget til produksjon av Gtl-produkter. Karbonfangstanlegget krever ikke mye energi (48 MW), og deler av energibehovet kan dekkes ved å bruke spillvarme fra FT-anlegget (259 MW).

Totalt for hele anlegget kreves en energitilførsel på 2 068,10 MW, som kan reduseres til en viss grad hvis spillvarmen fra FT-prosessen hadde blitt utnyttet. Når man skal produsere noe i så stor skala trenger man et stort anlegg, ifølge beregningene vil hele anlegget (elektrolyse, DAC og FT) ta opp et areal på ca. 2,02 km².

Som nevnt i slutten av diskusjonsdelen, og illustrert av *Figur 18*, varierer prisen på flydrivstoff kraftig. Ut ifra grafen kan vi anta en gjennomsnittspris på omtrent 75 USD per fat, som tilsvarer 742,5 NOK per fat hvis vi bruker dollarprisen fra 21.03.2020 som var på 9,9 NOK. Prisen per liter blir dermed 4,7 NOK/L. Siden prisen for å produsere en liter parafin fra karbondioksid er 8,35 NOK betyr dette at det vanligvis ikke vil være lønnsomt å produsere drivstoff fra karbondioksid uten spesielle forhold. Men prisen på flydrivstoff kan variere kraftig, og i noen perioder er den svært høy. I slutten av 2013 var prisen over 120 USD per fat, som tilsvarer 1 188 NOK per fat eller 7,5 NOK/L. Denne prisen er heller ikke høy nok til at produksjon av flydrivstoff fra karbonfangst blir lønnsomt. Produksjon av flydrivstoff fra karbondioksid fanget direkte fra luften kan bli lønnsomt hvis flydrivstoff produsert fra råolje

Teknisk-økonomisk analyse av karbonfangst og syntetisk drivstoffproduksjon til bruk i karbon-nøytral luftfart

pålegges skatt. Denne kan variere basert på prisen uten skatt, og kan være nesten helt nede i 10% i enkelte perioder, men i gjennomsnitt må den være på nesten 50%. I tillegg kan det være en ide å gi enkelte skattefridrag til flyselskaper som bruker karbonnøytralt drivstoff, som vil gjøre at CO₂-taksten ikke trenger å være like høy.

Norge har hatt en ganske høy avgift på karbondioksidutslipp på 51 USD per tonn karbondioksid siden 1991 [43]. Dette tilsvarer omtrent 505 NOK per tonn eller 0,5 NOK per kg. For hvert kg-flydrivstoff som blir brent produseres det omtrent 3 kg karbondioksid [44], som vil si at det er en avgift på omtrent 1,5 NOK per kilo flydrivstoff, eller 1,2 NOK/L. Gjennomsnittsprisen på flydrivstoff blir da 4,9 NOK/L. Denne avgiften regnes allerede som høy, og det kan dermed være vanskelig å få den økt ytterligere. Hvis kun CO₂-avgifter blir brukt for å gjøre syntetisk drivstoff konkurransedyktig, må de være høyere. Avgiftene på fossilt flydrivstoff må være på 3,7 NOK/L, eller 4,625 NOK/kg for at gjennomsnittsprisen på syntetisk drivstoff skal være konkurransedyktig, som tilsvarer omtrent 1,6 NOK/kg karbondioksid eller 171,3 USD/t i CO₂-avgift.

Foreløpig er det mulig, men vanskelig, å gjøre produksjon av syntetisk drivstoff fra karbondioksid fanget direkte fra luften lønnsomt. Forbedring av teknologien vil kunne gjøre det mer lønnsomt, men hovedkilden til driftskostnadene er elektrisiteten som kreves til hydrogenproduksjonen. Her setter fysikken grense på hvor mye forbedring som kan gjøres. Råvarer og strøm koster 23,92 NOK for en liter der 22,26 NOK (93%) er kun til strøm alene. For å redusere prisen for en liter parafin fra 8,35 NOK til prisen på dagens flydrivstoff (4,9 NOK inkludert karbontakst) må strømprisen falle til 18,81NOK per liter syntetisk parafin, en nedgang på 15,5%.

