



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

En andreordens energikjedeanalyse av fremtidens alternative drivstoffteknologier for luftfart

A second-order energy chain analysis of future
alternative fuel technologies for aviation

Vebjørn Szalay Pettersen

Fornybar Energi

Forord

Denne masteroppgaven markerer det som kan være slutten på min utdanning. Gjennom flere års skole på grunnskole- videregående- og høyere utdanningsnivå, har jeg møtt mange fantastiske mennesker som har bidratt til min utvikling, nysgjerrighet og ønske om økt kunnskap.

I anledning arbeidet med oppgaven jeg rette en stor takk til min veileder, Erling Holden, for hans oppfølging under perioden. Erlings rolige vesen og gode veiledning har bidratt stort til fullføring av oppgaven.

Videre må jeg takke alle lærere og undervisere jeg hatt på Stangeland skole, Sola ungdomsskole, Sirdal videregående skole, Høgskulen på Vestlandet og nå til slutt på Norges miljø- og biovitenskaplige universitet, for all kunnskap de har gitt meg.

Til slutt må jeg takke familien min, Bjørn, Jeanette, Live og Brage for all tålmodighet og støtte gjennom oppveksten og studieløpet.

Ås, 15. mai 2024

Vebjørn Szalay Pettersen

Sammendrag

Global luftfart står ovenfor en stor omstilling fra en tilnærmet fullstendig fossilbasert drift til fremtidens krav om bærekraftige løsninger. Denne masteroppgaven analyserer ulike bærekraftige drivstoffteknologier. Oppgaven sammenligner og analyserer disse mot hverandre og mot konvensjonelt flydrivstoff. Analysen inkluderer batterielektrisk fremdrift, hydrogen i Brenselcelle, hydrogen i forbrenningsmotor og 4 ulike typer bærekraftig flydrivstoff (SAF). Energikjedene er også delt opp i kort- og mellomdistanse, da noen av teknologiene er bedre egnet til kortdistanse-markedet, som batterielektrisk fremdrift, mens andre kan tenkes å være bedre egnet for mellomdistanse-markedet.

Energikjede	Teknologi	Motortype
Kortdistanse (e.g. Dash 8-100)		
S-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Turboprop
S-2	Batterielektrisk	El-propell
S-3	Brenselcelle m/hydrogen	El-propell
S-4	Gassifisering og Fischer-Tropsch	Turboprop
S-5	HEFA	Turboprop
S-6	Alkohol til Jet	Turboprop
S-7	Syntetisk E-Fuel	Turboprop
Mellomdistanse (e.g. Boeing 737)		
M-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Jet
M-2	Hydrogen Forbrenning	Hydrogen Jet
M-3	Gassifisering og Fischer-Tropsch	Jet
M-4	HEFA	Jet
M-5	Alkohol til Jet	Jet
M-6	Syntetisk E-Fuel	Jet

Tabell 1 Oversikt over oppgavens energikjeder

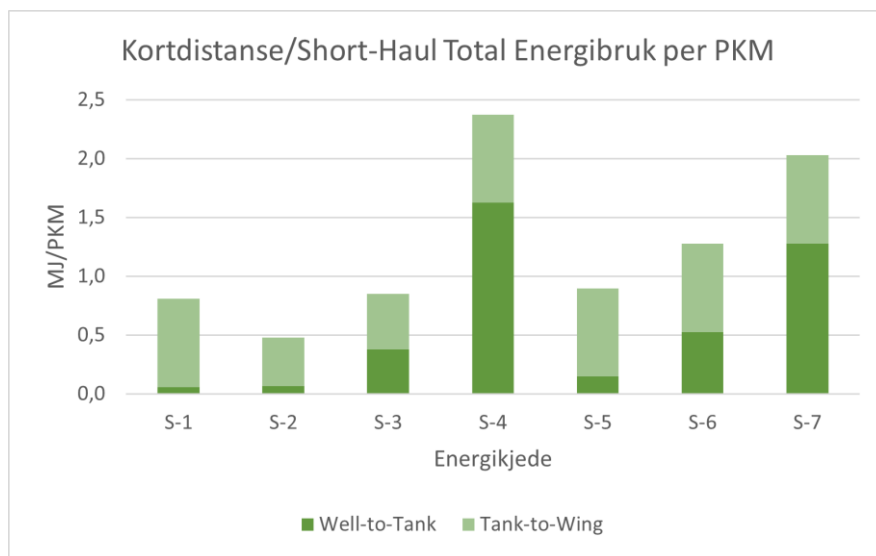
Oppgaven skal svare på følgende forskningsspørsmål:

- 1. Hvor mye energi brukes fra vugge til vinge for drivstoffteknologiene?*
- 2. Hva er det totale klimagassutslippet til drivstoffteknologiene?*
- 3. Hvilke fordeler og ulemper er aktuelle for de ulike drivstoffteknologiene?*

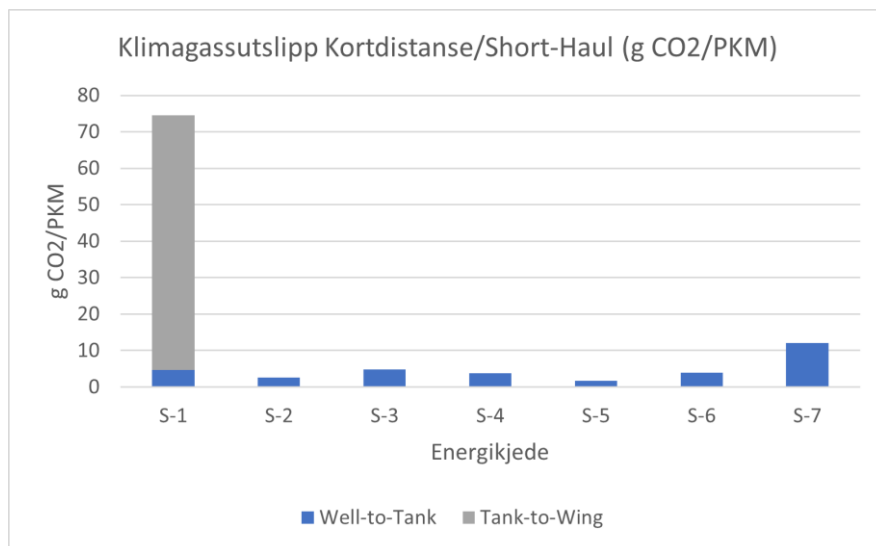
For å svare oppgavens forskningsspørsmål er det gjennomført en energikjedeanalyse som inkluderer vurdering av totalt energibruk og CO₂-utslipp for produksjon og forbruk for teknologiene noe som ofte kalles en «Well-to-Wing»-analyse. «Well-to-Wing»-analysen deles deretter inn i «Well-to-Tank» og «Tank-to-Well», hvorav «Well-to-Tank» representerer analyse

av energibruk og CO₂-utslipp fra utvinning av råmateriale, gjennom en produksjonsprosess, til det endelige drivstoffproduktet er klart for bruk, mens «Tank-to-Wing» representerer analyse av energibruk og CO₂-utslipp under bruk. Energifbruk og CO₂-utslipp, måles i MJ brukt per passasjerkilometer (MJ/PKM) og gram CO₂ per passasjerkilometer (g CO₂/PKM).

Resultatene fra analysen for kortdistanse viser at batterielektrisk er den mest energieffektive energikjeden for «Well-to-Wing», som man kan se i figur 1. Samtidig viser den store forskjeller i energieffektivitet blant energikjedene for SAF (S-4 til S-7).



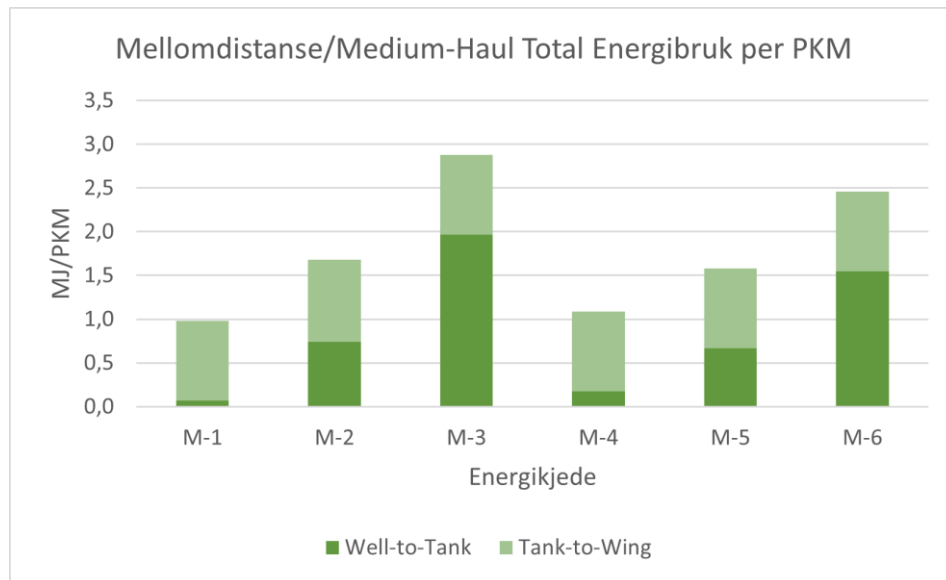
Figur 1 Resultater energibruk kortdistanse



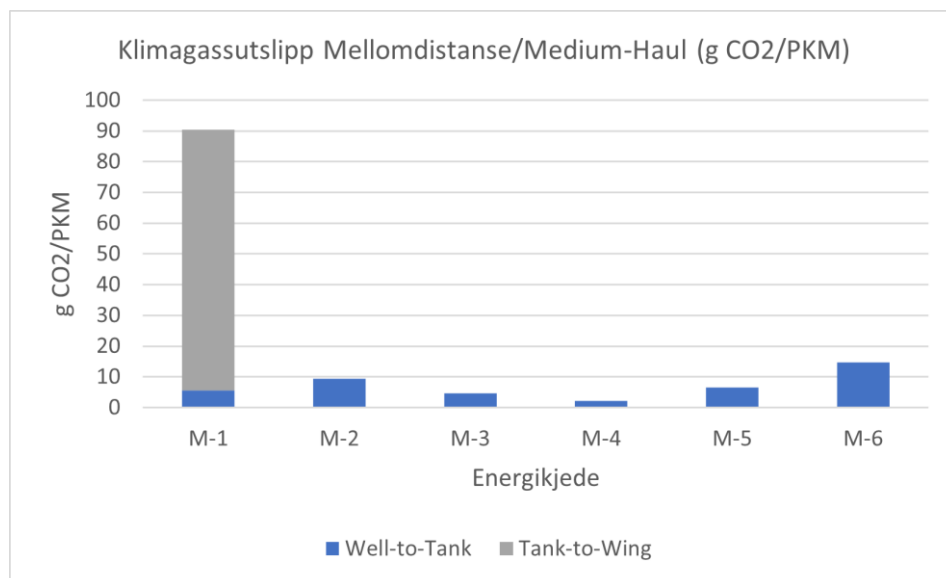
Figur 2 Resultater klimagassutslipp kortdistanse

Figur 2 viser g CO₂-utslipp per passasjerkilometer for energikjedene, man ser her en tydelig reduksjon i klimagassutslipp for samtlige av de alternative energikjedene sammenlignet med konvensjonelt flydrivstoff (S-1).

Resultatene fra analysen for mellomdistanseflygninger, som vist i figur 3, viser store likheter mellom resultatene for kortdistanseflygninger. Samtidig kan man se at i markedet hvor batterielektrisk fremdrift ikke er like aktuelt, vil man i større grad se til HEFA-teknologi (Hydroprosesserte fettsyrer og estere), for en energieffektiv og bærekraftig teknologi.



Figur 3 Resultater energieffektivitet mellomdistanse



Figur 4 Resultater klimagassutslipp mellomdistanse

Resultatene fra figur 4, klimagassutslipp for mellomdistanseflygninger, viser de samme tendensene som for kortdistanseflygninger. Oppgavens scenarioanalyse avdekker derimot at energimiksens CO₂-faktor kan ha store påvirkninger på teknologienes bærekraft.

Abstract

Global aviation is facing a major transition from an almost entirely fossil-based operation to future demands for sustainable solutions. This master's thesis aims to analyze various sustainable fuel technologies. The thesis compares and analyzes the technologies against each other and against conventional aviation fuel. The analysis includes battery-electric propulsion, hydrogen fuel cell technology, hydrogen combustion technology and four different types of sustainable aviation fuel (SAF). The energy chains are also divided into short- and medium haul flights, as some technologies are better suited for the short-haul market, such as battery-electric propulsion, while others may be better suited for the medium-haul market.

Energy Chain	Technology	Engine Type
Short-Haul (e.g. Dash 8-100)		
S-1	Conventional Aviation Fuel (Jet A-1)	Turboprop
S-2	Battery-electric	Electric propeller
S-3	Hydrogen Fuel Cell	Electric propeller
S-4	Gasification and Fischer-Tropsch	Turboprop
S-5	HEFA	Turboprop
S-6	Alcohol to Jet	Turboprop
S-7	Synthetic E-Fuel	Turboprop
Medium-Haul (e.g. Boeing 737)		
M-1	Conventional Aviation Fuel (Jet A-1)	Jet
M-2	Hydrogen combustion	Hydrogen Jet
M-3	Gasification and Fischer-Tropsch	Jet
M-4	HEFA	Jet
M-5	Alcohol to Jet	Jet
M-6	Synthetic E-Fuel	Jet

Table 2 Overview of the thesis's energy chains

This thesis aims to answer the following research questions:

- 1. How much energy is used from cradle to wing for the fuel technologies?*
- 2. What is the total greenhouse gas emission of the fuel technologies?*
- 3. What are the advantages and disadvantages of the various fuel technologies?*

To answer the research questions, an energy chain analysis has been conducted, which includes the assessment of total energy consumption and CO2 emissions for production and consumption for the technologies, often called a "Well-to-Wing" analysis. The "Well-to-Wing" analysis is further divided into "Well-to-Tank" and "Tank-to-Wing," where "Well-to-Tank" represents the analysis of energy consumption and CO2 emissions from the extraction of raw materials, through the production process, to the final fuel product being ready for use, while "Tank-to-Wing" represents the analysis of energy consumption and CO2 emissions during use. Energy consumption and CO2 emissions are measured in MJ used per passenger-kilometer (MJ/PKM) and grams of CO2 per passenger-kilometer (g CO2/PKM).

The results from the analysis for short-distance flights show that battery-electric is the most energy-efficient energy chain for "Well-to-Wing," as seen in Figure 5. At the same time, there are significant differences in energy efficiency among the energy chains for SAF (S-4 to S-7).

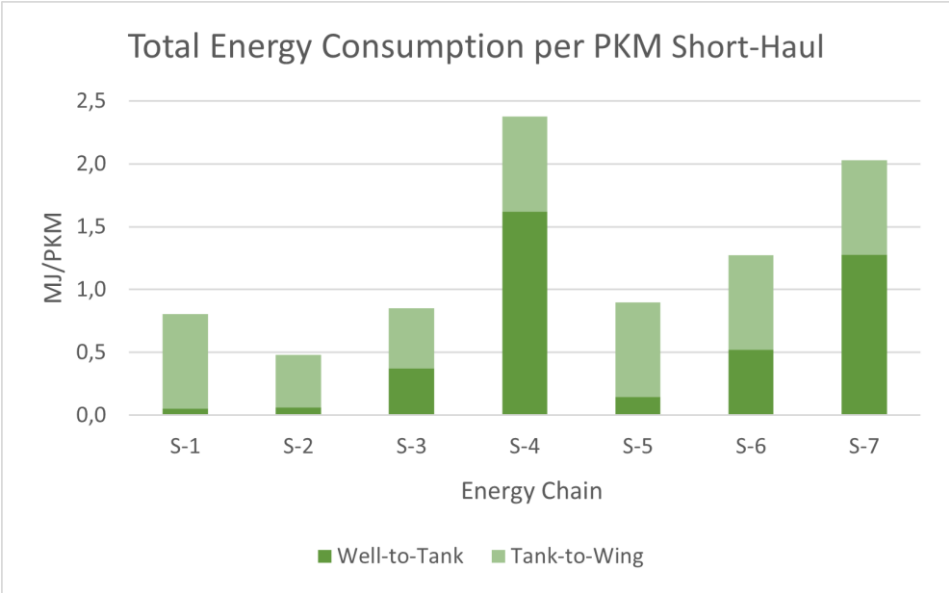


Figure 5 Results energy consumption for Short-Haul

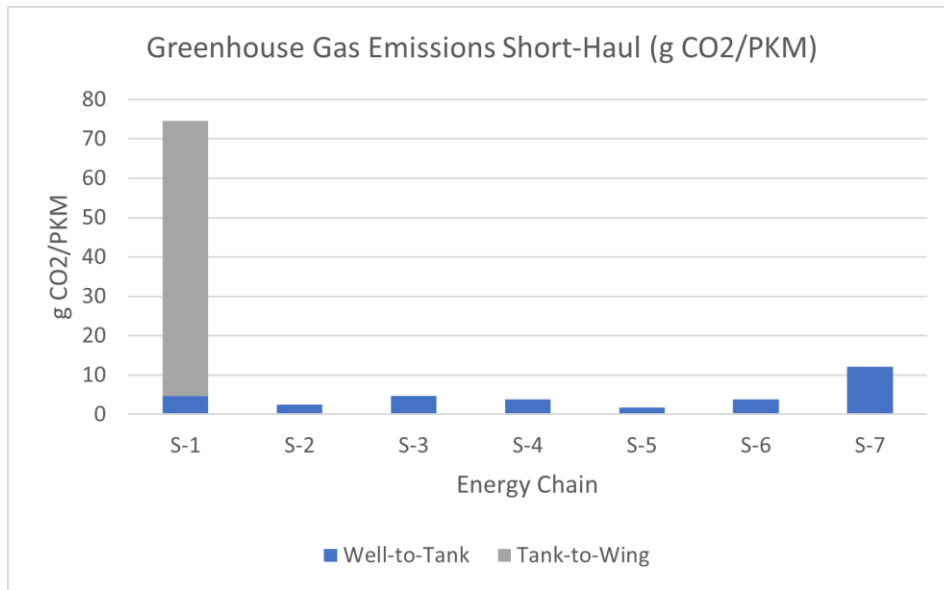


Figure 6 Results greenhouse gas emissions for Short-Haul

Figure 6 shows g CO₂ emissions per passenger-kilometer for the energy chains, indicating a clear reduction in greenhouse gas emissions for all the alternative energy chains compared to conventional aviation fuel (S-1).

The results from the analysis for medium-distance flights, as shown in Figure 7, reveal significant similarities with the results for short-distance flights. In markets where battery-electric propulsion is less relevant, HEFA technology (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) is expected to be a more energy-efficient and sustainable technology.

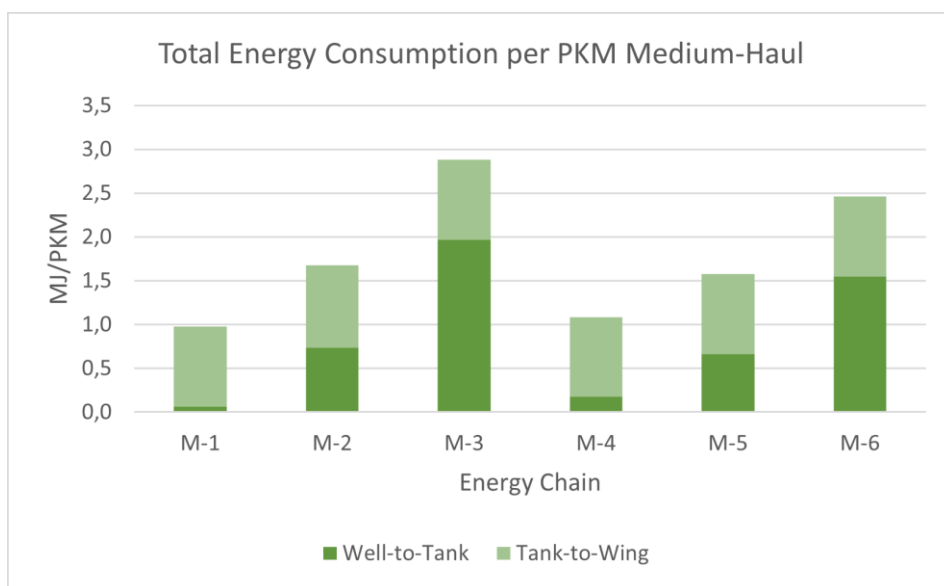


Figure 7 Results energy consumption for Medium-Haul

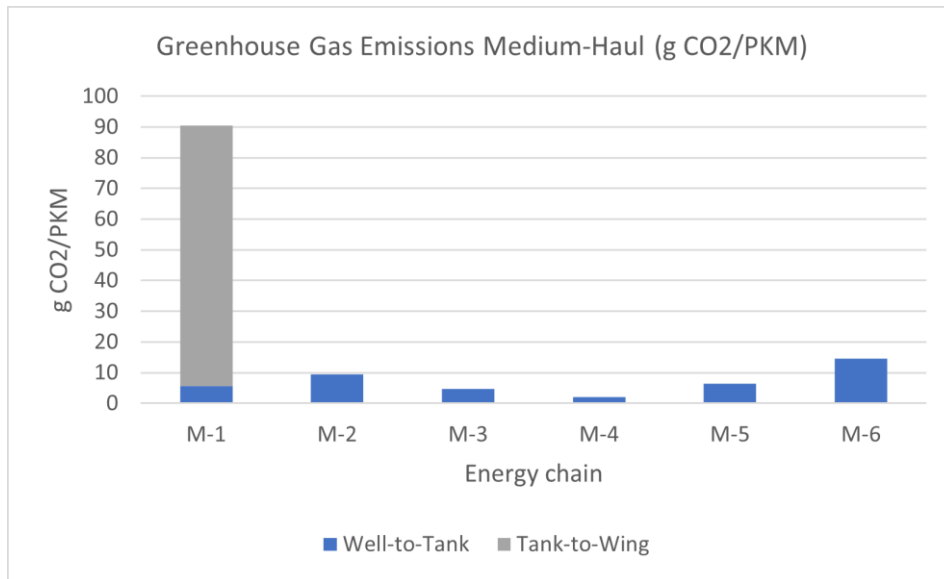


Figure 8 Results greenhouse gas emissions for Medium-Haul

The results from Figure 8, greenhouse gas emissions for medium-distance flights, show the same tendencies as for short-distance flights. However, the thesis's scenario analysis reveals that the CO₂ factor of the energy mix can have significant impacts on the sustainability of the technologies.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	V
Figurliste.....	XI
Tabelliste	XII
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Kunnskapsgrunnlag	4
1.2.1 Tidligere forskning	4
1.2.2 Bærekraftig flydrivstoff (SAF).....	4
1.2.3 Elektrisk fremdrift	4
1.2.4 Hydrogen som drivstoff.....	5
1.2.5 Sammenlignende analyser	5
1.3 Problemstilling	6
1.4 Bakgrunn for valg av energikjeder	7
1.5 Oppgavens struktur	9
2 Metode.....	10
2.1 Innledning.....	10
2.2 Systemgrenser, omfang og allokering	11
2.2.1 Funksjonell enhet	11
2.2.2 Systemgrenser	12
2.2.3 Antagelser.....	12
2.2.4 Allokering.....	13
2.3 Forskningstilnærming og datainnsamling	13
2.4 Analysemetode	15
2.4.1 Energianalyse	15

2.4.2	Utslippsanalyse.....	16
2.5	Sensitivitetsanalyse	17
2.6	Scenarioanalyse	18
2.7	Oppsummering av Metode	18
3	Teknologi og data	19
3.1	Energikjeder	19
3.1.1	S-1 og M-1 Konvensjonelt flydrivstoff.....	20
3.1.2	S-2 Batterielektrisk.....	20
3.1.3	S-3 Hydrogen brukt i brenselcelle.....	21
3.1.4	M-2 Hydrogen brukt i forbrenningsmotor	23
3.1.5	S-4 og M-3 Gassifisering og Fischer-Tropsch syntese.....	23
3.1.6	S-5 og M-4 Hydroprosesserte estere og fettsyrer.....	24
3.1.7	S-6 og M-5 Alkohol til Jet.....	24
3.1.8	S-7 og M-6 Syntetisk E-Fuel.....	25
3.2	Data	26
3.2.1	Tank-to-Wing	26
3.2.2	Well-to-Tank.....	27
3.3	Dataintegrasjon og kvalitet.....	39
3.4	Oppsummering av Data & Teknologi.....	39
4	Resultater og diskusjon	40
4.1	Presentasjon av Resultater.....	40
4.1.1	Energibruk Kortdistanse	41
4.1.2	Energibruk Mellomdistanse	42
4.1.3	Klimagassutslipp Kortdistanse	43
4.1.4	Klimagassutslipp Mellomdistanse.....	45
4.2	Sensitivitet- og Scenarioanalyse.....	46
4.3	Analyse og Diskusjon av Resultater.....	50

4.3.1	Oppsummering av resultater	50
4.3.2	E-Fuel	51
4.3.3	Hydroprosesserte estere og fettsyrer	52
4.3.4	Alkohol-til-Jet	52
4.3.5	Gassifisering og Fischer-Tropsch syntese	52
4.3.6	Batterielektrisk	53
4.3.1	Hydrogen	53
5	Konklusjon	55
6	Referanseliste	57

Figurliste

Figur 1	Resultater energibruk kortdistanse	III
Figur 2	Resultater klimagassutslipp kortdistanse	III
Figur 3	Resultater energieffektivitet mellomdistanse	IV
Figur 4	Resultater klimagassutslipp mellomdistanse	IV
Figure 5	Results energy consumption for Short-Haul	VI
Figure 6	Results greenhouse gas emissions for Short-Haul	VII
Figure 7	Results energy consumption for Medium-Haul	VII
Figure 8	Results greenhouse gas emissions for Medium-Haul	VIII
Figur 9	Globalt antall luftfartspassasjerer (milliarder) (International Air Transport Association, 2023a)	1
Figur 10	Well-to-Wing (European Union Aviation Safety Agency, 2022)	10
Figur 11	Energikjeder oversikt	20
Figur 12	Energikjede S-1/M-1	20
Figur 13	Energikjede S-2	21
Figur 14	Energikjede S-2	22
Figur 15	Energikjede M-2	23

Figur 16 Energikjede S-4 og M-3.....	24
Figur 17 Energikjede S-5 og M-4.....	24
Figur 18 Energikjede S-6 og M-5.....	25
Figur 19 Energikjede S-7 og M-6.....	25
Figur 20 Norsk energimiks for 2022 (Norges Vassdrags- og Energidirektorat, 2024).....	28
Figur 21 Totalt Energiforbruk MJ/PKM (Kortdistanse).....	41
Figur 22 Totalt Energiforbruk MJ/PKM (Mellomdistanse)	42
Figur 23 Klimagassutslipp Kortdistanse/Short-Haul	43
Figur 24 Klimagassutslipp Kortdistanse/Short-Haul, eksklusiv S-1	44
Figur 25 Klimagassutslipp Mellomdistanse/Medium-Haul	45
Figur 26 Klimagassutslipp Mellomdistanse/Medium-Haul, eksklusiv S-1	45
Figur 27 Sensitivitetsanalyse S-2	46
Figur 28 Sensitivitetsanalyse M-2.....	47
Figur 29 Sensitivitetsanalyse M-3	48
Figur 30 Scenarioanalyse	49

Tabelliste

Tabell 1 Oversikt over oppgavens energikjeder	II
Table 2 Overview of the thesis's energy chains.....	V
Tabell 3 Oversikt over oppgavens energikjeder	6
Tabell 4 Tank-to-Wing forbruk.....	27
Tabell 5Energikjede S-1/M-1 Utvinning av råolje	30
Tabell 6Energikjede S-1/M-1 Raffinering.....	30
Tabell 7 Energikjede S-2 Batterilading	31
Tabell 8 Energikjede S-2 Kraftnett.....	31
Tabell 9 Energikjede S-3/M-2 Elektrolyse	32

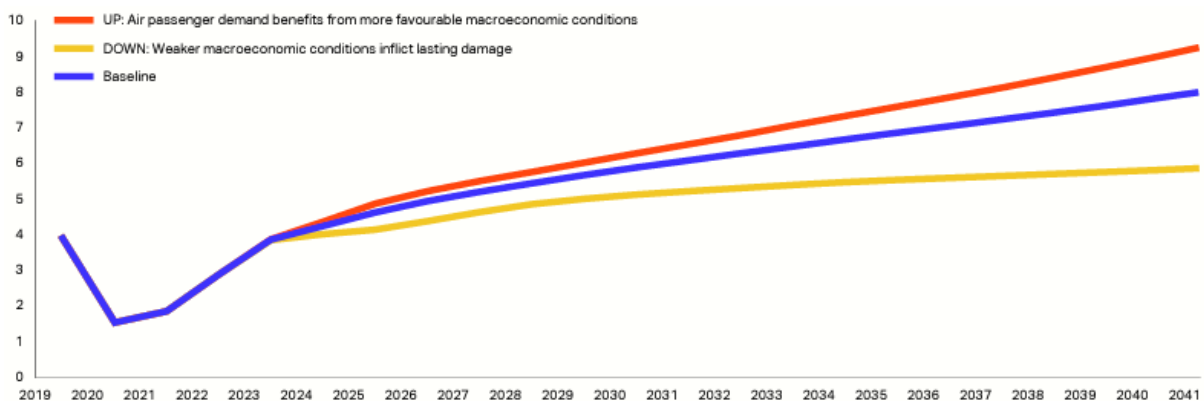
Tabell 10 Energikjede S-3/M-2 Flytendegjøring.....	32
Tabell 11 Energikjede S-4/M-3 Forbehandling.....	33
Tabell 12 Energikjede S-4/M-3 Gassifisering.....	34
Tabell 13 Energikjede S-4/M-3 Fischer-Tropsch.....	34
Tabell 14 Energikjede S-5/M-4 Hydrobehandling.....	35
Tabell 15 Energikjede S-5/M-4 Hydrokrakking.....	35
Tabell 16 Energikjede S-5/M-4 Destillering (HEFA).....	35
Tabell 17 Energikjede S-6/M-5 Fermentering og Destillering.....	36
Tabell 18 Energikjede S-6/M-5 Dehydrering.....	36
Tabell 19 Energikjede S-6/M-5 Oligomerisering.....	37
Tabell 20 Energikjede S-6/M-5 Hydrogenerering og Destillering.....	37
Tabell 21 Energikjede S-7/M-6 Karbonfangst.....	38
Tabell 22 Energikjede S-7/M-6 Gassifisering.....	38
Tabell 23 Energikjede S-7/M-6 Fischer-Tropsch.....	38
Tabell 24 Oppsummering av resultater.....	40

1 Innledning

Innledningskapittelet gir en introduksjon til oppgavens tema. Her vil leser få bakgrunnsinformasjon nødvendig for å forstå kontekst og bakgrunn for valg av oppgave. Videre vil jeg presentere og gi en gjennomgang av kunnskapsgrunnlaget som ligger til grunn for oppgavens problemstilling. En kort introduksjon til energikjedene og oppgavens struktur vil så presenteres i den siste delen av innledningen.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Siden Wright brødrene, den 17 desember i 1903 foretok sin første suksessfulle flygning, har luftfart blitt en større og større del av samfunnet. Med teknologiske fremskritt og kostnadsreduksjoner har kommersiell luftfart i dag blitt et sentralt transportalternativ i verdenssamfunnet. I 2019 reiste 4,5 milliarder passasjerer med fly, og det ble gjennomført 38,3 millioner avganger (International Civil Aviation Organization, u.å.). Figur 9 viser Prognoser gjort av IATA (Den internasjonale organisasjonen for lufttransport), og viser at det i 2040, vil være en nær dobling av passasjerer til 7,8 milliarder årlige passasjerer fra dagens antall (International Air Transport Association, 2023b). Figuren viser også 3 ulike scenarier basert forventet vekst, vekst over forventning og vekst under forventning.



Figur 9 Globalt antall luftfartspassasjerer (milliarder) (International Air Transport Association, 2023a)

I 2022 sto luftfart for om lag 2% av verdens totale CO₂-utslipp (International Energy Agency, u.å.-a). Dette er en relativt liten del av det totale utslippet, men utgjør omtrent 800 Mt CO₂. Luftfarten er fortsatt på vei tilbake etter koronapandemien, og man forventer at utslippene vil stige i takt med økt passasjerantall i årene som kommer. I 2019 var etterspørselen for flyreiser

11,1 billioner passasjerkilometere-ekvivalenter¹ (PKMe), hvorav 78% av dette representere passasjer flyvninger. Forskning viser at dette tallet kan komme til å stige til 32,1-, 23,7- og 12,4 billioner PKMe, ved henholdsvis «Business-as-usual²», industriforventning- og ambisiøst scenario (Bergero et al., 2023).

For å tilrettelegge for internasjonal luftfarts vei mot en bærekraftig fremtid, ble CORSIA³ vedtatt av ICAO⁴ i 2016. CORSIA markerer et skifte mot en global tilnærming for utvikling av en bærekraftig luftfart. Der det tidligere har vært en fragmentert tilnærming med nasjonale og regionale reguleringer, gir CORSIA et globalt sett med tiltak. Hovedformålet til initiativet er å redusere og kompensere for klimagassutslipp i internasjonal luftfart, hvor det oppfordres til utslippsreduksjon gjennom strategi, innovasjon, operasjonelle forbedringer og bruk av bærekraftig drivstoff. Der utslipp ikke kan reduseres tilbyr CORSIA mulighet til å kjøpe karbonkreditt fra karbonmarkeder, som så vil kompensere for utslipp. Gjennom CORSIA tar luftfarten et betydelig skritt mot å oppfylle klimaforpliktelser, samtidig som hensyn tas til luftfartens særegne utfordringer knyttet bærekraftig drift (International Civil Aviation Organization, 2023).

CORSIA setter tydelige krav som må oppfylles før drivstoff kan sertifiseres som bærekraftig. Disse kravene inkluderer en rekke bærekraftskriterier knyttet sosial, miljømessige og økonomiske faktorer. Det kreves også grundig dokumentasjon av produksjonsprosesser samt bruk av råmateriale. CORSIA har størst fokus på bærekraftige alternativer til dagens flymaskiner, men ser også til hydrogen- og elektriske teknologier som metoder for å redusere klimaavtrykk (international Civil Aviation Organization, 2019).

«Sustainable Aviation Fuel» (SAF) er en fellesbetegnelse for forskjellige typer bærekraftig flydrivstoff som kan brukes på fly og helikopter. SAF kan tas i bruk på konvensjonelle flymaskiner uten modifikasjoner, og det er etter dagens drivstoffstandarder tillatt med en utblanding på 50%, sammen med konvensjonelt drivstoff. Samtidig foregår det testing av høyere blandingsgrad, og man forventer at dette kan sertifiseres innen få år (Meld.St.10 (2022-2023)). Fly har ofte lang levetid og man kan ikke utelukke at dagens flymaskiner også vil være i bruk om 30 år. Det vil derfor være ønskelig å utvikle mer bærekraftige drivstoff, som erstatning til dagens fossile drivstoff. Grunnet likheten i egenskaper mellom SAF og konvensjonelt

¹ PKMe = (Antall Passasjerer * Distanse Tilbakelagt)_{ekvivalent}

² BAU = Uendret fremgangsmåte

³ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

⁴ International Civil Aviation Organization

flydrivstoff, også kalt ATF (Aviation Turbine Fuel), kan drivstoffet brukes uten modifikasjoner på flymaskinene, vil det heller ikke kreve store endringer i dagens forsyningsinfrastruktur rundt lufthavner. Det vil være viktig at SAF har de samme egenskapene som ATF, slik at det kan brukes som alternativ på dagens teknologi. Industrien er fokusert på å produsere på en måte som gjør SAF helt utbyttbar med ATF for å kunne slippe å måtte endre teknologi og leveransemetoder for luftfarten (International Air Transport Association, u.å.)

ReFuelEU Aviation er en forordning om like konkurransevilkår for bærekraftig luftfart i Europa. Forslaget ble vedtatt av Europarådet, Europaparlamentet og Europakommisjonen den 13. oktober 2023. Forordningen sier at det skal være et innblandingskrav av SAF i konvensjonelt drivstoff, som øker gradvis frem mot 2050. Kravet sier at drivstoffleverandører kreves å inkorporere SAF tilsvarende: 2% i 2025, 6% i 2030, 20% i 2035, 34% i 2040, 42% i 2045 og 70% i 2050 (Council of the EU, 2023).

Luftfartens vekst og bidrag til globale CO₂-utslipp krever presserende tiltak for å redusere miljøpåvirkningen. Med et stadig økende fokus på klimaendringer, har det blitt avgjørende å utforske og implementere mer bærekraftige løsninger. ReFuelEU Aviation-forordningen er et eksempel på slike regulatoriske tiltak som tar sikte på å integrere SAF i luftfarten. Dette setter et juridisk rammeverk for å redusere klimagassutslippene betydelig gjennom økt bruk av SAF, som kan produseres fra fornybare kilder og avfallsmaterialer, og dermed tilby en mer miljøvennlig erstatning til konvensjonelt drivstoff.

Til tross for at SAF utgjør en betydelig del av løsningen for å oppnå luftfartens klimamål, møter implementeringen flere utfordringer, inkludert produksjonsskala, kostnad, og teknologisk modning. Videre spiller elektriske og hydrogenbaserte fremdriftssystemer en voksende rolle i forskningen på fremtidens flyteknologi, noe som speiler et bredere skifte mot elektrifisering og avkarbonisering over hele transportsektoren.

Denne masteroppgaven vil derfor analysere den miljømessige effektiviteten til mulige løsninger for bærekraftig luftfart. Ved å analysere SAF, batterielektrisk, hydrogen og fossilt jet-fuel mot hverandre, søker oppgaven å belyse hvilke drivstoffkilder, produksjonsmetoder og fremdriftssystemer som er mest gunstige for fremtidens luftfart.

1.2 Kunnskapsgrunnlag

Oppgavens kunnskapsgrunnlag vil bli presentert gjennom en omfattende gjennomgang av eksisterende litteratur og forskning, noe som igjen er bakgrunnen for oppgavens forskningsspørsmål.

1.2.1 Tidligere forskning

Dette delkapittelet gir en oversikt over eksisterende litteratur og forskning relatert til sammenligning av SAF, elektrisk- og hydrogen baserte fremdriftsmetoder og konvensjonelt jet-fuel. Tidligere forskning inkluderer tekno-økonomiske og livsløpsanalyser av forskjellige teknologier opp mot fossil teknologi. Gjennomgangen legger grunnlaget for å forstå potensialet og utfordringene hver teknologi representerer i overgangen til en mer bærekraftig luftfart.

1.2.2 Bærekraftig flydrivstoff (SAF)

Forskning på bærekraftige drivstoffalternativer har intensivert som svar på klimautfordringene knyttet til konvensjonelle jetdrivstoff. Studiet gjennomført av Ballal et al. har evaluert klimaeffekter og energieffektivitet av alternative drivstoff. Studien analyserte klimapåvirkningen av E-Fuel i Europa og fant at klimafordelene varierer sterkt avhengig av elektrisitetsmix, CO₂-kilde og produksjonsmetode for hydrogen (Ballal et al., 2023). I tillegg har Kurzawska-Pietrowicz utført en omfattende analyse av livssyklusutslippene fra utvalgte SAF-teknologier. Resultatene viser at forskjellige kilder og produksjonsmetoder kan ha betydelig innvirkning på utslippsfaktorene (Kurzawska-Pietrowicz, 2023). Videre gjennomførte Neuling & Kaltschmitt i 2017 en tekno-økonomisk og miljømessig analyse av SAF. Her sammenlignes forskjellige produksjonsmetoder for SAF, og det kommer frem at ingen enkelt teknologi utpeker seg som den mest egnede. Analysen understreker råmaterialets betydning for det endelige miljømessige og økonomiske resultatet (Neuling & Kaltschmitt, 2017). Disse studiene viser hvordan bærekraftige drivstoffalternativer avhenger av kilde til råmateriale, produksjonsmetoder og energimiks for å maksimere utslippsreduksjon og levedyktighet for SAF.

1.2.3 Elektrisk fremdrift

Forskning på batterielektrisk fremdrift i luftfarten fokuserer på hvordan dette kan bidra til et mer bærekraftig lufttransportsystem. Reimers' rapport fra 2020 fremhever Norges potensial til å lede an i overgangen til elektrisk luftfart, med betydelige investeringer fra Avinor for å støtte elektrifisering av kortdistanseruter. Dette inkluderer støtte til utvikling av elektriske fly og infrastruktur for ladestasjoner på flyplasser (Reimers, 2020). Cavicchia et al. Analyserer

teknologiske og regulatoriske utfordringer og muligheter i Norden. Analysen viser at overgangen til elektriske fly krever utvikling av mer robuste og effektive batteriteknologier, samt tilpasning av flyplassinfrastruktur for å støtte høyere energibehov ved avgang og landing (Cavicchia et al., 2024). Fra et miljøperspektiv er fordelene tydelige, med betydelig reduksjon i utslipp sammenlignet med tradisjonelle jetmotorer. Overgangen står imidlertid overfor teknologiske hindringer, spesielt med tanke på batterienes energitetthet som påvirker rekkevidden og setekapasiteten til flyene (Reimers, 2018).