6. Referanser

i

-
- [1] ATAG, "ATAG," Air Transport Action Group, Januar 2020. [Online]. Available: <https://www.atag.org/facts-figures.html>. [Accessed Februar 2020].
 - [2] Anonym, «Europa,» 23 November 2016. [Internett]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en. [Funnen 18 Februar 2020].
 - [3] Carbon Engineering, «Carbon Engineering,» 2020. [Internett]. Available: <https://carbonengineering.com/uses/#case2>. [Funnen 15 Mai 2020].
 - [4] DVGW, «Power to Gas: Schlüsseltechnologie der Energiewende,» 25 November 2019. [Internett]. Available: <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/power-to-gas/>. [Funnen 25 Februar 2020].
 - [5] Nordic Blue Crude, «Transforming energy, saving the Earth,» Nordic Blue Crude, Desember 2019. [Internett]. Available: <https://nordicbluecrude.no/>. [Funnen 25 Februar 2020].
 - [6] K.-E. Helle, «Klimagassutslippet fra ulike reisemåter,» 8 April 2020. [Internett]. Available: <https://www.framtiden.no/gronne-tips/reise-og-transport/klimagassutslippet-fra-ulike-reisemater.html>. [Funnen 22 April 2020].
 - [7] U. Blindheim, «Fischer-Tropsch-prosessen,» 14 Februar 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/Fischer%E2%80%93Tropsch-prosessen>. [Funnen 31 Mai 2020].
 - [8] E. De Rossi, E. P. Frigo, H. J. Alves, R. A. Bariccatti, C. A. Lindino, C. T. Eckert og K. G. Dos Santos, «Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review,» 2016. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116306372>. [Funnen 14 April 2020].
 - [9] E. Jordanger, S. Møller-Holst, O. Maurstad og D. A. Breivik, «Hydrogen som energibærer Energi- og utslippsregnskap for utvalgte energikjeder,» Oktober 2002. [Internett]. Available: http://tema.miljodirektoratet.no/old/klif/nyheter/dokumenter/hydrogen_energibaerer.pdf. [Funnen 29 Mai 2020].
 - [10] UngEnergi, «UngEnergi,» 19 Juli 2019. [Internett]. Available: <https://ungenergi.no/energibaerere/ovrige-energibaerere/hydrogen/>. [Funnen 14 April 2020].
 - [11] Office of energy efficiency & renewable energy, «Hydrogen Production: Electrolysis,» [Internett]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>. [Funnen 14 April 2020].
 - [12] D. H. König, M. Freiberg, R.-U. Dietrich og A. Wörner, «Techno-economic study of the storage of fluctuating renewable energy in liquid hydrocarbons,» *Fuel*, pp. 289-297, 1 November 2015.
 - [13] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel og D. Stolten, «A comprehensive review on PEM water electrolysis,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 4901-4934, 22 April 2013.
 - [14] C. Woodford, «How does an electrolyzer work?,» Explainthatstuff, 15 Mars 2020. [Internett]. Available: <https://www.explainthatstuff.com/fuelcells.html>. [Funnen 14 April 2020].
 - [15] McPhy, «Electrolyzers for light hydrogen production or interrupted operating mode,» [Internett]. Available: <https://mcphy.com/en/our-products-and-solutions/electrolyzers/small-and-medium-capacity/>. [Funnen 14 april 2020].
 - [16] McPhy, «Electrolyzers for continuous and automated hydrogen production, at a large scale,» [Internett]. Available: <https://mcphy.com/en/our-products-and-solutions/electrolyzers/large-capacity/>. [Funnen 14 april 2020].