1.2.4 Hydrogen som drivstoff

Forskning på hydrogen som drivstoff for luftfarten har avdekket både fordeler og utfordringen knyttet teknologien. Balli, et al. Undersøkte i 2018 hydrogenets effekt på ytelsen til en turbojetmotor drevet med hydrogen, og fant at selv om den termiske effektiviteten kan forbedres vil det kreve omfattende endringer til fly- og motordesign (Balli et al., 2018). Baroutaji gjorde i 2019 en omfattende gjennomgang av hydrogen-teknologiens miljøfordeler i luftfart. Studien peker på lavere klimagassutslipp, samtidig som den identifiserer utfordringer knyttet kostnad, infrastruktur, lagring og tanking (Baroutaji et al., 2019). Ren, et al. analyserer livssyklusen til hydrogen som drivstoff i Kina og bekrefter dets potensiale til å redusere klimagassutslipp betydelig, forutsatt at hydrogenet produseres fra fornybare kilder (Ren et al., 2020). Disse studiene belyser hydrogenets rolle som en bærekraftig energikilde for fremtidens luftfart, med nødvendige teknologiske, infrastrukturelle og regulatoriske innovasjoner for å realisere sitt fulle potensial.

1.2.5 Sammenlignende analyser

Tidligere sammenlignende analyser inkluderer en litteraturstudie gjennomført av Dahal, et al. (2021). Studien sammenligner tidligere analyser og belyser energieffektivitet, teknologisk modenhet, og økonomiske utfordringer knyttet til alternative drivstoff og nye fremdriftsmetoder. Studien peker på alkohol til jet som den mest energieffektive energikjeden med en effektivitet på 91% (Dahal et al., 2021). DNV presenterte i 2021 teknologiveikart som gir en omfattende oversikt og sammenligning av tilgjengelig og fremtidige metoder for fremstilling av SAF. DNV-rapporten fremhever spesielt E-Fuel produsert ved bruk av fornybar energi som en nøkkel til fremtidig bærekraft i luftfarten (DNV, 2021).

1.3 Problemstilling

Oppgaven er en andreordens energikjedeanalyse av bærekraftige teknologier for sivil luftfart, basert på ett litteraturstudie. Analysen dekker energibruk og utslipp knyttet til produksjon og bruk av 4 produksjonsmetoder for bærekraftig luftfartsdrivstoff, samt batterielektrisk fremdrift og hydrogenbasert fremdrift. Dette vil så sammenlignes med produksjon og bruk av konvensjonelt flydrivstoff. En slik analyse vil gjennomgå energieffektiviteten til de forskjellige teknologiene, noe som vil opplyse muligheter for teknologiutvikling og forbedring. Oppgavens forskningsspørsmål er tredelt:

1. *Hvor mye energi brukes fra vugge til vinge for drivstoffteknologiene?*
2. *Hva er det totale klimagassutslippet til drivstoffteknologiene?*
3. *Hvilke fordeler og ulemper er aktuelle for de ulike drivstoffteknologiene?*

Energikjede	Teknologi	Motortype
Kortdistanse (e.g. Dash 8-100)		
S-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Turboprop
S-2	Batterielektrisk	El-propell
S-3	Brenselcelle m/hydrogen	El-propell
S-4	Gassifisering og Fischer-Tropsch	Turboprop
S-5	HEFA	Turboprop
S-6	Alkohol til Jet	Turboprop
S-7	Syntetisk E-Fuel	Turboprop
Mellomdistanse (e.g. Boeing 737)		
M-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Jet
M-2	Hydrogen Forbrenning	Hydrogen Jet
M-3	Gassifisering og Fischer-Tropsch	Jet
M-4	HEFA	Jet
M-5	Alkohol til Jet	Jet
M-6	Syntetisk E-Fuel	Jet

Tabell 3 Oversikt over oppgavens energikjeder

1.4 Bakgrunn for valg av energikjeder

Oppgavens energikjeder inkluderer en bred representasjon av alternative drivstoffteknologier aktuelle for fremtidens luftfart. I rapporten «Virkemidler for fremtidig utvikling av bærekraftig luftfart i Norge» kommer det frem at teknologiløsningene for nullutslipps luftfart kan deles inn i 4 kategorier (Menon Economics, 2022):

1. Batterielektrisk
2. Hydrogen som drivstoff til brenselceller som produserer elektrisitet
3. Hydrogen som drivstoff direkte i flymotorer
4. Nullutslipps flydrivstoff erstatninger som biofuel og syntetiske drivstoffer (SAF)

Teknologiene Menon Economics peker på, er også de teknologiene som skal utforskes i denne oppgaven.

Norge vurderes av flere flyprodusenter som et aktuelt marked for de første elektrifiserte flyrutene. Det norske kortbanenettet, med korte avstander og lave passasjertall, vil være godt egnet for elektrifisering (Avinor, 2023). Hele 20 norske innenriks ruter er på en distanse mellom 38-170 km (Reimers, 2020). Disse rutene vil være de mest aktuelle i den nærmeste fremtiden. Samtidig som Norges topografi medfører gode muligheter for elektrisk luftfart, har også Norge en stor tilgang på fornybar energi. Norge ligger langt fremme i utvikling av grønn og elektrisk transport, hvorav den norske bilparken har den høyeste andelen batterielektriske personkjøretøy i verden. Norges store vann- og vindkrafts ressurser gir befolkningen tilgang på ren og billig strøm noe som videre bidrar til å gjøre Norge aktuelt for elektrisk luftfart.

Hydrogen er en allsidig og svært lovende energibærer, som ofte fremheves som en potensiell løsning til dekarbonisering av sektorer som er vanskelig å elektrifisere, som luftfart og spesielt langdistanseflyvninger (DNV, 2024). I luftfart kan hydrogen anvendes som energibærer ved å forsyne en brenselcelle eller ved direkte forbrenning i en forbrenningsmotor. Ved bruk av hydrogen sammen med brenselceller, kan elektriske fly oppnå lengre rekkevidde og lavere vekt. Disse teknologiene egnet for forskjellige markeder; bruk av brenselceller er særlig egnet til å operere i markeder som i dag er preget av turbopropfly (e.g. Dash 8-Q400), mens hydrogen i forbrenningsmotor potensielt kan være mer egnet for langdistanseflygning. Den verdensledende flyprodusenten Airbus ser på flere konsepter for fremtidig hydrogendrevet luftfart, disse inkluderer bruk av hydrogen i både brenselcelle og forbrenningsmotor. En vesentlig utfordring med hydrogen er imidlertid lav volumetriske energitetthet. Henholdsvis gassform og flytende form vil hydrogen kreve nærmere 7 og 4 ganger volumet til samme

mengde energi i ATF (DNV, 2024). Airbus forventer derfor at fremtidens hydrogen-fly vil kunne se ganske annerledes ut i forhold til dagens flymaskiner, for å inkorporere større drivstofftanker (Airbus, 2024).

Bærekraftig flydrivstoff kan i dag produseres gjennom flere forskjellige metoder og fra et bredt spekter av råmaterialer. Blant de mest utbredte produksjonsteknikkene finner vi hydroprosesserte estere og fettsyrer (HEFA), gassifisering fulgt av Fischer-Tropsch-syntese, og Alkohol til Jet. Det brede spekteret av råmaterialer som kan brukes, krever at både produktet og produksjonsmetoden oppfyller strenge krav og kriterier før SAF kan sertifiseres.

SAF skal fungere som en erstatning for konvensjonelt drivstoff og må kunne brukes i samme motorer og teknologi som Jet A-1. For å oppnå EU-sertifisering som bærekraftig flydrivstoff må klimagassutslippene gjennom livssyklusen til drivstoffet reduseres med 70% sammenlignet med konvensjonelt drivstoff for prosjekter som starter etter 2021 (The European Parliament & The Council of the European Union, 2023). Dette kravet er strengere enn ICAOs minimumskrav om en reduksjon på 10% fra konvensjonelt drivstoff, noe som tilsvarer henholdsvis maksimalt 28,2 g CO₂e/MJ for EU og 80,1 g CO₂e/MJ for ICAO (International Civil Aviation Organization, 2022).

I tillegg til klimagassreduksjoner, stilles det også krav til bærekraftig arealbruk for produksjon av råmateriale. Det er avgjørende at utvinningen av råmateriale ikke går på bekostning av biodiversitet eller naturlige karbonlagre. Slike arealer beskyttes mot utnyttelse gjennom kriterier fra CORSIA og RED⁵ (European Union Aviation Safety Agency, 2022). EASAs⁶ bærekraftsrapport fra 2022 identifiserer fire produksjonsmetoder som forventes å spille en sentral rolle i fremtiden: gassifisering av biomasse med Fischer-Tropsch-syntese, hydroprosesserte estere og fettsyrer, alkohol til jet, og syntetisk E-Fuel (European Union Aviation Safety Agency, 2022).

Disse produksjonsmetodene, samt nullutslippsteknologiene som batterielektrisk og hydrogenbasert fremdrift, utforskes videre i kapittel 3: «Teknologi og data».

⁵ Renewable Energy Directive (EU)

⁶ European Aviation Safety Association

1.5 Oppgavens struktur

Det første kapittelet har introdusert oppgavens tema og forskningsspørsmål. Videre vil kapittel 2: «Metode», beskrive hvilke metoder som ligger til grunn for å besvare oppgavens forskningsspørsmål. Kapittelet inkluderer beskrivelse av oppgavens omfang og systemgrenser, i tillegg til en gjennomgang av benyttet forskningstilnærming. Kapittelet forklarer også hvordan metodene brukes for å analysere datagrunnlaget.

Kapittel 3: «Teknologi og data» presenterer en detaljert gjennomgang av oppgavens energikjeder, og hvordan de deles opp. Videre følger en presentasjon av data som ligger til grunn og kildene dataen er hentet fra. I tillegg vil jeg vurdere dataintegrasjon og kvalitet.

Kapittel 4: «Resultater og diskusjon» presenterer resultatene fra oppgavens analyse av energikjedene. I tillegg til resultatene fra scenario- og sensitivitetsanalysene. Videre vil resultatenes funn diskuteres.

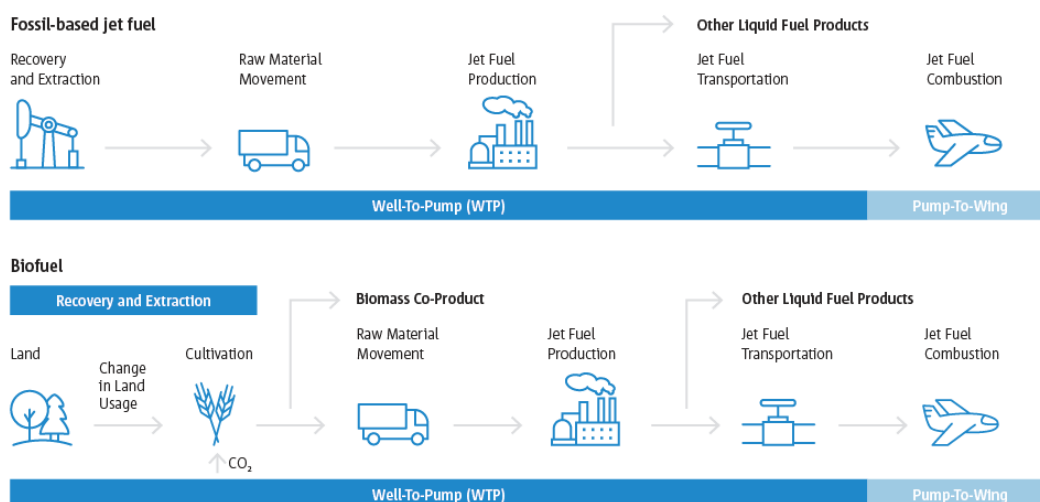
Kapittel 5: «Konklusjon» presenterer en oppsummering av oppgavens funn og hvordan oppgaven svarer på forskningsspørsmålene. I tillegg gis det personlige refleksjoner rundt analysen og resultatene.

2 Metode

2.1 Innledning

For å svare på oppgavens forskningsspørsmål har jeg benyttet en andreordens tilnærming til energikjedeanalyse (Blok & Nieuwlaar, 2021). Denne tilnærmingen ligner på en livssyklusanalyse (LCA), samtidig som det er noen viktige forskjeller. Mens en LCA inkluderer energibruk og utslipp fra produksjon av transportmidler som fly, fokuserer en andreordens energikjedeanalyse på beregning av primærenergi benyttet i energikjeden. Dette inkluderer analyse av sekundærenergi, som er energi omformet fra råstoff, i tillegg til analyse av endelig energi, som er det ferdige energiproduktet. Analyse av sekundær- og endelig energi er viktige delprosesser for å kartlegge forbruket av primærenergi. Innsikt i forbruk av primærenergi legger så grunnlag for beregning av klimagassutslipp basert på det totale energiforbruket i energikjeden.

Når en livsløpsanalyse gjennomføres, er det vanlig å kalle dette en «Cradle-to-Grave» undersøkelse («vugge-til-grav» på norsk), denne betegnelsen viser til at analysen tar for seg hele livsløpet fra råmateriale til sluttbruk. Når analysen omhandler drivstoff kalles det gjerne «Well-to-Wheel» for landkjøretøy, «Well-to-Wake» for marine fartøy og «Well-to-Wing», for luftfartøy, felles for disse er initialene noe som fører til at disse uttrykkene gjerne forkortes til «WTW» (Quist, 2024a). I denne oppgaven analyseres drivstoff for bruk i luftfart, og i den anledning vil det gjennomføres en Well-to-Wing-analyse. WTW-analysen kan så deles inn i to komponenter; Well-to-Tank (WTT) og Tank-to-Wing (TTW). Dette gjøres for å skille drivstoffproduksjonens effektivitet fra forbrukeffektivitet (Blok & Nieuwlaar, 2021).



Figur 10 Well-to-Wing (European Union Aviation Safety Agency, 2022)

Figur 10 viser et Well-to-Wing livsløp for fossil- og biobasert flydrivstoff, i figuren hentet fra EASA (European Union Aviation Safety Agency), benyttes begrepet «Pump», i stedet for «Tank», som er begrepet benyttet i denne oppgaven.

Well-to-Tank dekker hele prosessen fra utvinning av råstoffene som trengs for drivstoffproduksjon, gjennom raffinering og omforming, i tillegg til transport og distribusjon til flyets drivstofftank. WTT inkluderer forbruk og utslipp som genereres, frem til det skal det endelige drivstoffet skal brukes.

Tank-to-Wing utslipp og energibruk relateres til flyets effektivitet og forbruk. TTW starter når drivstoffet er tanket om bord flyet, og slutter når drivstoffet omgjøres til kinetisk energi i form av fremdrift. Denne delen analyserer utslipp og forbruk under selve flyvningen.

Well-to-Wing dekker hele produksjonsprosessen, fra dyrking eller utvinning av råstoff, gjennom produksjon av drivstoffet, til forbruk av det ferdige energiproduktet. WTW inkluderer altså både WTT- og TTW-delen av produksjonsprosessen.

2.2 Systemgrenser, omfang og allokering

Når en energikjedeanalyse utføres kreves det konsekvent bruk av metode og antagelser. Dette er relevant for alle faser og aspekter av analysen, og det er en forutsetning for resultatenes gyldighet og sammenlignbarhet (Joint Research Centre & Institute for Environment and Sustainability, 2010). Det er derfor viktig med en tydelig og sammenlignbar funksjonell enhet, i tillegg til å sette systemgrenser.

2.2.1 Funksjonell enhet

I en livssyklusanalyse er funksjonell enhet et viktig element som muliggjør objektive sammenligninger av ulike produkter og teknologier som tjener samme funksjon. En god funksjonell enhet skal være kvantitativ og presis (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022). Dette medfører en bedre transparens og tillater videre forskning til å måle resultater på en standardisert måte over tid. I luftfart finnes det flere funksjonelle enheter som benyttes, disse varierer gjerne mellom metrisk og imperisk enhet, i tillegg til variasjon mellom passasjer, tilgjengelige seter eller tonn. Eksempler er passasjerkilometer, setekilometer og tonnkilometer. I denne oppgave er passasjerkilometer (PKM) valgt, da dette er den enheten det var lettest å finne forbrukstall for. For å måle forbruk under selve flyvningen (TTW) blir derfor den funksjonelle enheten MJ/PKM. For å beregne livssyklusutslipp for drivstoff skal $\text{gCO}_2\text{e/MJ}$

benyttes for (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2022). Når disse slås sammen for å beregne på tvers av flyteknologier har jeg derfor valgt å benytte gCO₂e/PKM, som den funksjonelle enheten for å beregne utslipp fra vugge til vinge.

2.2.2 Systemgrenser

I en analyse er det viktig å definere studiens omfang, da dette avgjør hvilke aspekter av produktets livssyklus som inkluderes i analysen. Å sette presise systemgrenser er fundamentalt for å legge grunnlaget for videre analyse (Joint Research Centre & Institute for Environment and Sustainability, 2010). Systemgrensene definerer hvor analysen til livssyklusen starter og slutter. Energikjeder kan være svært omfattende, og det endelige produktet er ofte sammensatt av flere komponenter, hver med sin egen verdikjede. Fastsettelsen av systemgrenser i en energikjedeanalyse krever en vurdering av balansen mellom praktisk gjennomførbarhet og nøyaktighet. Gathorne-Hardy anbefaler at systemgrenser bør settes så stramt som mulig for å unngå innsamling og analyse av unødvendig informasjon, som i liten grad er vesentlig for analysen (Gathorne-Hardy, 2015). Samtidig stilles det krav i PAS 2050:2011 om at alle utslipp og opptak som har potensial til å bidra vesentlig til vurderingen av klimagassutslipp fra produktet, skal inkluderes (British Standards Institution, 2011). Ved bruk av andreordens energikjedeanalyse skal som nevnt i Blok & Nieuwlaar (2021), systemgrensene inkludere alt tap i konvertering og transport av energibæreren (Blok & Nieuwlaar, 2021).

2.2.3 Antagelser

For energikjedene som benytte biomateriale antas det at det benyttes rester, biprodukter eller avfall i drivstoffproduksjonen, noe som medfører at produksjon og kultivering av råmateriale ikke inkluderes innenfor systemgrensene, i henhold til ICAOs CORSIA metodologi for LCA for bærekraftig flydrivstoff (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2022). Andre energikilder enn primærkilden, som termisk og elektrisk energi, inkluderer virkningsgrad og utslipp for energien, mens produksjonsprosessen av energien faller utenfor systemgrensene. Produksjon av utstyr som fabrikk og fly, inkluderes heller ikke i analysen. Systemgrensene slutter ved forbruk av drivstoff i fly.

Videre er det gjort antagelser i transportavstand for biomateriale fra innsamling til produksjonsfasiliteter og for drivstoff fra produksjonsfasiliteter til fly, hvor disse avstandene settes til 1000 km. Det er også antatt at det vil benyttes lastebil med utslippsklassifisering EURO 6⁷, for transport og distribusjon. Basert på beregning gjennomført med forbruksdata for EURO

⁷ Europeisk utslippsstandard

6 lastebil fra Volvo, viser dette at drivstofforbruket for å frakte 1 MJ drivstoff 1000km er omtrent 0,01 MJ, for både SAF, konvensjonelt drivstoff og hydrogen (Volvo Trucks, 2018, 2022). For å forenkle beregningene i analysen settes derfor virkningsgraden for transport og distribusjon til 99 %, for alle energikjedene.

2.2.4 Allokering

I en drivstoffproduksjon er det ikke uvanlig at man vil produsere flere forskjellige produkter i tillegg til hovedproduktet. Disse andre produktene kalles biprodukter og har som regel en nyttefunksjon annet enn den av hovedproduktet. Et eksempel på dette er ved produksjon av flydrivstoff. I en produksjonsprosess optimalisert for produksjon av flydrivstoff, vil dette være hovedproduktet. I tillegg til flydrivstoff vil man gjennom raffinering og destillering produsere andre produkter som diesel eller voks, som da blir biprodukter. I LCA blir dette et problem når man skal beregne utslipp eller energibruk for et av disse produktene, og man må derfor benytte seg av en allokeringmetode (Cherubini et al., 2011). I denne oppgaven har jeg valgt å benytte meg av metode 5 fra Blok & Nieuwlaar (2021), som innebærer å allokere alt produkt, i tillegg til all energibruk og utslipp til hovedproduktet (Blok & Nieuwlaar, 2021). Dette er ikke den mest presise metoden, men er valgt grunnet oppgavens omfang.

2.3 Forskningstilnærming og datainnsamling

Når en livsløpsanalyse skal utføres, er datainnsamling essensielt, og her skiller man vanligvis mellom primær- og sekundærdata. Primærdata referer til data som er samlet inn direkte fra kilden eller gjennom spesifikk undersøkelse. I følge Quist (2024), anses primærdata for å være mer nøyaktig og relevant, ettersom de er direkte relatert til produkter, prosesser eller systemer som skal analyseres (Quist, 2024b). Samtidig er primærdatainnsamling en ressurs- og tidkrevende prosess, som kan være utfordrende å innhente. Sekundærdata omfatter data som allerede er samlet inn, og er tilgjengelig gjennom litteratur, databaser eller tidligere studier (Benedictine University Library, u.å.). Denne typen data benyttes gjerne når primærdata er utilgjengelig eller for ressurskrevende å innhente. Når sekundærdata er god, vil forskeren få tilgang til og mulighet for å undersøke større datasett. Dette er ønskelig når man skal dekke over et bredere nedslagsfelt (Johnston, 2014).

I denne oppgaven er det benyttet sekundærdata for å analysere de forskjellige energikjedene. Dette valget er drevet av de omfattende kravene til data for å dekke spekteret av energikilder og prosesser som er involvert i produksjonen av drivstoff. Primærdatainnsamling ville krevd industrielt samarbeid og tilgang til sensitiv data, noe som er tid- og ressurskrevende.

Datagrunnlaget er hentet gjennom litteratursøk, databaser eller informasjon og statistikk hentet direkte fra operatør eller produsent. I litteratursøket her hovedsakelig søkemotoren «Google Scholar» benyttet, i tillegg til «Web of Science» og biblioteksøkemotoren «Oria». I tillegg har gjennomgang av offentlige dokumenter og utgivelser, som rapporter, strategier og utredninger, gitt meg tilgang på data og statistikk.

Når sekundærdata benyttes, er det viktig å sørge for at informasjonen og datakildene er pålitelige og nøyaktige. Fremgangsmåten for å validere data i denne oppgaven har basert seg på kritisk gjennomgang av kilder og triangulering. I prosessen med å gjennomgå kildene er det viktig å forstå hvordan data har blitt generert og behandlet. Kimberlin & Winterstein (2008) understreker viktigheten av å forstå prosessen bak datainnsamlingen, inkludert hvordan og av hvem dataene har blitt kodet, i tillegg til formålet med og konsistensen i dataene. En grundig evaluering av disse faktorene er derfor nødvendig for å vurdere dataens pålitelighet (Kimberlin & Winterstein, 2008). Triangulering innebærer å kryssjekke data mot uavhengige kilder for å styrke gyldigheten. Holden (2003) understreker behovet for å bruke minst to, og helst flere, forskjellige kilder for å oppnå et robust datagrunnlag. Med bakgrunn i dette har jeg derfor så godt det lar seg gjøre forsøkt å samle inn flere enn to datakilder per delprosess. Holden peker også på resirkulering av data som en utfordring (Holden, 2003). Resirkulering av data referer til praksisen hvor tilsynelatende uavhengige analyser bruker samme datagrunnlag, men presenterer dette som nye funn. Resirkulering av data unngås ved å ettergå og verifisere kildegrunnlag ved de forskjellige analysene.

2.4 Analysemetode

Analysedelen i oppgaven er delt inn i to typer analyse, energianalyse og utslippsanalyse. Energianalysen omfatter energieffektiviteten til energikjedene, mens utslippsanalysen omfatter mengden klimagassutslipp produsert gjennom livsløpet til energikjedene.

2.4.1 Energianalyse

Energianalysen er gjennomført ved å regne sammen det totale energiforbruket gjennom livsløpet for de ulike energikjedene og måles som MJ/PKM⁸. I dette avsnittet forklares fremgangsmåten for å gjennomføre energianalysen. Metoden brukt er en andregrads energianalyse, hvor man inkluderer alle tap i energikonvertering fra råmateriale til forbruk. For å beregne det totale energibruket per passasjerkilometer må jeg først finne energibruk for produksjonsprosessen, altså Well-to-Tank-delen av analysen. Ettersom noen energikjeder tilfører annen energi enn primærenergien må dette beregnes ved flere formler:

$$E_{PRIMÆR,j} = \frac{1}{\prod \eta_j}$$

Hvor,

$E_{PRIMÆR,j}$ = Mengde primærenergi benyttet for å produsere 1 MJ drivstoff i energikjede j .

$\prod \eta_j$ = Produktet av alle virkningsgradene til delprosessene i energikjede j .

For å beregne annen tilført energi benyttes denne formelen:

$$E_{EL,j} = \frac{EK_j * LHV}{\prod \eta_j}$$

Hvor,

$E_{EL,j}$ = Mengden annen energi tilført i delprosessene for energikjede j .

EK_j = Energibruket til delprosessene i MJ/kg

LHV = Nedre brennverdi for drivstoff i MJ/kg

$\prod \eta_j$ = Produktet av alle virkningsgradene for delprosessene tidligere delprosesser for energikjede j .

⁸ $\frac{MJ}{Passasjerkilometer}$

Disse formlene betyr at jeg kan beregne total energi investert for energi levert, også kalt ERE (energy required for energy) (Blok & Nieuwlaar, 2021). For å finne ERE benyttes følgende formel:

$$ERE_j = E_{PRIMÆR,j} + E_{EL,j}$$

Hvor

$$ERE_j = (MJ_{PRIMÆR,j} + MJ_{EL,j}) / MJ_{LEVERT,j}$$

Videre kan følgende formel benyttes for å finne energibruk for WTT:

$$WTT_j = (ERE_j - 1) * TTW_j$$

Hvor,

TTW_j = energibruk under flyvning for energikjede j .

Når man så har funnet forbruk for WTT og TTW, blir så formelen for det totale energiforbruket for hele energikjeden (WTW):

$$WTW = WTT + TTW$$

2.4.2 Utslippsanalyse

For å finne det totale energi utslippet er energimengden brukt multiplisert med en utslippsfaktor. Utslippsfaktoren vil variere etter hvilken type energi som er benyttet. Formelen for beregning av utslipp blir derfor følgende:

$$TOTAL_{CO_2} = (E_{PRIMÆR} * U_{PRIMÆR} + E_{EL} * U_{EL} + E_{TRANSPORT} * U_{TRANSPORT}) * TTW$$

Hvor,

$U_{PRIMÆR}$ = Utslippsfaktor for primærenergien (g CO₂/MJ_{PRIMÆR})

U_{EL} = Utslippsfaktor for den tilførte energien (g CO₂/MJ_{EL})

$U_{TRANSPORT}$ = Utslippsfaktor for drivstoff benyttet under transport og distribusjon (g CO₂/MJ_{TRANSPORT})

TTW = Energibruk per passasjerkilometer (MJ/PKM)

Ved bruk av følgende formel vil man få god innsikt i de totale CO₂-utslippene til de forskjellige energikjedene.

I denne analysen er det tatt utgangspunkt i at biomateriale hentes fra rester, avfall eller biprodukter, i henhold til ICAO (2022) inkluderes ikke utslipp fra dyrking og kultivering i analysen (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2022). For utslipp under TTW fasen, settes utslippsfaktoren lik null, for drivstoff basert på biogent eller fanget karbon, som for SAF-kjedene. For utslippsanalysen i denne oppgaven er det kun sett på utslipp av CO₂. I en fullstendig LCA-analyse ville man vanligvis analysert utslipp av CO₂-ekvivalenter, som beregnes ved å multiplisere det globale oppvarmingspotensialet (GWP) til CO₂, CH₄ og N₂O⁹ over en 100-års tidshorison

2.5 Sensitivitetsanalyse

En sensitivitetsanalyse skal gjennomføres for å estimere effekten av valgene som er tatt med hensyn til metode og data på resultatene i analysen (International Organization for Standardization, 2006). I en sensitivitetsanalyse endrer man parametere i energikjeden, for eksempel ved å justere transportavstanden eller materialbruken. Dette kan gjøres ved å først, kopiere resultatene fra energikjeden og deretter lage en ny modell der man bruker andre parametere for å se forskjellen mellom resultatsettene. Sensitivitetsanalysen skal gjerne gjennomføres på svak data, eller der det er stort sprik mellom data (Nickel, 2024). I denne oppgaven er det valgt å gjennomføre sensitivitetsanalyse på 3 av energikjedene; S-2, M-2 og M-3.

I sensitivitetsanalysen av S-2, som representerer energikjeden for batterielektrisk flyvning, vil jeg endre forbruket av elektrisitet under flyvning. Dette vil gi en god analyse av hvordan forbruket påvirker den totale energieffektiviteten i energikjeden. Samtidig er forbruk for batterielektrisk fly en usikker variabel med begrenset datagrunnlag.

I sensitivitetsanalysen av M-2, som representerer energikjeden for flyvning med forbrenning av hydrogen, vil jeg endre virkningsgraden til elektrolyse, ettersom dette er en sentral delprosess i energikjeden.

I sensitivitetsanalysen av M-3, som representerer energikjeden for gassifisering og Fischer-Tropsch syntese av biomasse for mellomdistanseflyvninger, er virkningsgraden for selve

⁹ CO₂ = Karbondioksid, CH₄ = Metan, N₂O = Lystgass

Fischer-Tropsch syntesen endret på i sensitivitetsanalysen. Dette gjøres grunnet dens lave virkningsgrad, i tillegg til at det er en sentral prosess.

2.6 Scenarioanalyse

Scenarioanalyse gjennomføres for å se hvordan mulige fremtidige fremtidsscenarioer kan påvirke resultatene i analysen. I denne oppgaven gjennomføres scenarioanalyse for energikjedene M-1 (Konvensjonelt drivstoff), M-2 (Hydrogen i forbrenningsmotor), M-6 (E-Fuel), S-2 (Batterielektrisk) og S-5 (HEFA). I scenarioanalysen vil norsk energimiks erstattes med europeisk energimiks for å se hvordan resultatene påvirkes av en energimiks med høyere klimagassutslipp. Ved å simulere ulike scenarioer kan man oppnå en bedre forståelse for hvilke strategier og tiltak som kan være mest hensiktsmessige for fremtiden. Ved å bruke et bredt spekter av energikjeder vil jeg også få en god forståelse for hvilken effekt de to forskjellige scenarioene vil ha på ulike tvers av teknologiene.

2.7 Oppsummering av Metode

I denne oppgaven benyttes en andreordens energikjedeanalyse, for å svare på oppgavens forskningsspørsmål. Her blir det gjennomført beregning av energibruk per endelig levert energi, noe som igjen legger grunnlag for beregning CO₂-utslipp for energikjedene. Oppgaven benytter en Well-to-Wing tilnærming som er en variant av den mer kjente Cradle-to-Grave tilnærmingen. Oppgavens funksjonelle enhet er definert som MJ/PKM, som vil vise energibruk per passasjerkilometer. Dette er en funksjonell enhet som svært godt egnet for analyse av ulike typer passasjertransport. Oppgavens datagrunnlag baserer seg hovedsakelig på bruk av sekundærdata, grunnet større tilgjengelighet og et bredt spekter av data. For å evaluere robustheten av oppgavens resultater gjennomføres sensitivitetsanalyse og scenarioanalyse på utvalgte energikjeder.

3 Teknologi og data

Dette kapittelet fokuserer på å presentere teknologiene og data for analysen. Først vil en grundig gjennomgang av energikjedene presenteres, hvor jeg utforsker både tradisjonelle og alternative drivstoffteknologier. I tillegg presenteres de ulike delprosessene for hver av energikjedene. Energifkjedene deles opp i kort- og mellomdistanse, i tillegg til Well-to-Tank og Tank-to-Wing, for å gi en grundig og sammenlignbar analyse som dekker oppgavens forskningsspørsmål.

I det neste delkapittelet vil spesifikk data og datakilder benyttet i denne oppgaven, presenteres. Ettersom denne oppgaven i stor grad baserer seg på sekundærdata fra litteratur, blir dataintegrasjon og kvalitet også vurdert. Tolkning og standardisering har vært en stor utfordring i denne oppgaven, noe som vektlegges i avsnittet om dataintegrasjon og kvalitet.

3.1 Energifkjeder

Energifkjedene i analysen er delt opp i 2 hovedkategorier; kortdistanse og mellomdistanse. Kortdistanseflyvninger, kalt *Short-Haul*, defineres av IATA som flyvninger på opptil 3 timer, mens mellomdistanseflyvninger, også kalt *Medium-Haul*, defineres som flyvninger på mellom 3 og 6 timer (International Air Transport Association, 2021). Bakgrunnen for kategoriseringen, er de forskjellige egenskapene til produktene. Batterielektrisk og brenselcelle med hydrogen vil i all hovedsak være egnet for kortdistanseflyvning grunnet begrenset rekkevidde (Menon Economics, 2022). I tillegg til batterielektrisk og brenselcelle med hydrogen, vurderes SAF som et alternativ også for kortere flyvninger. SAF vil være avgjørende for utslippskutt i overgangsperioden til elektrisk luftfart, ettersom det fungerer som et *drop-in*¹⁰ til dagens konvensjonelle drivstoff. Grunnet likheten egenskaper mellom SAF og konvensjonelt drivstoff, vil ikke bruk av SAF medføre omforming av infrastruktur og flyteknologi på samme måte som elektrisk- og hydrogen-basert luftfart. For å gjennomføre analysen for de to kategoriene er det hentet inn forbrukstall for flytyper typisk brukt i kategoriene. For kortbanedistanse er det tatt utgangspunkt i turbopropell fly med kapasitet på mellom 35-45 passasjerer, som Dash 8-100 eller ATR 42, mens det for mellomdistanse er tatt utgangspunkt i fly med jetmotor og kapasitet på 150-180 passasjerer. Som Boeing 737-800 eller Airbus A320. Datagrunnlag rundt forbruk for batteri- og hydrogenbaserte fly er svært begrenset, da disse fortsatt er under utvikling og bare

¹⁰

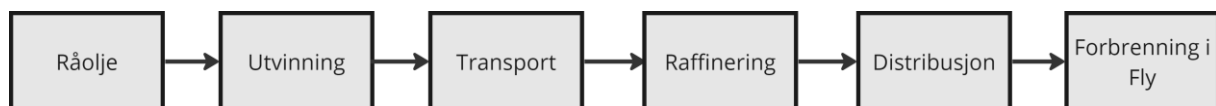
et fåtall flyvninger er gjennomført. Jeg har derfor basert mine forbrukstall på estimerte forbrukstall fra det gitte flyets produsent. Figuren under gir en påminnelse på oversikten over de ulike energikjedene og deres drivstofftype.

Energikjede	Teknologi	Motortype
Kortdistanse (e.g. Dash 8-100)		
S-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Turboprop
S-2	Batterielektrisk	El-propell
S-3	Brenselcelle m/hydrogen	El-propell
S-4	FT-SPK	Turboprop
S-5	HEFA	Turboprop
S-6	Alkohol til Jet	Turboprop
S-7	Syntetisk E-Fuel	Turboprop
Mellomdistanse (e.g. Boeing 737)		
M-1	Konvensjonelt drivstoff (Jet A-1)	Jet
M-2	Hydrogen Forbrenning	Hydrogen Jet
M-3	FT-SPK	Jet
M-4	HEFA	Jet
M-5	Alkohol til Jet	Jet
M-6	Syntetisk E-Fuel	Jet

Figur 11 Energikjeder oversikt

3.1.1 S-1 og M-1 Konvensjonelt flydrivstoff

Energikjede S-1 og M-1 er baseline for analysen, og baserer seg på konvensjonell bruk av fossilt flydrivstoff, også kalt Jet A-1 eller ATF (Aviation Turbine Fuel). Energikjedene S-1 og M-1 er like på Well-to-Tank stadiet, men skilles på Tank-to-Well, etter flytypen det brukes på. Energikjeden inkluderer utvinning av råolje, transport til raffineri, destillering og produsering, distribusjon og forbruk.

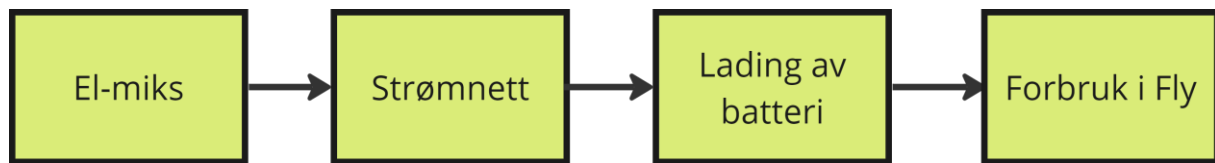


Figur 12 Energikjede S-1/M-1

3.1.2 S-2 Batterielektrisk

Energikjede S-2 omhandler anvendelsen av et batterielektrisk fly. Energikjeden startet med elektrisitet fra norsk energimiks, som så transporteres gjennom strømmettet til flyplass for distribusjon til fly. Elektrisiteten overføres til batteri, før den omgjøres til mekanisk energi som

driver flyets motorer. Behovet for omgjøring av energi er mindre i denne kjeden, og energikjeden er av den grunn den kjeden med færrest delprosesser inkludert i denne oppgaven.



Figur 13 Energikjede S-2

Norge vurderes av flere flyprodusenter som et aktuelt marked for de første elektrifiserte flyrutene. Det norske kortbanenettet, med korte avstander og lave passasjertall, vil være godt egnet for elektrifisering (Avinor, 2023). Hele 20 norske innenriks ruter er på en distanse mellom 38-170 km (Reimers, 2020). Disse rutene vil være de mest aktuelle i den nærmeste fremtiden. Samtidig som Norges topografi medfører gode muligheter for elektrisk luftfart, har også Norge en stor tilgang på fornybar energi. Norge ligger langt fremme i utvikling av grønn og elektrisk transport, hvorav den norske bilparken har den høyeste andelen batterielektriske personkjøretøy i verden. Norges store vann- og vindkrafts ressurser gir befolkningen tilgang på ren og billig strøm noe som videre bidrar til å gjøre Norge aktuelt for elektrisk luftfart.

Samtidig som at Norge kan være et aktuelt sted for utvikling av elektriske passasjerfly, er det også store barrierer som må overkommes før elektrifiseringen kan gjennomføres. Selv med teknologiutvikling og en mulig fremtidig energitetthet i batteri på 0,5 kWh/kg (Reimers, 2020), vil det være langt unna energitettheten til ATF¹¹ som ligger på ca. 12 kWh/kg. Dette vil medføre en høyere vekt/passasjer noe som vil begrense minimal rullebanelengde for batterielektriske fly. Det norske kortbanenettets rullebaner har lengder på mellom 800-1000 meter. Disse vil måtte utvides dersom det skal være aktuelt med den foreslåtte batterielektriske teknologien.

3.1.3 S-3 Hydrogen brukt i brenselcelle

Hydrogen brukt i brenselcelle er energikjede S-3. Denne kjeden inkluderer flere steg for omgjøring av elektrisitet til en mer kompakt energibærer. Energikjeden starter med elektrisitet fra el-miks som så transporteres gjennom strømnettet til et hydrogenproduksjonsanlegg. Hydrogen produseres gjennom en SOEC-elektrolyse med bruk av elektrisitet og vann. Hydrogengassen som produseres i elektrolysen har lav tetthet og det er derfor nødvendig å

¹¹ Aviation Turbine Fuel, også kalt Jet-Fuel eller JET A-1

komprimere gassen til en væske. Ved å omgjøre hydrogengassen til flytende hydrogen øker energitettheten fra ca. 5000 MJ/m³ til 8500 MJ/m³ (Demaco, u.å.). Dette gjøres ved en flytendegjøringsprosess. Flytendegjøringsprosessen omgjør hydrogengassen til flytende hydrogen ved å kjøle ned gassen til under -253° celsius (Pettinato et al., 2022). Det flytende hydrogen distribueres så til flyplass for tanking på fly. For å omgjøre flytende hydrogen til mekanisk energi benyttes brenselceller om bord i flyet. Brenselcellene produserer elektrisitet til å drive en elektrisk motor som sørger for fremdrift.



Figur 14 Energikjede S-2

Hydrogen er en allsidig og svært lovende energibærer, som ofte fremheves som en potensiell løsning til dekarbonisering av sektorer som er vanskelig å elektrifisere, som luftfart og spesielt langdistanseflyvninger (DNV, 2024). I luftfart kan hydrogen anvendes som energibærer ved å forsyne en brenselcelle eller ved direkte forbrenning i en forbrenningsmotor. Ved bruk av hydrogen sammen med brenselceller, kan elektriske fly oppnå lengre rekkevidde og lavere vekt. Disse teknologiene egnet for forskjellige markeder; bruk av brenselceller er særlig egnet til å operere i markeder som i dag er preget av turbopropfly (e.g. Dash 8-Q400), mens hydrogen i forbrenningsmotor potensielt kan være mer egnet for langdistanseflygning. Den verdensledende flyprodusenten Airbus ser på flere konsepter for fremtidig hydrogendrevet luftfart, disse inkluderer bruk av hydrogen i både brenselcelle og forbrenningsmotor. En vesentlig utfordring med hydrogen er imidlertid lav volumetriske energitetthet. Henholdsvis gassform og flytende form vil hydrogen kreve nærmere 7 og 4 ganger volumet til samme mengde energi i ATF (DNV, 2024). Airbus forventer derfor at fremtidens hydrogen-fly vil kunne se ganske annerledes ut i forhold til dagens flymaskiner, for å inkorporere større drivstofftanker (Airbus, 2024).