- [17] McPhy, «New generation of pressurized alkaline electrolysis for large-scale platforms (multi-MW/GW),» [Internett]. Available: <https://mcphy.com/en/our-products-and-solutions/electrolyzers/augmented-mclyzer/>. [Funnen 5 april 2020].
- [18] Hydrogenics, «State of play and developments of power-to-hydrogen technologies,» i *ETIP Wind workshop on Wind-to-Hydrogen*, Brussels, 2019.
- [19] Reblock, «Oversikt over de vanligste container dimensjoner,» [Internett]. Available: <https://reblock.no/oversikt-over-de-vanligste-container-dimensjoner/>. [Funnen 29 Mai 2020].
- [20] G. M. Brekke, «Fornybar energiforsyning til Svalbard-Longyearbyen,» Statkraft, Longyearbyen, 2018.
- [21] D. W. Keith, G. Holmes, D. S. Angelo og K. Heidel, «A process for capturing CO₂ from the atmosphere,» *Joule*, vol. 2, nr. 8, pp. 1573-1594, 2018.
- [22] V. K. Guda, P. H. Steele, V. K. Penmetsa og Q. Li, «Fast Pyrolysis of Biomass: Recent Advances in Fast Pyrolysis Technology,» i *Fast Pyrolysis of Biomass: Recent Advances in Fast Pyrolysis Technology*, 2015, pp. 177-211.
- [23] C. Boyer, J. Gazarian, V. Lecocq, S. Maury, A. Forret, J. Schweitzer og V. Souchon, «Development of the Fischer-Tropsch Process: From the Reaction Concept to the Process Book,» HAL, Lyon, 2016.
- [24] L. Pastor-Perez, F. Baibars, E. Le Sache, H. Arellano-Garcia, S. Gu og T. R. Reina, «CO₂ Valorisation via Reverse Water-Gas Shift reaction using advanced Cs doped Fe-Cu/Al₂O₃ catalyst,» *CO₂ Utilization*, pp. 423-428, Oktober 2017.
- [25] O. K. Nordvåg, «Modelling and optimization of a Gas-to-Liquid plant,» NTNU, Trondheim, 2012.
- [26] Advancedconverter.com, «Conversion Barrel per day to Liter per day,» [Internett]. Available: <https://www.advancedconverter.com/unit-conversions/flow-conversion/barrels-per-day-to-liters-per-day>. [Funnen 21 April 2020].
- [27] Shell, «The World`s largest gas-to-liquids plant,» [Internett]. Available: <https://www.shell.com/about-us/major-projects/pearl-gtl/the-world-s-largest-gas-to-liquids-plant.html>. [Funnen 14 April 2020].
- [28] Shell, «Pearl GtL,» [Internett]. Available: https://www.shell.com.qa/en_qa/about-us/projects-and-sites/pearl-gtl.html. [Funnen 21 April 2020].
- [29] F. Albrecht, S. Estelmann og R.-U. Dietrich, «Technical Economic Evaluation of Renewable Jet Fuel from Power, Biomass and/or Carbon Dioxide,» i *European Refining Technology Conference*, Aten, 2017.
- [30] C. Licher, «Electrolyzer overview: Lowering the cost of hydrogen and distributing its production,» 26 Mars 2020. [Internett]. Available: <https://pv-magazine-usa.com/2020/03/26/electrolyzer-overview-lowering-the-cost-of-hydrogen-and-distributing-its-productionhydrogen-industry-overview-lowering-the-cost-and-distributing-production/>. [Funnen 7 Juni 2020].
- [31] B. T. Kristin Rypdal, «Utslipp til luft fra norsk luftfart,» Statistisk sentralbyrå, 1997.
- [32] M. Rothbart, «Energy landscape,» i *PDiM*, Göteborg, 2019.
- [33] A. W. Mortensen, H. Wenzel, K. D. Rasmussen, S. S. Justesen, E. Wormslev og M. Porsgaard, «Nordic GTL - a pre-feasibility study on sustainable aviation fuel from biogas, hydrogen and CO₂,» NISA, NIRAS og SDU, 2019.
- [34] EMBRAER, «EMBRAER 195: Airport planning Manual,» 1997. [Internett]. Available: https://www.flyembraer.com/irj/go/km/docs/download_center/Anonymous/Ergonomia/Home%20Page/Documents/APM_195.pdf. [Funnen 02 Juni 2020].
- [35] SSB, «Elektrisitetstpriser,» Statistisk Sentralbyrå, 2020. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/elkraftpris>. [Funnen April 2020].