Selv om hydrogen byr på mange fordeler, vil det også være utfordringer knyttet til omstillingen. Produksjon av utslippsfritt hydrogen gjennom elektrolyse er en energikrevende prosess med en energieffektivitet på 60-80% (Ballal et al., 2023). For å øke energitettheten må hydrogengassen flytendegjøres til væskeform (LH₂). Flytendegjøring medfører ytterligere energibruk, noe som senker den totale energieffektiviteten i det endelige drivstoffet. Dette står i kontrast til batterielektriske systemer, hvor energioverføringen fra strømnnett til batteri er mer direkte. Videre vil implementering av hydrogen kreve omfattende endringer i infrastruktur for forsyning og tanking ved flyplasser.

3.1.4 M-2 Hydrogen brukt i forbrenningsmotor

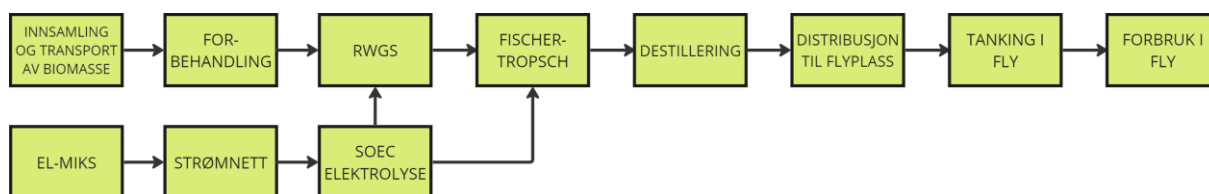
Energikjede M-2, hydrogen brukt i forbrenningsmotor, innebærer de samme prosessene som S-3, for Well-to-Tank delen. Forskjellen mellom M-2 og S-3 ligger i måten flytende hydrogen omgjøres til mekanisk energi. I stedet for å bruke hydrogen til å forsyne en brenselcelle som produserer elektrisitet, forbrennes i stedet hydrogenet i en forbrenningsmotor, mer lignende den konvensjonelle metoden. Denne metoden ble forsket på og benyttet i passasjerfly allerede i 1988, når Sovjetunionen forsket på ulike fremdriftsmetoder for luftfart. Passasjerflyet TU-155 ble modifisert til å kunne bruke flytendehydrogen til forbrenning i jetmotor (Degirmenci et al., 2023). Hydrogen kan også produseres gjennom andre metoder, som dampreforming av naturgass eller gassifisering av kull (IEA ETSAP, 2014), men ettersom dette er fossile energikilder og oppgaven ønsker å analysere bærekraftige metoder blir bare elektrolyse metoden analysert i denne oppgaven.



Figur 15 Energikjede M-2

3.1.5 S-4 og M-3 Gassifisering og Fischer-Tropsch syntese

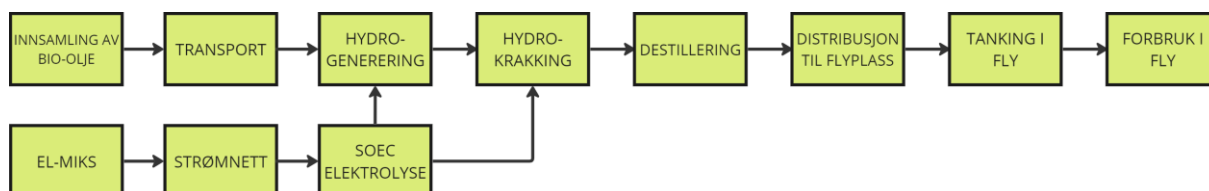
Gassifisering og Fischer-Tropsch syntese (FT-SPK) representerer en avansert teknologi for konvertering av karbonhold råmateriale til syntesegass og deretter flytende hydrokarboner. Gassifiseringen er en termokjemisk prosess som omdanner det karbonholdige råmateriale til en syngas, bestående av karbonmonoksid, hydrogen, karbondioksid og metan (Lee et al., 2023). Deretter brukes Fischer-Tropsch syntese for å omgjøre syngassen, som etter rensing består av hydrogen og karbonmonoksid, til et flytende produkt. Hele prosessen består av flere nøkkelprosser for å få det endelige drivstoffet. Samtidig er dette en svært anvendelig prosess, som kan brukes på flere forskjellige typer råmateriale, som avfall, fast biomateriale, og ren CO₂, samtidig som den ved bruk av fornybar energi, potensielt kan redusere klimagassutslipp betraktelig. En viktig faktor i FT-SPK prosessen er systemeffektiviteten, som kan optimaliseres ved bruk av energigjenvinning hvor overskuddsvarme og energi fra prosessen kan brukes til å produsere damp og elektrisitet.



Figur 16 Energikjede S-4 og M-3

3.1.6 S-5 og M-4 Hydroprosesserte estere og fettsyrer

Energikjedene S-5 og M-4 baserer seg på SAF produsert gjennom en HEFA teknologi. HEFA drivstoff innebærer omgjøring av flytende bio-oljer, som frityrolje eller dyrefett. Disse oljene har potensial til å transformeres til drivstoff med lignende egenskaper som ATF. Energikjeden starter med innsamling av råmateriale, som deretter transporteres til produksjonsområdet hvor det går gjennom 3 hovedprosesser: hydrogenisering, hydrokraking og destillering (Tan & Tao, 2019). Den første delprosessen kalles hydrobehandling. Her blir oljer og fett behandlet med hydrogen for å fjerne oksygen og andre urenheter, noe som resulterer i mettede hydrokarboner. Videre kommer hydrokraking, hvor hydrokarbonmolekyler brytes ned til mindre størrelse og strukturen i molekylene endres. Også her tilføres hydrogen. Til slutt kommer destillering som skiller jetdrivstoff fra andre biprodukter som diesel og gasser (Tao et al., 2017).

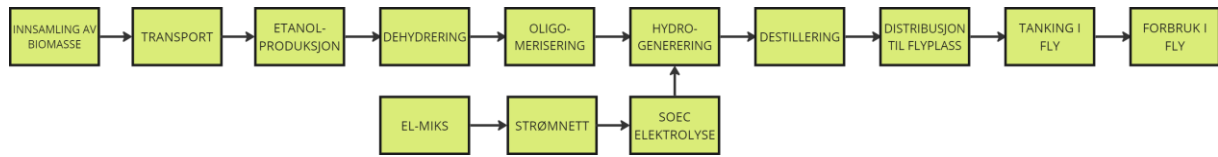


Figur 17 Energikjede S-5 og M-4

3.1.7 S-6 og M-5 Alkohol til Jet

Energikjede S-6 og M-5 benytter Alkohol-til-Jet (AtJ) metoden for å produsere SAF. «Alkohol-til-Jet prosessen kan utføres gjennom forskjellige biokjemiske fermentasjons metoder. Dette inkluderer fermentering av karbohydrater og avansert fermentering med høyt avanserte mikrober» (Geleynse et al., 2018). Det første steget for prosessen fermentering av råmaterialet for å fremstille alkohol. Deretter dehydreres alkoholen for å fjerne vann og omdanne det til olefiner. Neste steg er oligomerisering som innebærer å koble olefiner sammen til lengre kjeder, kalt oligomerer, ved å benytte katalysatorer. Videre hydrogeneres oligomerene ved tilførsel

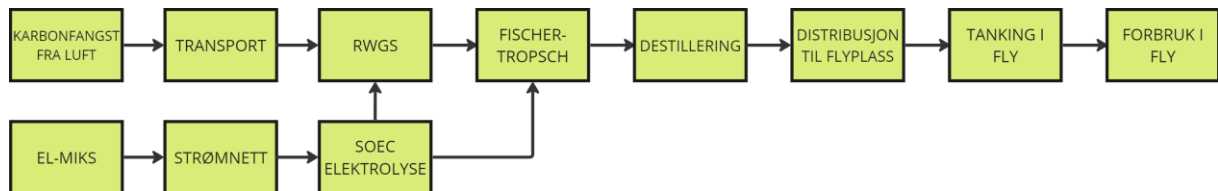
av hydrogen. Deretter blir produktet destillert til drivstoff og biprodukter (Han et al., 2017; Pamula et al., 2021).



Figur 18 Energikjede S-6 og M-5

3.1.8 S-7 og M-6 Syntetisk E-Fuel

Energikjede S-7 og M-6 innebærer produksjon og bruk av syntetisk E-Fuel eller Elektrofuel. Metoden baserer seg på omdanning av CO₂ som råmateriale til drivstoff gjennom en Fischer-Tropsch syntese. Selve fremstillingen av drivstoffet er lignende den for FT-SPK, men forskjellen ligger i råmaterialet. CO₂ brukt i E-Fuel kan hentes gjennom faste karbonkilder som biomasse, eller fra luften gjennom karbonfangst. E-Fuel er en form for karbonfangst og bruk, også kalt CCU (Carbon Capture and Utilization). Fordelen med E-Fuel er at den er mindre arealkrevende i forhold til de andre SAF-fremstillende energikjedene. Produksjon av E-Fuel er 8 ganger mer arealeffektivt enn biodrivstoff og trenger 95% mindre vann. I tillegg slipper man konkurranse med spiselige råmateriale (Norsk E-Fuel, u.å.).



Figur 19 Energikjede S-7 og M-6

3.2 Data

I dette delkapittelet vil jeg presentere datagrunnlaget som ligger til grunn for analysen gjennomført i oppgaven. Gjennom en detaljert gjennomgang av sekundærdata hentet fra produsenter og litterære kilder, vil man få en god forståelse for energibruket i de ulike energikjedene for både kort- og mellomdistanseflygninger. Kapittelet er delt inn i to deler: Well-to-Tank og Tank-to-Wing. I Tank-to-Wing presenteres data for energibruk under flygninger for de forskjellige teknologiene, mens Well-to-Tank gir en grundig gjennomgang av data samlet inn for produksjonsteknologiene til de ulike drivstoffteknologiene.

3.2.1 Tank-to-Wing

For Tank-to-Wing delen av analysen er det hentet sekundærdata direkte fra produsenter i tillegg til litterære kilder. Dataen som er hentet gjelder for fulle flyvninger. Utregning av drivstofforbruk passasjerflygninger er ofte en komplisert prosess, som inkluderer mange parametere som: lengde på rullebane under landing og «take-off», klattringsrate, vekt, balanse og fart (Botley, 2019). Data for batterielektrisk- og hydrogen flygninger, er noe usikker da dette er teknologi i forsknings- og utviklingsfase.

Tank-to-Wing					
Kortdistanse/Short-Haul					
Energikjede	Motortype	Modell eksempel	Passasjerer	MJ/PKM	kilde
Energikjede S-1 + S-4 til S-7	turboprop	Dash 8-100/200/ATR 42	35-50	0,320	(Reimers, 2018)
		Dash 8 Q400/ATR 72	75-85	1,080	(Reimers, 2020)
				0,854	(Mukhopadhaya & Graver, 2022)
				0,751	Gjennomsnitt
Energikjede S-2	Propell EL	Eviation Alice/Elysian E9X/Heart ES-23	19	0,450	(Cavicchia et al., 2024)
		Zunum ZA50	50	0,150	(Reimers, 2020)
		Bolt 9 (500 Wh/kg)	9	0,730	(Mukhopadhaya & Graver, 2022)
		Bolt 19 (500 Wh/kg)	19	0,390	
		Bolt 90 (500 Wh/kg)	90	0,360	
					0,416
Energikjede S-3	Hydrogen Fuel Cell Propell	Retrofit ATR 72/Zero Avia ZA2000	58-72	0,530	(Mukhopadhaya, 2023)
				0,420	(ZeroAvia, 2024b)
				0,475	Gjennomsnitt
Mellomdistanse/Medium-Haul					
Energikjede M-1 + M-3 til M-6	Jet	Boeing 737 Max/Airbus A320neo	150-180	1,04	(Baharozu et al., 2017)
				0,864	(Mukhopadhaya & Graver, 2022)
				0,828	(Reimers, 2020)
				0,911	Gjennomsnitt
Energikjede M-2	Hydrogen Jet	Ingen informasjon	150-180	0,95	(Baharozu et al., 2017)
				0,93	(Verstraete, 2015)
				0,93	(Mukhopadhaya & Graver, 2022)
				0,937	Gjennomsnitt

Tabell 4 Tank-to-Wing forbruk

Som man kan se i tabellen over er batterielektrisk fremdrift den mest effektive formen for fremdrift basert på MJ per passasjerkilometer. Samtidig kan man se ganske stor forskjell mellom hydrogen variantene, hvor forbrenning av hydrogen direkte i forbrenningsmotor har nærmere dobbelt så høyt forbruk som ved elektrisk fremdrift fra brenselcelle.

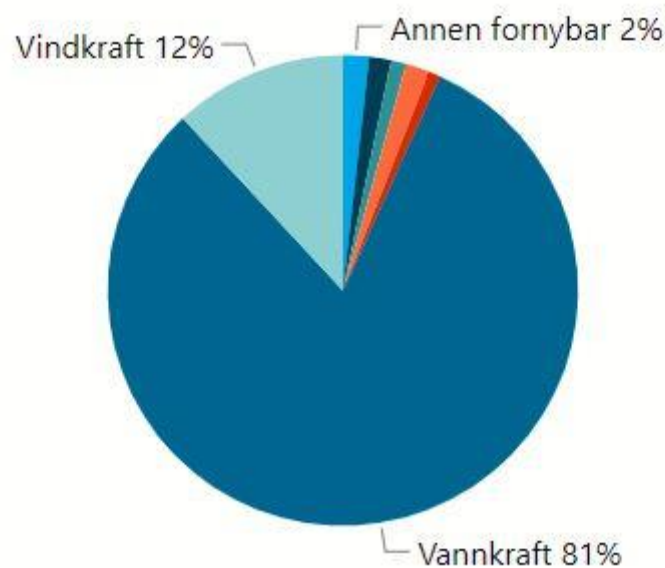
3.2.2 Well-to-Tank

I dette delkapittelet vil jeg presentere data hentet for Well-to-Tank delen av analysen. Grunnet den store variasjonen i energikjeder er det også mange ulike delprosesser som inkluderes i analysen. Noen av delprosessene er slått sammen for å gjøre prosessen med datainnsamling noe

enkler, som for eksempel, Fischer-Tropsch syntese og destillering/fraksjonering til forskjellige produkter. Først vil jeg presentere data som er felles for alle energikjedene, dette er energimiks, transport og distribusjon (Transport og distribusjon gjelder ikke for S-2). Deretter vil data for de ulike delprosessene i energikjedene presenteres.

3.2.2.1 Energimiks

I oppgaven er norsk energimiks benyttet. Tall fra NVE viser at norsk energimiks består i hovedsakelig av fornybar energi, hvorav 81% vannkraft, 12 % vindkraft og 2 % annen fornybar energi. Den norske strømmen er blant de reneste i verden, med en CO₂-faktor på 19 gram CO₂-ekvivalenter per kWh (Norges Vassdrags- og Energidirektorat, 2024).



Figur 20 Norsk energimiks for 2022 (Norges Vassdrags- og Energidirektorat, 2024)

Europeisk energimiks benyttes i sensitivitetsanalysen, for å se hvilken påvirkning bruk av en annen energimiks vil ha på energikjedene for hydrogen og batterielektrisk. Europeisk energimiks hadde i 2022 en CO₂-faktor på 251 gCO₂-ekvivalenter per kWh (European Environment Agency, 2023).

3.2.2.2 Transport og distribusjon

Transport av råmateriale til produksjon og drivstoff til flyplass er to variabler som vil variere mye i praksis. De mulige transportmidlene for transport og distribusjon vil være tog, tungtransport eller skipsfart, og valget avhenger av type produkt, frekvens, kapasitet, pris og tilgjengelig infrastruktur (Halvorsen et al., 2012). I denne oppgaven er tungtransport valgt, og

det er satt en standard på at avstand transport fra råmateriale til produksjonsfasilitet og produksjonsfasilitet til flyplass vil være 500 km. Basert på utlippstall fra Volvo, det kreve 0,003 liter drivstoff å frakte 1 kg last 1000 km, noe som igjen vil gi et CO₂ utlipp på 8,7 gram (Volvo Trucks, 2018, 2022). Tallene er basert på en Volvo FH 460 lastebil, som er klassifisert som EURO 6 lastebil.

3.2.2.3 Kort om datapresentasjon

Datagrunnlaget fremstilles i tabeller som viser virkningsgrad for hver enkelt delprosess, inkludert i oppgaven. Tabellen viser også mengden MJ inn og MJ ut av hver delprosess. Videre varierer det mellom bruk av elektrisitet eller bruk av egenprodusert energi i de ulike prosessene. Variabelen MJ_{EL} viser til mengden elektrisitet benyttet i delprosessen, mens MJ_{TAP}, viser til mengden egenprodusert energi benyttet eller tapt. For energikjedene for hydrogen og batterielektrisk er kun MJ_{TAP} inkludert i tabellene, ettersom elektrisitet er energikjedenes primærenergi.

3.2.2.4 Energikjede S-1 og M-1

Produksjon og utvinning av råolje krever store mengder energi. Energien som benyttes i utvinning og raffinering er hovedsakelig forbrenning av gass i generator (Equinor, u.å.). I Norge var forbruket under produksjon av olje og gass på norsk sokkel 63 TWh i 2022 (Norges Vassdrags- og Energidirektorat, 2023).

Utvinning av råolje				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
88,5 %	1,130	0,0	0,130	(Jing et al., 2022)
97,5 %	1,026	0,0	0,026	(Norges Vassdrags- og Energidirektorat, 2023; Regjeringen, 2022)
93 %	1,078	0,0	0,078	Gjennomsnitt

Tabell 5 Energikjede S-1/M-1 Utvinning av råolje

Raffinering av råolje innebærer flere delprosesser, som destillering, konvertering og videre behandling. Under produksjonsprosessen av drivstoff fra råolje, benytter vanligvis raffineriene egenproduserte drivstoff for å møte energikravene (Concawe, 2012).

Raffinering				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
95,3 %	1,049	0,0	0,049	(Elgowainy et al., 2014)
93,0 %	1,075	0,0	0,075	(Concawe, 2012)
94,0 %	1,064	0,0	0,064	(Jing et al., 2022)
94 %	1,063	0,0	0,063	Gjennomsnitt

Tabell 6 Energikjede S-1/M-1 Raffinering

3.2.2.5 Energikjede S-2

For energikjede S-2 er det færre prosesser for Well-to-Wing. Energi hentes fra strømmettet via transformatorer, til flyplassen hvor det batteridrevne el-flyet kan lades. Mulige metoder inkluderer bytting av batteri eller batterilading mellom hver flyvning (Mitici et al., 2022). I denne oppgaven tas det utgangspunkt i at man ikke bytter batteri, men i stedet lader det. Batteritypen benyttet i denne analysen er litium-ion-batteri, som benyttes i de fleste elektriske kjøretøy i dag (US Department of Energy Efficiency & Renewable Energy, u.å.).

Batterilading			
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{TAP}	Kilde
97,0 %	1,031	0,031	(Guo et al., 2021)
96,0 %	1,042	0,042	(Collin et al., 2019)
96,5 %	1,036	0,036	Gjennomsnitt

Tabell 7 Energikjede S-2 Batterilading

Når elektrisitet transporteres gjennom kraftnettet, vil overføringstap forekomme. Overføringstapet avhenger av avstand, spenning og ytre forhold som vær og temperatur. Dette gir en virkningsgrad i kraftnettet. Virkningsgraden for kraftnettet er den samme for energikjedene S-2, S-3 og M-2.

Kraftnett			
Virkningsgrad	MJ inn/MJ ut	MJ tap	kilde
94,4 %	1,059	0,059	(Statistisk Sentralbyrå, 2024) (jan-mars 2024)
90,0 %	1,111	0,111	(Brunborg, u.å.)
90,0 %	1,111	0,111	(Norgesnett, u.å.)
91,5 %	1,094	0,094	Gjennomsnitt

Tabell 8 Energikjede S-2 Kraftnett

3.2.2.6 Energikjede S-3 og M-2

Hydrogen produseres hovedsakelig gjennom omforming av hydrokarboner. Sintef (2019) forklarer at nesten 96 % av den samlede globale hydrogen produksjonen er basert på fossilt brensel (Tomasgard et al., 2019). For å redusere klimagassutslippet til energikjeden er elektrolyse valgt. Elektrolyse produserer hydrogen ved tilførsel av H₂O og elektrisitet. SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell) er i valgt som elektrolyse teknologi i denne oppgaven, grunnet dens store potensial til energieffektiv hydrogenproduksjon (Ni et al., 2008).

Elektrolyse (SOEC)			
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{TAP}	Kilde
80,0 %	1,250	0,250	(Ballal et al., 2023)
84,0 %	1,190	0,190	(Fuel Cell Energy, u.å.)
85,6 %	1,168	0,168	(van der Giesen et al., 2014)
86,1 %	1,161	0,161	(Liu et al., 2020)
83,9 %	1,193	0,193	Gjennomsnitt

Tabell 9 Energikjede S-3/M-2 Elektrolyse

Etter at hydrogengass er produsert må denne komprimeres for å øke energitettheten. Dette gjøres for å redusere tankstørrelse om bord i flyet, i tillegg til vil det effektivisere transport og distribusjon av hydrogenet. Hydrogengassen må kjøles ned til -253°C for å flytendegjøres (Berstad et al., 2019).

Flytendegjøring			
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{TAP}	Kilde
75,2 %	1,330	0,330	(Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 2022)
71,8 %	1,394	0,394	(Berstad et al., 2019)
73,5 %	1,362	0,362	Gjennomsnitt

Tabell 10 Energikjede S-3/M-2 Flytendegjøring

3.2.2.7 Energikjede S-4 og M-3

Før råmateriale kan gassifiseres og omdannes til drivstoff må det forbehandles. For biomasse handler dette om å redusere fuktighet i materialet, i tillegg til å redusere størrelsen. Det gjennomføres gjennom tørking ved temperatur, mens reduksjon av størrelse gjennomføres ved kutting og maling av biomaterialet (Swanson et al., 2010). For kommunalt fast avfall, kreves det sortering av avfall, i tillegg til reduksjon av fuktighet og størrelse. Man vil da få et avfallsbasert brensel som kan benyttes i en gassifiseringsprosess, for å produsere syngas (Pressley et al., 2014).

Forbehandling av biomasse					
Virkningsgrad	MJ inn/MJ ut	MJEL	MJ tap	Kilde	Råmateriale
92,4 %	1,082	0,082	0,0	(Swanson et al., 2010)	Maisplanterester
73,7 %	1,357	0,357	0,0	(Lee et al., 2022)	Kommunalt Fast Avfall
83,1 %	1,220	0,220	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 11 Energikjede S-4/M-3 Forbehandling

Ved gassifisering av biomasse benyttes ofte en «Reversed Water Gas Shift»-reaksjon (RWGS). I en vanlig «Water Gas Shift»-reaksjon (WGS) produseres hydrogen og karbondioksid, fra CO og H₂O, mens i en RWGS reverseres denne reaksjonen slik at man produserer syngas bestående av CO og H₂, i tillegg til mindre deler CH₄ og CO₂ (Lee et al., 2014). Lee (2014) forklarer videre at WGS også spiller en viktig rolle i gassifisering av biomasse, da den kan produsere hydrogen for å balansere forholdet mellom CO og H₂ i syngassen. Karbondioksidet som brukes i gassifiseringen, kan hentes fra luften gjennom karbonfangst, eller som i FT-SPK-prosessen, gjennom fast biomateriale. En annen metode som kan brukes i gassifiseringsprosessen, kan være en «Dual-fluidized bed»-gassifiserer (DFB). En DFB benytter damp i høy temperatur sammen med biomasse for å produsere syngas. Her benyttes omtrent 40% av den opprinnelige biomassen til forbrenning for å generer termisk og elektrisitet energi som kan benyttes i forbehandling, gassifisering og Fischer-Tropsch syntesen (Diederichs et al., 2016). Etter at syngas er produsert, må urenheter fjernes fra gassen, noe som gjøres ved bruk av damp (European Technology and Innovation Platform, 2021). I denne analysen er gassifisering og rensing av syngas slått sammen til en prosess.

Gassifisering (Biomasse)					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
56,0 %	1,786	0,786	0,0	(Násner et al., 2017)	Kommunalt Fast Avfall
64,0 %	1,563	0,563	0,0	(Neuling & Kaltschmitt, 2017)	skogrester
75,7 %	1,321	0,321	0,0	(Pressley et al., 2014)	Kommunalt Fast Avfall
65,2 %	1,556	0,556	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 12 Energikjede S-4/M-3 Gassifisering

Fischer-Tropsch syntese (F-T) er en allsidig prosess som kan brukes med en rekke råmaterialer. Syntesen gjennomføres i en F-T reaktorsom produserer hydrokarboner med lignende sammensetning som fossil olje fra syntesegass, bestående av karbonmonoksid (CO) og hydrogen (H₂) i et forhold på én del CO til to deler H₂ (Rojas-Michaga et al., 2023). Syntesen benytter jern- eller koboltbaserte katalysatorer i prosessen (European Technology and Innovation Platform, 2021). Forholdet mellom H₂ og CO, påvirkes av gassifiseringen i RWGS-reaktoren og andre operasjonelle forhold, som temperatur og trykk. Etter F-T prosessen gjennomgår drivstoffet en hydrobehandlingsprosess for å fjerne uønskede stoffer som nitrogen, oksygen og svovel, i tillegg til å forbedre drivstoffets kvalitet (Tan & Tao, 2019). Hydrogen tilføres både i gassifiseringsprosessen og til syngassen før den ankommer F-T reaktoren (Zang et al., 2021). F-T prosessen produserer energi, som igjen kan benyttes i andre delprosesser

I denne analysen er det tatt et gjennomsnitt for virkningsgrad i Fischer-Tropsch med forskjellige typer biomasse, disse inkluderer kommunalt fast avfall, rester fra maisplanter og skogrester.

Fischer-Tropsch (biomasse)					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
59,1 %	1,692	0,0	0,692	(Swanson et al., 2010)	Maisplanterester
44,0 %	2,273	0,0	1,273	(Neuling & Kaltschmitt, 2017)	skogrester
75,7 %	1,321	0,0	0,321	(Pressley et al., 2014)	Kommunalt Fast Avfall
59,6 %	1,762	0,0	0,762	Gjennomsnitt	

Tabell 13 Energikjede S-4/M-3 Fischer-Tropsch

3.2.2.8 Energikjede S-5 og M-4

HEFA prosessen innebærer raffinering og omgjøring av bio-oljer til drivstoff gjennom flere steg. Det første steget er hydrobehandling, her tilføres triglyserider fra planteolje eller animalsk fett sammen med hydrogen. Dette fører til metning av dobbeltbindingene i fettsyrene, i tillegg til at triglyseridene omdannes til mettede fettsyrer (Béalu, 2017). Videre går fettsyrene gjennom hydrodeoksygenering, dekarbonylasjon eller dekarbosylering, som benytter hydrogen til å fjerne oksygen fra fettsyrene og danne hydrokarboner med ett karbonatom mindre enn fettsyrene (Tao et al., 2017).

Hydrobehandling					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
97,0 %	1,0309	0,0309	0,0	(Vela-García et al., 2021)	Kjerneolje og Fettsyrer
87,8 %	1,1388	0,1388	0,0	(Béalu, 2017)	Rapsolje
92,4 %	1,0849	0,0849	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 14 Energikjede S-5/M-4 Hydrobehandling

For å møte ønskede egenskaper går så produktet gjennom hydrokrakking og isomerisering. Hydrokarbonene fra hydrogeneringen er for lange og må brytes ned i mindre kjeder, dette gjøres ved hydrokrakking. I tillegg isomerises hydrokarbonene for å endre strukturen i molekylene og forbedre de kaldtflytende egenskaper. Hydrokrakking og isomerisering gjennomføres ved rundt 350°C (Tao et al., 2017).

Hydrokrakking					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
97,0 %	1,0309	0,0309	0,0	(Vela-García et al., 2021)	Kjerneolje og Fettsyrer
98,9 %	1,0112	0,0112	0,0	(Béalu, 2017)	Rapsolje
97,9 %	1,0211	0,0211	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 15 Energikjede S-5/M-4 Hydrokrakking

Hydrokrakking og isomerisering følges så av destillering, her separeres de ulike produktene til sitt formål. I tillegg fjernes gass-produkter som propan og hydrogen fra drivstoffet (Tao et al., 2017).

Destillering (HEFA)					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
95,0 %	1,0526	0,0526	0,0	(Vela-García et al., 2021)	Kjerneolje og Fettsyrer
93,9 %	1,0650	0,0650	0,0	(Béalu, 2017)	Rapsolje
94,5 %	1,0588	0,0588	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 16 Energikjede S-5/M-4 Destillering (HEFA)

3.2.2.9 Energikjede S-6 og M-5

Fermentering av biomasse gjennomføres ved tilførsel av gjær eller bakterie til biomasse. Biomassen går deretter gjennom en rekke kjemiske reaksjoner som omdanner sukkerarter til alkohol eller syre. «Fermentering er en anaerob prosess som bryter ned glukose i organisk materiale» (European Biomass Industry Association, u.å.). Ved fremstilling av etanol gjennom fermentering kan forskjellige typer råmateriale benyttes, som konvensjonelle avlinger som mais eller sukkerrør, i tillegg til skogs- og industriavfall. Etter fermentering separeres etanol fra resterende biprodukter (Lee et al., 2007). I analysen til Manochio et al. (2017), krever prosessen lite energiinput da rester fra utvinningen av sukkerarter benyttes til biogass som brukes i fremstillingen av etanol (Manochio et al., 2017).

Fermentering og Destillering av etanol				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
73,7 %	1,3569	0,3569	0,0	(Cardona Alzate & Sánchez Toro, 2006)
89,0 %	1,1236	0,1236	0,0	(Manochio et al., 2017)
81,4 %	1,2402	0,2402	0,0	Gjennomsnitt

Tabell 17 Energikjede S-6/M-5 Fermentering og Destillering

Dehydrering er nødvendig for å fjerne oksygen fra etanol, noe som produserer etylen, som er en type olefin. Dehydrering er et viktig steg for å produsere nødvendige olefiner som kan omformes til flydrivstoff (Geleynse et al., 2018).

Dehydrering				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
97,0 %	1,0309	0,0309	0,0	(Vela-García et al., 2021)
88,2 %	1,1338	0,1338	0,0	(Geleynse et al., 2018)
92,6 %	1,0824	0,0824	0,0	Gjennomsnitt

Tabell 18 Energikjede S-6/M-5 Dehydrering

Etter dehydrering kommer oligomerisering. Denne prosessen benytter varmeenergi og elektrisitet til å omdanne olefinmolekylene til større hydrokarboner. Oligomerisering justerer molekylvekt og struktur i hydrokarbonene for å bedre etterligne egenskapene til flydrivstoff (Geleynse et al., 2018).

Oligomerisering				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
97,0 %	1,0309	0,0309	0,0	(Vela-García et al., 2021)
88,0 %	1,1364	0,1364	0,0	(Geleynse et al., 2018)
92,5 %	1,0836	0,0836	0,0	Gjennomsnitt

Tabell 19 Energikjede S-6/M-5 Oligomerisering

Det neste steget er hydrogenisering. Her konverteres hydrokarbonkjeder fra umettede til mettede kjeder, ved tilførsel av hydrogen. Hydrogeneringen forbedrer også stabiliteten i drivstoffet (Vela-García et al., 2021).

Hydrogenerering og Destillering av drivstoff				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
98,0 %	1,0204	0,0204	0,0	(Vela-García et al., 2021)
100,0 %	1,0000	0,0000	0,0	(Geleynse et al., 2018)
99,0 %	1,0102	0,0102	0,0	Gjennomsnitt

Tabell 20 Energikjede S-6/M-5 Hydrogenerering og Destillering

3.2.2.10 Energikjede S-7 og M-6

Karbonfangst er en prosess som innebærer inntak av luft, hvor CO₂ ekstraheres fra luften og lagres. I følge Rojas-Michaga et al. (2023) kreves det 0,073 kg CO₂ per MJ SAF produsert (Rojas-Michaga et al., 2023). Vanlig forbruk for karbonfangst ligger på ca. 5-6 MJ per kg CO₂, samtidig benytter van der Giesen et al., (2014) en teknologi som benytter vind i stedet for vifter til inntak av luft (van der Giesen et al., 2014). Denne teknologien reduserer energiforbruk drastisk til 1,1 MJ per kg CO₂.

Karbonfangst				
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde
84,0 %	1,190	0,190	0,0	(Rojas-Michaga et al., 2023)
65,5 %	1,527	0,527	0,0	(Ballal et al., 2023)
92,6 %	1,080	0,080	0,0	(van der Giesen et al., 2014)
67,5 %	1,482	0,482	0,0	(International Energy Agency, 2023)
77,4 %	1,320	0,320	0,0	Gjennomsnitt

Tabell 21 Energikjede S-7/M-6 Karbonfangst

Som ved energikjede S-4 og M-3 benyttes RWGS og Fischer-Tropsch for fremstilling av drivstoff. Forskjell i effektivitet på F-T og RWGS for ren CO₂ kontra biomasse har bakgrunn i sammensetningen i råmaterialet som benyttes. I denne energikjeden tas det utgangspunkt i at det kreves forholdet mellom H₂ og CO₂ er lik 0,045 kg hydrogen for 1 kg CO₂, noe som også er utgangspunktet i analysene til Ballal et al. (2023) og van der Giesen et al. (2014).

RWGS (CO ₂)					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
70,2 %	1,425	0,425	0,0	(Rojas-Michaga et al., 2023)	CO ₂ + H ₂
78,9 %	1,267	0,267	0,0	(Ballal et al., 2023)	CO ₂ + H ₂
79,3 %	1,261	0,261	0,0	(van der Giesen et al., 2014)	CO ₂ + H ₂
74,7 %	1,339	0,339	0,0	(Liu et al., 2020)	CO ₂ + H ₂
75,8 %	1,323	0,323	0,0	Gjennomsnitt	

Tabell 22 Energikjede S-7/M-6 Gassifisering

Fischer-Tropsch (CO ₂)					
Virkningsgrad	MJ _{INN} /MJ _{UT}	MJ _{EL}	MJ _{TAP}	Kilde	Råmateriale
70,2 %	1,4245	0,0	0,425	(Rojas-Michaga et al., 2023)	CO ₂
57,5 %	1,7391	0,0	0,739	(Zang et al., 2021)	CO ₂
46,5 %	2,1505	0,0	1,151	(Ballal et al., 2023)	CO ₂
74,7 %	1,3387	0,0	0,339	(van der Giesen et al., 2014)	CO ₂
73,0 %	1,3699	0,0	0,370	(Liu et al., 2020)	CO ₂
64,4 %	1,6045	0,0	0,605	Gjennomsnitt	

Tabell 23 Energikjede S-7/M-6 Fischer-Tropsch

3.3 Dataintegrasjon og kvalitet

Dataintegrasjon representerer en av de største utfordringene i denne oppgaven. Datainnsamlingen baserer seg primært på sekundærdata fra litteratur, grunnet manglende tilgang på primærdata og detaljert informasjon fra produsenter. Bruken av det brede spekteret av litteratur har introdusert utfordringer ved tolkning og sammenstilling av informasjon.

En stor utfordring har vært å navigere og tolke mangfoldet av tilgjengelig litteratur og sekundærdata som ofte er presentert for å analysere andre formålet enn forskningsspørsmålet i denne oppgaven. Mangelen på spesifikk data har begrenset omfanget av analysen og datainnsamlingen krevde stor ressursbruk. Hver kilde har blitt nøye evaluert for å sørge for pålitelighet og relevans. Samtidig har triangulering blitt benyttet for å styrke gyldigheten i oppgaven.

3.4 Oppsummering av Data & Teknologi

Dette kapitlet har gitt en detaljert gjennomgang av datagrunnlaget for oppgavens analyse. Energikjedene deles inn i kategoriene Well-to-Tank og Tank-to-Wing for kort- og mellomdistanse teknologiene, for å sikre en sammenlignbar og omfattende analyse. Gjennomgangen omfatter en rekke ulike teknologier som alle kan bidra til fremtidens bærekraftige luftfart. Innsamling av data fra sekundærkilder har vært en sentral utfordring grunnet mangelen på spesifikk data rettet direkte mot oppgavens forskningsspørsmål. Den ressurskrevende prosessen med dataintegrasjon har krevd nøye vurdering av kildenes pålitelighet og relevans. Det neste kapitlet vil presentere resultatene fra analysen i tillegg til å diskutere disse. Her vil jeg utforske hvordan ulike drivstoffteknologier kan bidra eller undergrave luftfartssektorens mål om utslippsreduksjon, i tillegg til å gi innsikt i fremtidige retninger for teknologiutvikling og politikk for luftfarten.

4 Resultater og diskusjon

Kapittelet for resultater og diskusjon gir en detaljert gjennomgang av oppgavens resultater. Resultatene presenteres i form av tabeller og figurerer som sammenligner energikjedene. Kapittelet er delt inn flere seksjoner som besvarer de ulike forskningsspørsmålene. Først presenteres en oppsummering av energikjedeanalysens resultater, før jeg vil gå mer i dybden for resultatene for energibruk og CO₂-utslipp for kort- og mellomdistanse flygninger. Videre følger sensitivitetsanalysene og scenarioanalysen som viser energikjedenes robusthet og hvordan endring i variabler kan påvirke resultatene. Siste del av kapittelet gir en grundig diskusjon og analyse av oppgavens resultater og betydningen for disse.

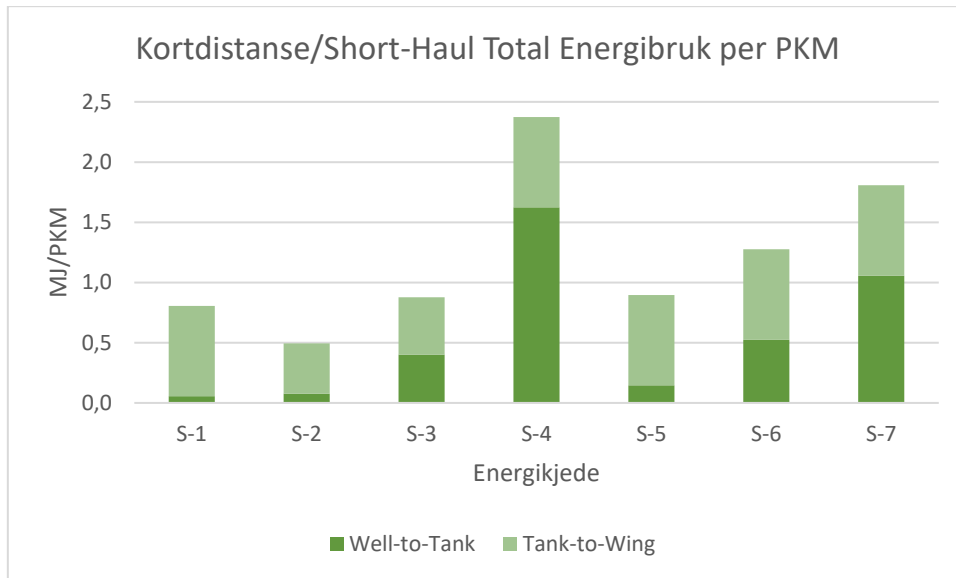
4.1 Presentasjon av Resultater

Tabell 24 viser en oppsummering av analysens resultater. Her inkluderes alle energikjedene, som man kan se er det overlapping for WTT-delen i energikjedene som deler produksjonsteknologi, mens det er overlapping for TTW-delen når samme flyteknologi benyttes, som ved likt TTW forbruk mellom SAF-teknologiene og konvensjonelt drivstoff.

Oppsummering Resultater								
Energi-kjede	MJ PKM			Total CO ₂ /PKM (g CO ₂ /PKM)			Teknologi	
	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW	ERETOTAL	Virkningsgrad %
S-1	0,055	0,751	0,806	4,675	69,843	74,518	1,074	93,1 %
S-2	0,063	0,416	0,479	0,330	2,196	2,526	1,150	86,9 %
S-3	0,375	0,475	0,850	4,765	0,000	4,765	1,790	55,9 %
S-4	1,623	0,751	2,374	3,844	0,000	3,844	3,162	31,6 %
S-5	0,145	0,751	0,896	1,723	0,000	1,723	1,194	83,8 %
S-6	0,524	0,751	1,275	3,861	0,000	3,861	1,698	58,9 %
S-7	1,277	0,751	2,028	12,047	0,000	12,047	2,700	37,0 %
M-1	0,067	0,911	0,978	5,671	84,723	90,394	1,074	93,1 %
M-2	0,740	0,937	1,677	9,399	0,000	9,399	1,790	55,9 %
M-3	1,969	0,911	2,880	4,663	0,000	4,663	3,162	31,6 %
M-4	0,176	0,911	1,087	2,090	0,000	2,090	1,194	83,8 %
M-5	0,667	0,911	1,578	6,498	0,000	6,498	1,733	57,7 %
M-6	1,549	0,911	2,460	14,614	0,000	14,614	2,700	37,0 %

Tabell 24 Oppsummering av resultater

4.1.1 Energibruk Kortdistanse



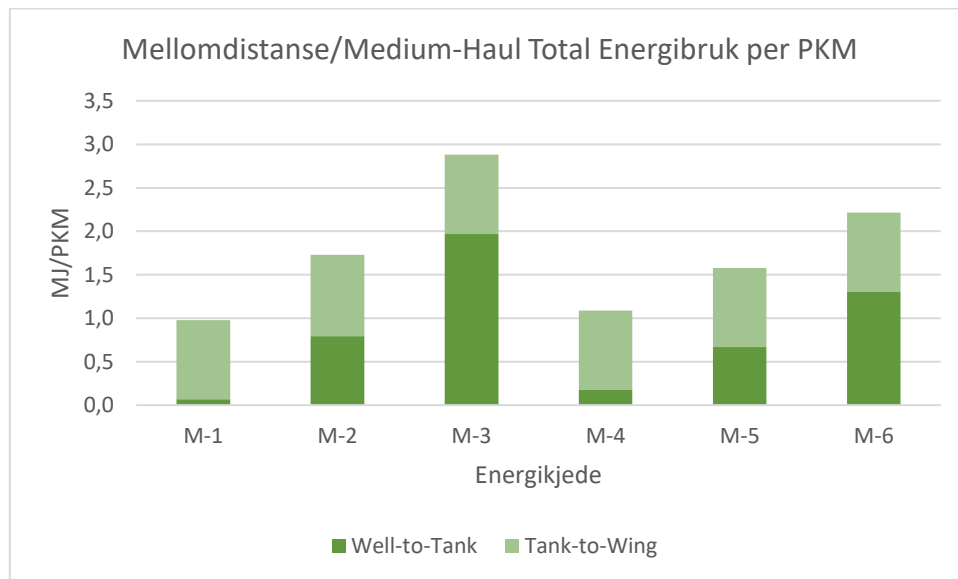
Figur 21 Totalt Energiforbruk MJ/PKM (Kortdistanse)

Figur 21 presenterer totalt energibruk for energikjedene tilhørende kortdistanse. Energibruken inkluderer forbruk under både Well-to-Tank og Tank-to-Wing og gir sammen totalsummen for MJ brukt per passasjerkilometer. Well-to-Tank er totalt energibruk for produksjon av drivstoffet helt frem til det skal brukes. Tank-to-Wing er energibruk under flygning.