-
- [36] Barents NaturGass, «Om LNG og naturgass,» Barents NaturGass, [Internett]. Available: <https://barentsnaturgass.no/naturgass/>. [Funnen April 2020].
- [37] D. H. N. B. R.-U. D. Friedemann G. Albrecht, «A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study,» *Fuel*, vol. 194, pp. 511-526, 2016.
- [38] E. Hahn, «LPG (propane) Gas Unit Conversions: Gas in kg, Litres, MJ, kWh & m³,» 22 Oktober 2019. [Internett]. Available: <https://www.elgas.com.au/blog/389-lpg-conversions-kg-litres-mj-kwh-and-m3>. [Funnen 5 Juni 2020].
- [39] XE.com, «XE Currency Charts,» [Internett]. Available: <https://www.xe.com/currencycharts/?from=EUR&to=NOK&view=10Y>. [Funnen 5 Juni 2020].
- [40] R.-U. D. e. al, «Cost calculations for three different approaches of biofuel production using biomass, electricity and CO₂,» *Biomass and Energy*, vol. 111, pp. 165-173, 2018.
- [41] G. Thorsnæs, «Vestland,» Store Norske Leksikon, 22 Januar 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/Vestland>. [Funnen 07 06 2020].
- [42] IATA, «Jet Fuel Price Monitor,» [Internett]. Available: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>. [Funnen 23 April 2020].
- [43] International Energy Agency, *Energy Policies of IEA Countries - Norway*, Paris: OECD Publishing, 2005.
- [44] «Combustion of Fuels - carbon Dioxide Emissions,» engineeringtoolbox, [Internett]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html. [Funnen 06 06 2020].

7. Liste over figurer

FIGUR 1 FRA CARBON ENGINEERING SOM VISER HVORDAN KARBONFANGST OG POWER TO LIQUID SKAPER ET LUKKET KARBONKRETSLØP.....	18
FIGUR 2 KLIMAGASSUTSLIPP FRA ULIKE REISEMÅTER (CO ₂ PER PASSASJER PER KILOMETER).....	20
FIGUR 3 OVERSIKT OVER ELEKTROLYSEPROSESSEN	24
FIGUR 4 CONTAINER SYSTEMET TIL HYDROGENICS	27
FIGUR 5 OVERSIKT OVER ALKALINE OG PEM ELEKTROLYSE SINE EGENSKAPER	28
FIGUR 6 OVERSIKT OVER KJEMIEN I ET KARBONFANGSTANLEGG	29
FIGUR 7 OVERSIKT OVER OPPBYGGINGEN TIL EN MULTITUBULAR FIXED BED REACTOR (VENSTRE) OG EN SLURRY BUBBLE COLUMN REACTOR (HØYRE)	34
FIGUR 8 PROSESSOVERSIKT FOR ELEKTROLYSE	39
FIGUR 9 PROSESSOVERSIKT FOR KARBONFANGST	40
FIGUR 10 PROSESSOVERSIKT FOR FISCHER-TROPSCH REAKSJON	41
FIGUR 11 PROSESSOVERSIKT FOR HELE ANLEGGET	42
FIGUR 12 RESSURSOVERSIKT FOR EN LITER PARAFIN.....	43
FIGUR 13 UTKLIPP FRA VEDLAGT EXCELDOKUMENT SOM OMHANDLER NORGE OG FLESLAND	43
FIGUR 14 RESSURSOVERSIKT FRA AVL, RESSURSER FOR EN LITER SYNTETISK DRIVSTOFF	44
FIGUR 15 RESSURSOVERSIKT FRA AVL, PRODUKSJON AV SYNTETISK DRIVSTOFF I TYSKLAND	45
FIGUR 16 RESSURSOVERSIKT FRA AVL, PRODUKSJON AV SYNTETISK DRIVSTOFF I SVERIGE	46
FIGUR 17 FORENKLET OVERSIKT OVER PRODUKSJON AV DRIVSTOFF FRA KARBONFANGST FRA NORDIC PTL	46
FIGUR 18 GRAF SOM VISER PRISEN PÅ FLYDRIVSTOFF OVER TID (USD/BARREL)	49

8. Liste over tabeller

TABELL 1 SAMMENLIGNING AV FORSKJELLIGE TYPER ELEKTROLYSER	23
TABELL 2 OVERSIKT OVER EGENSKAPENE OG ENERGIBEHOV FOR SMÅ OG MEDIUM ELEKTROLYSER.....	25
TABELL 3 OVERSIKT OVER EGENSKAPER OG ENERGIBEHOV FOR STORE ELEKTROLYSER	26
TABELL 4 SAMMENLIGNING AV FISCHER-TROPSCH REAKTORER.	36