Resultatene fra analysen viser at energikjeden S-4 og S-7 som begge benytter gassifisering i RWGS-reaktor og Fischer-Tropsch syntese er de energikjedene med høyest forbruk under for Well-to-Tank. Forskjellen mellom S-4 og S-7, ligger i råmaterialet som benyttes, selv om E-Fuel bruker energi på karbonfangst, har dette råmaterialet en høyere energieffektivitet under gassifisering og fremstilling av drivstoff, noe som gjør opp for energibruk under karbonfangst. Samtidig har S-1, S-2 og S-5 lav energibruk under produksjonen av drivstoff. S-2 som er den batterielektriske energikjeden har lavest energibruk for hele livsløpet, altså Well-to-Wing. Dette er også energikjeden med færrest delprosesser. HEFA (S-5) og Alkohol til Jet (S-6), har lignende energibruk under selve omgjøringen fra etanol/olje til drivstoff, men fermentering og produksjon av etanol representerer en stor del av energibruken for S-6. Energikjede S-3 som er elektrisk teknologi med hydrogen som energibærer i stedet for batteri, har nærmere dobbelt så høyt energiforbruk under produksjon enn batterielektrisk. Dette kan forklares med den energikrevende prosessen med produksjon og flytendegjøring av hydrogen. Samtidig har de et relativt lignende forbruk under TTW, selv om omgjøring av hydrogen til elektrisitet i brenselcelle vanligvis har en effektivitet på 40-60%, mens batteri normalt har en

omgjøringseffektivitet på 80-90% (Melancon, 2022). Dette kan muligens forklares med vektsparing ved hydrogen kontra batteri.

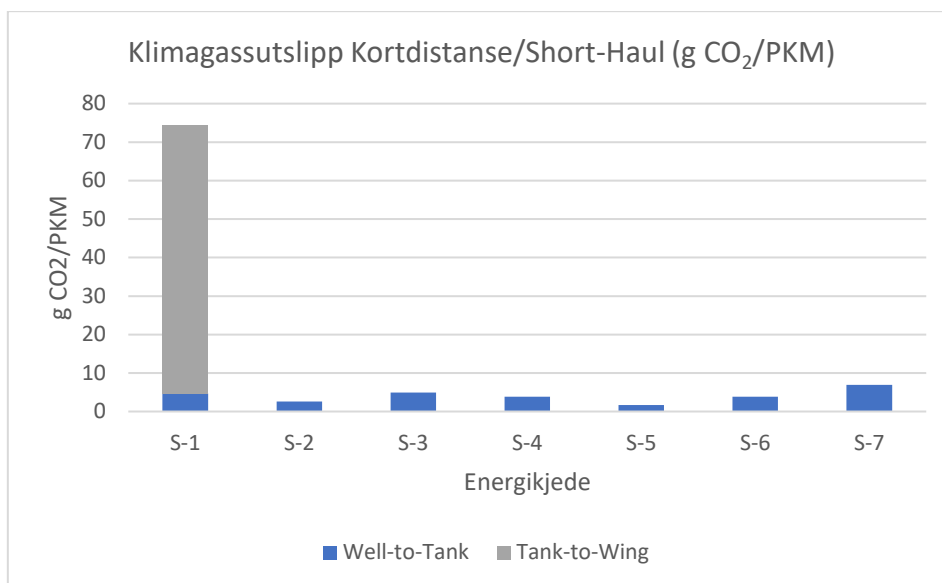
4.1.2 Energibruk Mellomdistanse



Figur 22 Totalt Energiforbruk MJ/PKM (Mellomdistanse)

For mellomdistanse er det mange overlappende elementer mot kortdistanse-kjedene. Hovedforskjellene ligger i at det benyttes jetmotor i stedet for turboprop for SAF, i tillegg til at hydrogen benyttes som forbrenningsdrivstoff direkte i motor, i stedet for å gå via en brenselcelle for elektrisk fremdrift. Grunnet bruk av jetmotor i stedet for propell, er forbruk av drivstoff noe høyere for de konvensjonelle flyteknologiene, altså i Tank-to-Well. Samtidig er Well-to-Tank effektiviteten den samme som for kortdistanse. For M-2, som er hydrogen-kjeden, er det også samme energieffektivitet under Well-to-Tank, mens forbruket ved forbrenning er nesten dobbelt så høyt per passasjerkilometer, som ved brenselcelle-alternativet.

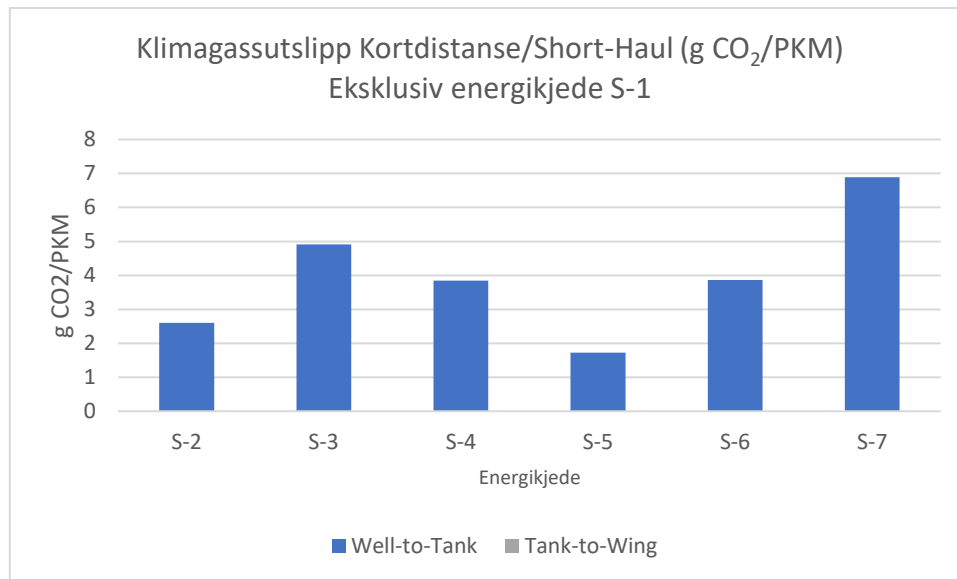
4.1.3 Klimagassutslipp Kortdistanse



Figur 23 Klimagassutslipp Kortdistanse/Short-Haul

Reduksjon av klimagassutslipp er en sentral del av forskningsspørsmålet i denne oppgaven, i figur 23 kan man se at alle de alternative energikjedene betydelig reduserer utslipp av CO₂, i forhold til det konvensjonelle drivstoffet. Som nevnt i innledningen til oppgaven kreves det en 70% reduksjon i klimagassutslipp fra konvensjonell flydrivstoff (93 g CO₂e/MJ), for å kunne klassifiseres som bærekraftig flydrivstoff (The European Commission & Directorate-General for Energy, 2023). Dette kravet oppfyller alle de alternative drivstoffene. Samtidig baserer denne analysen seg på bruk av norsk energimiks, som i stor grad er basert på grønn og fornybar energi med et lavt klimagassutslipp per MJ. Ved bruk av en mer fossilbasert energimiks vil utslippstallene kunne øke betydelig. Dette er noe jeg undersøker nærmere i scenarioanalysen.

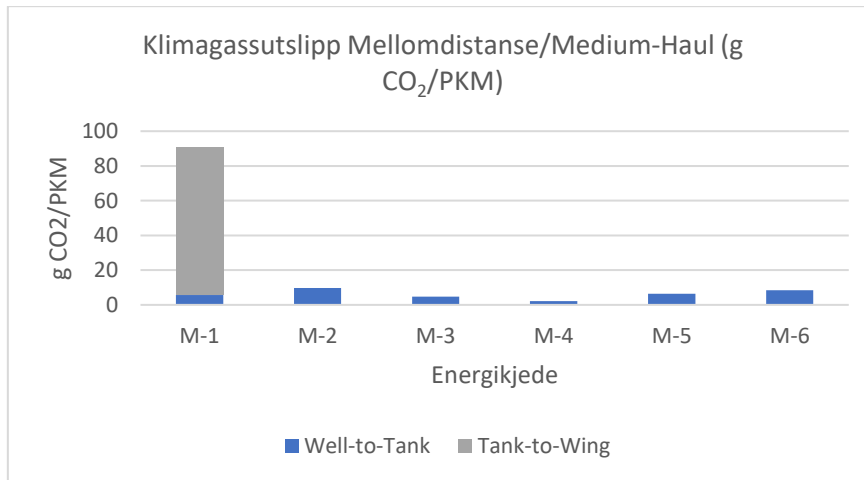
Den neste figuren viser de samme tallene, men ekskluderer energikjede S-1, for å få en bedre oversikt over forholdet i klimagassutslipp mellom de alternative energikjedene.



Figur 24 Klimagassutslipp Kortdistanse/Short-Haul, eksklusiv S-1

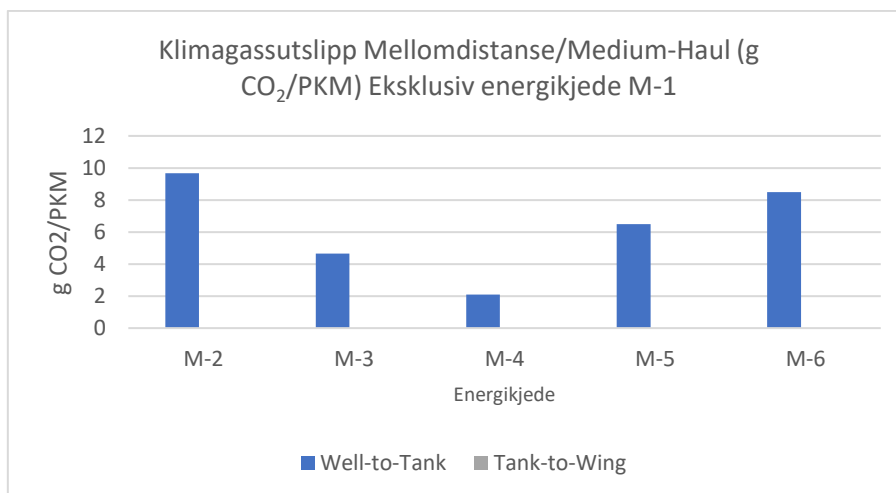
Figur 24 viser forholdet mellom klimagassutslipp blant de alternative drivstoffteknologiene for kortdistanseflygninger. Energikjedene har ingen CO₂-utslipp knyttet til drivstofforbruk, som følge av antagelsen om bruk av rester og avfall i produksjonen av biodrivstoffet. Ifølge EU-kommisjonens rapport vedrørende klimatiske påvirkninger for konvensjonelle og alternative drivstoffsystemer for kjøretøy, seksjon 3.4.1.1, skal CO₂-utslipp relatert til eksos regnes som null, ved bruk av biogent drivstoff eller e-fuel (European Commission et al., 2020). Man ser også at energikjede S-5 har det laveste klimagassavtrykket, bakgrunnen for dette er den lite energikrevende prosessen med å omgjøre olje og animalsk fett til drivstoff. S-7 har det høyeste utslippet av CO₂, dette kan begrunnes med at det brukes mye elektrisk energi i produksjonsprosessen. Grunnen til at energikjede S-4 har lavere utslipp av CO₂, i forhold til S-7, selv om det var den minst energieffektive kjeden, er at teknologien benytter egenprodusert biogass, med et lavt CO₂-avtrykk, under produksjonsprosessen.

4.1.4 Klimagassutslipp Mellomdistanse



Figur 25 Klimagassutslipp Mellomdistanse/Medium-Haul

Som i avsnittet om resultater for energibruk, har også avsnittet om resultater for klimagassutslipp store likheter for de parallelle energikjedene. Man ser at energikjede M-4 og M-3 har de laveste utslippene av CO₂, grunnet henholdsvis lavt energibruk, og bruk av egenprodusert bioenergi. Den store forskjellen ligger mellom hydrogenteknologiene. Her har M-2 (9,7 g CO₂/PKM) nærmere dobbelt så høyt utslipp av CO₂, som den lignende S-3 kjeden (4,9 g CO₂/PKM). Noe som forklares ved det økte energiforbruket for M-2. Et annet aspekt er at bruk av hydrogen i forbrenningsmotor vil føre til noe utslipp av svevepartikler og NO_x. Selv om disse er kraftig redusert i forhold til forbrenning av konvensjonelt drivstoff, betyr dette at M-2 ikke er fullstendig utslippsfritt under Tank-to-Wing fasen, selv om disse aspektene ikke er inkludert i denne analysen (Clean Aviation, u.å.).



Figur 26 Klimagassutslipp Mellomdistanse/Medium-Haul, eksklusiv S-1

4.2 Sensitivitet- og Scenarioanalyse

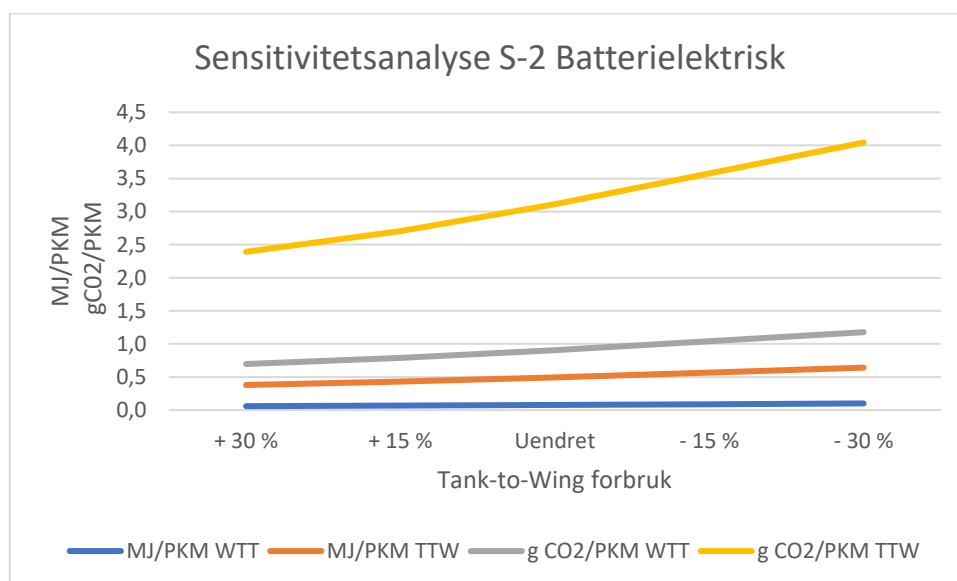
Dette delkapittelet presenterer oppgavens sensitivitets- og scenarioanalyse. Denne typen analyser er viktige verktøy for beslutningstaking da de viser teknologienes sårbarhet til endringer, og hvordan endringene kan påvirke resultatene. Både sensitivitetsanalyse og scenarioanalyse kan bidra til reduisering av risiko, da disse type analyser identifiserer eventuelle risikoer og muligheter for ulike situasjoner.

4.2.1.1 Sensitivitetsanalyse

Denne oppgavens sensitivitetsanalyse gjennomføres på 3 av oppgavens energikjeder. Disse er valgt da de representerer svært ulike teknologier, med ulike utfordringer og parameter. Hensikten med sensitivitetsanalysen er å identifisere hvordan produksjonsteknologiene påvirkes av redusert eller økt effektivitet i delprosesser.

4.2.1.2 S-2 Batterielektrisk

Sensitivitetsanalysen for S-2 viser forskjell i utslipp av CO₂ ved forskjellig forbruk under TTW fasen. Etersom dette er en teknologi under utvikling, med begrenset datagrunnlag har jeg valgt å gjennomføre sensitivitetsanalysen ved å justere forbruket under flygning.



Figur 27 Sensitivitetsanalyse S-2

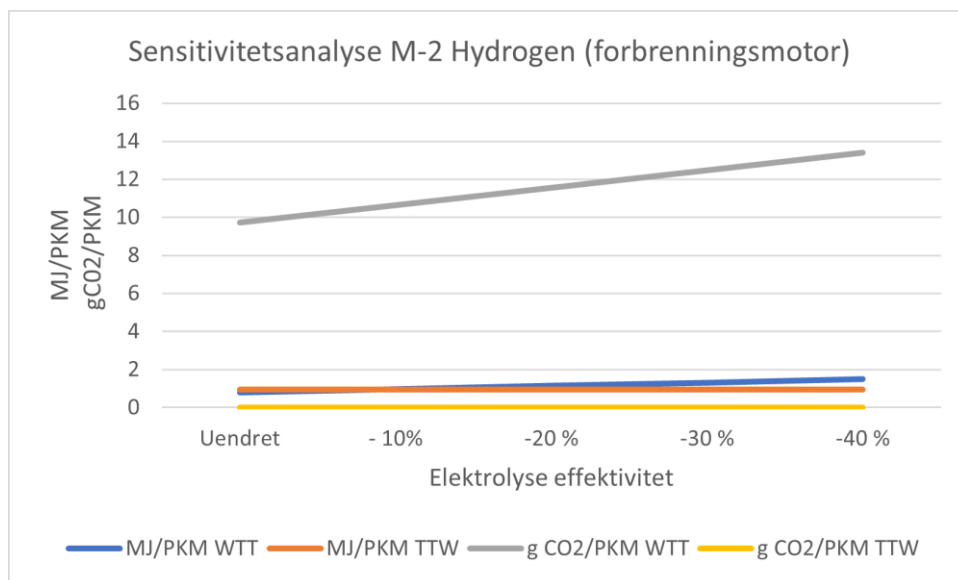
Figur 27 viser hvordan forbruket har en merkbar større effekt på TTW sammenlignet med WTT, når det gjelder MJ/PKM, noe som indikerer at energikjeden er sensitiv til endring i forbruk under flygning. Forbruk vil avhenge av mengde passasjerer og last, i tillegg til værforhold. Samtidig vil et batterielektrisk fly ha den samme vekten under hele flygningen i motsetning til et fly som benytter mer konvensjonelle energilagringssystemer som ved et drivstoff.

CO₂-utslipp per PKM under flygning viser en markant økning ved økt forbruk, noe man kan se på den gule linjen i grafen. Dette viser at endringer i forbruk under flyvning vil ha påvirkning på det totale CO₂-utslippet for teknologien. Dette understreker også viktigheten av optimalisering og effektivisering under flygning.

Ved å justere forbruket under flygning gir analysen innsikt i hvordan energieffektivitet og CO₂-utslipp potensielt kan forbedres gjennom teknologiske forbedringer og operasjonelle strategier. Det vil også være viktig med høy kabinfaktor¹² på flygningene, for å fordele utslipp og energibruk på reisende.

4.2.1.3 M-2 Hydrogen i forbrenningsmotor

Figur 28 viser sensitivitetsanalysen for M-2 (hydrogen i forbrenningsmotor), her er elektrolyse valgt som variabel. Dette grunnlegges ved at analysen baserer seg på SOEC-elektrolyse, noe som i likhet med batterielektrisk fly, er en ny teknologi som stadig er under utvikling.



Figur 28 Sensitivitetsanalyse M-2

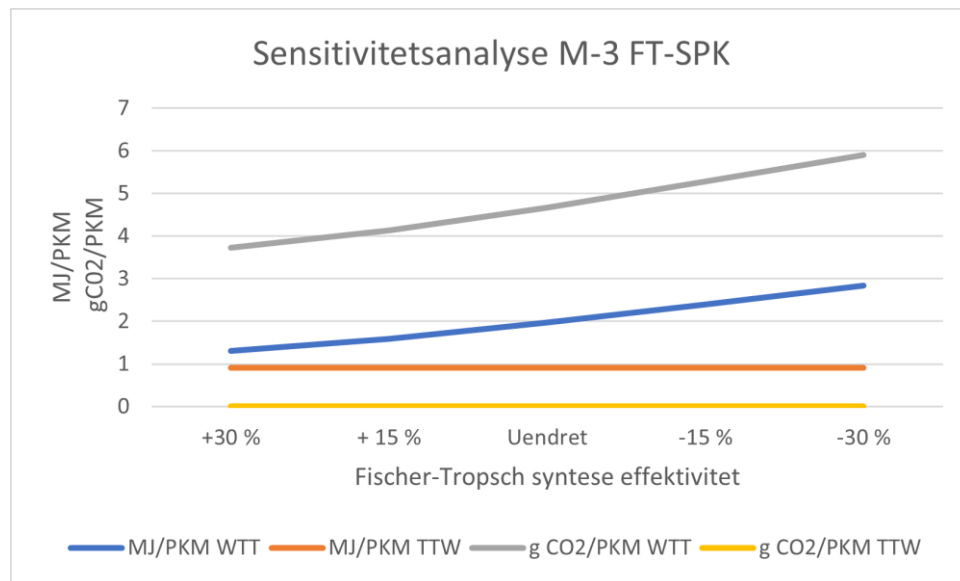
Som man kan se på figuren vil redusert effektivitet i elektrolyse ha størst påvirkning på CO₂-utslippet til energikjeden, samtidig vil også energieffektiviteten endre noe. Sensitivitetsanalysen understreker viktigheten av utviklingen til denne elektrolyse-teknologien. Samtidig viser den hvordan en redusert energieffektivitet vil påvirke energikjeden, med høyere energibruk og derav høyere CO₂-utslipp. Analysen baserer, som tidligere nevnt på en energimiks med høy andel fornybar energi, noe som også gir lave klimagassutslipp. Dersom analysen hadde basert seg på

¹² Andel av flyets seter som benyttes

en energimiks med høy andel fossil energi, ville utslagene i CO₂-utslipp vært betydelig høyere ved redusert energieffektivitet.

4.2.1.4 M-3 Gassifisering og Fischer-Tropsch

Den siste sensitivitetsanalysen er gjennomført på energikjede M-3, som produserer SAF basert på gassifisering av biomasse og Fischer-Tropsch syntese. I denne sensitivitetsanalysen er effektiviteten til Fischer-Tropsch syntesen endret, mellom +30% og -30% effektivitet.

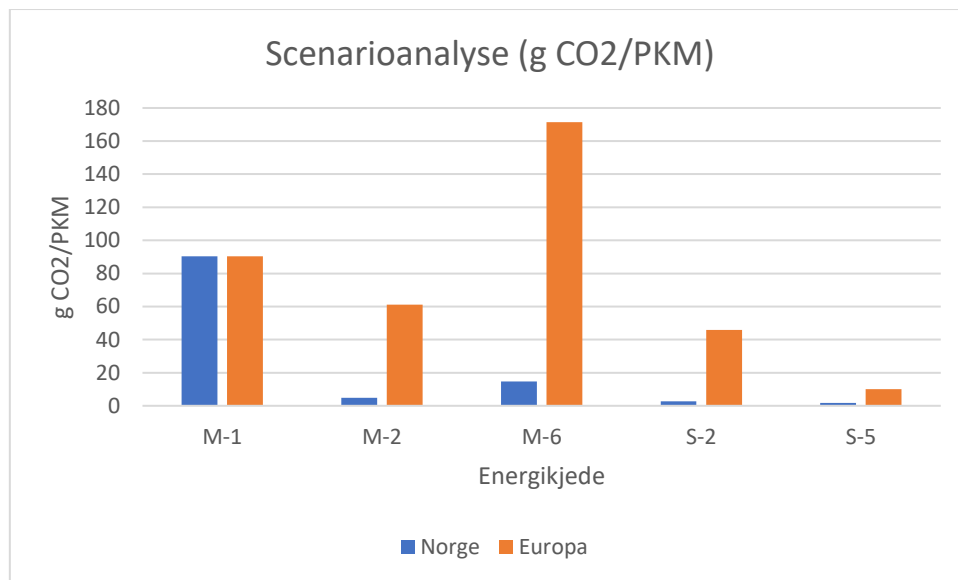


Figur 29 Sensitivitetsanalyse M-3

Figur 29 illustrerer hvordan energiforbruk og utslipp av CO₂ påvirkes i ulike deler av energikjeden. Sensitivitetsanalysen viser at mens energiforbruket og CO₂-utslippene forblir uendret i TTW-delen av analysen, fører endringer i effektivitet for Fischer-Tropsch syntesen til betydelige endringer i energibruk for WTT-delen. Videre påvirker energibruk mengden CO₂-utslipp. Sensitivitetsanalysen understreker viktigheten av fortsatt utvikling ikke bare av Fischer-Tropsch syntese, men også i andre delprosesser. Reduksjon i energibruk vil direkte og indirekte redusere klimagassutslipp ved lavere energibruk i produksjonen, noe som igjen vil medføre lavere avhengighet av fossile energikilder.

4.2.1.5 Scenarioanalyse

Scenarioanalysen i denne oppgaven undersøker forskjellen i CO₂-utslipp for 3 energikjeder, dersom man bytter norsk energi miks, med europeisk energimiks. Energikjedene scenarioanalysen er gjennomført på er M-1 (Konvensjonelt flydrivstoff), M-2 (Hydrogen i forbrenningsmotor), M-6 (E-Fuel), S-2 (Batterielektrisk) og S-5 (HEFA). Dette gir en bred scenarioanalyse som inkluderer flere forskjellige teknologier.



Figur 30 Scenarioanalyse

Resultatene vist i figur 30, viser betydelige forskjeller i CO₂-utslipp ved bruk av europeisk energimiks for energikjedene med unntak av M-1 og S-5. Dette kan forklares ved at M-1 som er den konvensjonelle produksjonsmetoden ikke benytter elektrisitet, men i stedet egenprodusert gass under produksjonen, noe som fører til samme mengde utslipp ved norsk og europeisk energimiks. For S-5 som er basert på HEFA-teknologien, er energieffektiviteten høy, og det brukes mindre mengder energi for å produsere drivstoffet.

M-2 og S-2 som er henholdsvis hydrogen og batterielektriske kjeder har en stor økning i CO₂-utslipp ved bruk av europeisk energimiks, i stedet for norsk. For hydrogen kjeden, ser man at utslippene ved bruk av europeisk miks reduseres i forhold til konvensjonelt drivstoff, men ikke i like stor grad som ved den fornybar-baserte norske miksen.

Videre viser M-6 som er basert på den elektrisitetskrevene teknologien E-Fuel, at tilgang på grønn energi er avgjørende for å redusere utslipp i forhold til konvensjonell teknologi. Ved bruk av europeisk miks vil E-Fuel nærmere doble utslipp fra 90,394 til 171 g CO₂/PKM. Overgangen

til en renere europeisk energimiks er derfor avgjørende for at E-Fuel og andre energikrevende alternative teknologier skal kunne bidra til en mer bærekraftig luftfart.

Dersom scenarioanalysen skulle vært utvidet, kunne det vært aktuelt å inkludere global energimiks, i tillegg til den europeiske og norske. Den globale energimiksen lå i 2021 på 79,5 g CO₂/MJ, noe som er en viss økning sammenlignet med den europeiske miksen, som i 2022 var på 69,7 (European Environment Agency, 2023; International Energy Agency, u.å.-b). En slik økning i CO₂-utslipp ville ha ytterligere forsterket resultatene i den eksisterende scenarioanalysen, som understreker viktigheten av grønn energi, for å oppnå størst positiv miljømessig effekt ved bruk av alternative og bærekraftige drivstoffteknologier.

4.3 Analyse og Diskusjon av Resultater

Delkapittelet «Analyse og Diskusjon av Resultater» er delt inn etter de ulike alternative teknologiene som er inkludert i oppgaven. Her vil jeg diskutere hvordan teknologiene svarer på oppgavens forskningsspørsmål. I denne oppgaven skulle jeg svare på følgende forskningsspørsmål:

- 1. Hvor mye energi brukes fra vugge til vinge for drivstoffteknologiene?*
- 2. Hva er CO₂-utslippet fra «vugge til grav» for drivstoffteknologiene?*
- 3. Hvilke fordeler og ulemper er aktuelle for de ulike drivstoffteknologiene?*

4.3.1 Oppsummering av resultater

Basert på oppgavens resultater, viser batterielektrisk seg å være den mest energieffektive energikjeden. Bakgrunnen for dette er færre og mindre omfattende delprosesser for energikjeden. Videre kommer det frem at elektrisk fremdrift med bruk av hydrogen har et betydelig høyere energiforbruk sammenlignet med batterielektrisk, som følge av energikrevende delprosesser som elektrolyse og flytendegjøring. Hydrogen i brenselcelle er derimot betydelig mer energieffektivt sammenlignet med hydrogen i forbrenningsmotor, selv om Well-to-Tank delen av energikjedene er identisk.

Alle SAF-teknologiene viser til reduserte CO₂-utslipp, sammenlignet med konvensjonelt drivstoff, både for kort- og mellomdistanse flygning. Samtidig avhenger energieffektivitet og utslipp av råmateriale og produksjonsprosess. Forskjell i effektivitet med bakgrunn i råmateriale

kan man se ved forskjellen mellom energikjede M-3/S-4 (FT-SPK) og M-6/S-7 (E-Fuel). Disse energikjedene er ganske like i produksjonsmetode, men har ulik energieffektivitet grunnet råmateriale. Samtidig som FT-SPK har den lavest energieffektiviteten, benytter disse energikjedene mye egenprodusert energi i produksjonen, hvor bare forbehandling krever større mengder elektrisitet.

4.3.2 E-Fuel

Forskning fra NORSUS, ved Raadal og Modahl (2021) peker på at CCU (karbonfangst og utnyttelse), som for eksempel E-Fuel, ikke er en bærekraftig egnet, da det vil være mindre energikrevende å benytte konvensjonelt drivstoff, for så å fange karbonet og lagre dette (CCS), sammenlignet med CCU. I tillegg vil man da oppnå netto null klimagassutslipp ved bruk av begge disse forslagene. Forskningen peker også på at bruk av store mengder grønn energi til energikrevende CCU teknologi, vil forsinke utfasing av fossilt brensel (Raadal & Modahl, 2021). Samtidig som dette er viktige hensyn, er E-Fuel blant de eneste SAF-teknologiene som ikke er i konkurranse om råmateriale. I denne oppgaven er det som tidligere nevnt antatt at det benyttes avfall og rester som biomateriale for teknologiene HEFA, FT-SPK og AtJ, noe som fører til at klimagassutslipp og produksjon av råmateriale ikke inkluderes i analysen av drivstoffets livsløp. Samtidig er rester og avfall en begrenset ressurs, som ikke kan forsyne de mengder biomateriale som trengs for å oppskalere produksjon av SAF nok til å fase ut fossilt drivstoff. Dersom man skal nå en 100% fossilfri luftfart innen 2050 forventes det at man må produsere nærmere 450 milliarder liter SAF, mens det i 2022 ble produsert 300 millioner liter (Statista, 2024) (International Air Transport Association, 2023c). Dette innebærer en økning på 150.000 %. Dette betyr at dersom SAF produksjon skal kunne møte disse produksjonsmengdene, vil man muligens se økt konkurranse mellom SAF og matproduksjon over landareal. Produksjon av E-Fuel er også i utviklingsfasen, og man kan forvente en forbedring i energieffektivitet. Norsk E-Fuel er et selskap som skal produsere E-Fuel i Mosjøen, selskapet skal benytte en ny teknologi som kalles co-elektrolyse. Her produseres syngas direkte i elektrolyseprosessen, noe som gjør at man eliminerer RWGS-reaksjonen i produksjonen. I følge Norsk E-Fuel har hele energikjeden en teoretisk virkningsgrad på 81 %, samt en realistisk virkningsgrad på 53-68 % (Norsk e-Fuel, 2024). Dette anlegget er fortsatt i planleggings- og utviklingsfasen og det er uvisst når produksjonen vil starte, samtidig vil denne virkningsgraden kunne redusere energibruk betydelig fra resultatene i denne analysen (E-Fuel i denne oppgaven, virkningsgrad $\eta = 37 \%$).

4.3.3 Hydroprosesserte estere og fettsyrer

Blant SAF-teknologiene er det HEFA-metoden som er den mest energieffektive i denne analysen, med en teknologisk virkningsgrad på 83,8 %. Dette er noe en noe høyere energieffektivitet en den Dahal et al. (2021) fant for HEFA basert SAF under sin litteraturstudie i 2021, der det ble funnet en virkningsgrad på 71-77 % for HEFA (Dahal et al., 2021). Samtidig HEFA har den høyeste energieffektiviteten av SAF teknologiene i denne analysen, er dette også den mest utviklede av SAF teknologiene. Watson et al. (2024) gir HEFA en TRL¹³ på 9 (høyest mulig rangering), som representerer kommersielt teknologi. Samtidig klassifiseres både FT-SPK og AtJ til TRL 6-8 som representerer at teknologien ligger et sted mellom prototype demonstrasjon og fullført og kvalifisert testflygning (Manning, 2023; Watson et al., 2024).

4.3.4 Alkohol-til-Jet

Alkohol-til-Jet-teknologien er den av SAF metodene med nest høyest energieffektivitet, med en total virkningsgrad lik 57,7 % i denne analysen. Dette er imidlertid et betydelig avvik fra Dahal, et al. (2021), som rapporterer en energieffektivitet på 91 % for Alkohol-til-Jet (Dahal et al., 2021). Forskjellen kan forklares i ulikt datagrunnlag mellom Dahal et al. og denne analysen. Geleynse et al. (2018), rapporterte en merkbare lavere virkningsgrad for Oligomerisering og Dehydrering, noe som medfører lavere gjennomsnittlig virkningsgrad i delprosessene i analysen (Geleynse et al., 2018). Selv om feiltolkning av kilden ikke kan utelukkes fullstendig er det gjort grundig kontroll for å minimere risikoen. Dette avviket i virkningsgrad peker også på viktigheten av et bredt datagrunnlag og triangulering, som kan bidra til å avdekke eventuelle feil. Selv om avviket mellom denne analysen og litteraturstudiet fra Dahal et al. (2021) er stort, viser forskning av Huang og Zhang (2011) en biomasse til drivstoff effektivitet på 49 % for maisbasert etanol, noe som i større grad korrelerer med og styrker resultatene i denne oppgavens analyse (Huang & Zhang, 2011).

4.3.5 Gassifisering og Fischer-Tropsch syntese

FT-SPK er den produksjonsmetoden som har lavest energieffektivitet og samlet virkningsgrad av energikjedene i analysen. Den samlede virkningsgraden på 31,6 % viser at dette er en energikrevende metode, hvor store deler av energien i biomassen går tapt. FT-SPK metoden kan ha store variasjoner i energieffektivitet, basert på råmaterialet benyttet i produksjonen, dette viser også tidligere forskning hvor Dahal et al. (2021) viser til en energieffektivitet på 40-53 %, mens Atsonios et al. (2015) viser til en energieffektivitet på 24,2 % (Atsonios et al., 2015; Dahal

¹³ Technology Readiness Level

et al., 2021). Selv om FT-SPK har en betydelig lavere virkningsgrad enn andre SAF-teknologier, er dette den mest anvendelige produksjonsmetoden for biobasert SAF og kan benytte et bredt spekter av fast biomateriale fra planter til avfall. Dette fører også til at bruk av FT-SPK kan utnytte ressurser som kunne gått til spille. I tillegg benytter FT-SPK teknologien egenprodusert energi i produksjonen, noe som gjør den uavhengig av energimiksens karbonavtrykk, i motsetning til mer elektrisitetskrevede teknologier som E-Fuel.

4.3.6 Batterielektrisk

Resultatene fra analysen peker på batterielektrisk som den minst energikrevende teknologien. Samtidig er batterielektrisk helt avhengig av ren energi for å kunne optimalisere utslippskutt. I tillegg er batterielektrisk en teknologi med åpenbare begrensninger hva gjelder rekkevidde. Med dagens batteriteknologi som gir en energitetthet på 250 Wh/kg vil batterielektriske fly ha en maksimal operasjonsrekkevidde på 140 km med 9 passasjerer om bord (Mukhopadhaya & Graver, 2022). Utvikling i batteriteknologi avhenger også i stor grad av etterspørsel. Den største etterspørselen finner man i elbilmarkedet, og det luftfarten er avhengig av god teknologiutvikling innen elbilbransjen for at batterielektriske fly skal kunne være aktuelt for lengre flygninger. Reimers (2018), forklarer at det neste generasjonen batterier forventes å være såkalte «litium-solid-state» batterier, som har en potensiell energitetthet på opp til 600 Wh/kg (Reimers, 2018). Reimers forklarer at denne typen batteri kan være tilgjengelig om kort tid.

4.3.1 Hydrogen

For å løse problemstillingen med batterielektrisk-teknologis lave rekkevidde, kan hydrogen benyttes som energibærer. Som resultatene fra analysen viser vil bruk av hydrogen som energibærer øke energibruken per passasjerkilometer, noe som igjen medfører et høyere utslipp av CO₂. Samtidig vil bruk av hydrogen gjøre elektrisk luftfart tilgjengelig på et langt større marked, grunnet dens økte rekkevidde. Energieffektivitet og utslippsfaktor avhenger også i stor grad på produksjonsmetoden av hydrogen. I dag står reformering av naturgass for mesteparten av den globale hydrogenproduksjonen (Ruud, 2023). Hydrogen produsert ved reformering av naturgass har et langt høye utslipp av CO₂, enn hydrogen produsert ved elektrolyse, også kalt grønt hydrogen. Dersom utslippsreduksjon skal optimaliseres er det derfor viktig at hydrogenet som produseres har lavest mulig klimagassutslipp. Elektrolyse er ikke den eneste metoden for å oppnå et bærekraftig hydrogen. Et annet alternativ er blått hydrogen som produserer hydrogen på samme måte som ved reformering av naturgass, men i stedet for å slippe ut karbon under produksjonen, benyttes karbonfangst og lagring for å gjøre hydrogen utslippsfritt.

Bruk av hydrogen er bredt anerkjent som en viktig teknologi som kan bidra til å gjøre energiovergangen fra fossilbasert luftfart til en grønnere og mer bærekraftig luftfart (DNV, 2024). Alternativene elektrisk fremdrift ved bruk av hydrogen i brenselcelle og hydrogen som drivstoff i forbrenningsmotor kan benytte samme produksjonsmetode under Well-to-Tank, har bruk av brenselcelle et nærmere halvert forbruk under selve flygning, sammenlignet med forbrenningsmotor. Et annet miljømessig aspekt ved valg av hydrogentyper er kondensstriper som kan påvirke global oppvarming. «Kondensstripers effekt på klimaet er fortsatt noe usikkert, men studier har estimert effekten av kondensstriper har en varmende effekt på planeten» (International Air Transport Association, 2024). Zeroavia som er en utvikler av hydrogenbaserte løsninger for luftfart, viser til at selv om hydrogen forbrenning vil skape større kondensstriper. Dette begrunnes med større mengde H₂O i utslippet. Samtidig peker Zeroavia på at ved utslipp av konvensjonelt drivstoff vil vannet kondensere på partiklene de slippes ut sammen med. Siden hydrogen kun har utslipp av H₂O, vil derfor kondenseffekten være mindre, ettersom det er mindre partikler å kondensere på (ZeroAvia, 2024a). Etter å ha gjennomført en kort litteraturstudie vedrørende oppvarmingseffekten av kondensstriper ved forbrenning og bruk av hydrogen, kommer det tydelig frem at dette er et felt som kommer til å få økt forskningsfokus i tiden som kommer.

5 Konklusjon

I denne oppgaven har jeg gjennomført en grundig analyse av energieffektivitet og CO₂-utslipp for forskjellige drivstoffteknologier i luftfarten. Funnene fra oppgaven gir verdifull innsikt i hvordan de ulike teknologiene kan bidra til en mer bærekraftig luftart. Funnene i oppgaven kan bidra til kunnskapsgrunnlaget for beslutningstakere og vise hvilke av løsningene som bør satses på.

Oppgaven konkluderer med at batterielektrisk fremdrift er den teknologien med lavest energibruk og lavest klimagassutslipp. Samtidig er teknologien avhengig av fornybar energi for å optimalisere utslippskutt. Videre anbefales bruk av HEFA teknologien for å produsere lite energikrevende bærekraftig flydrivstoff som kan benyttes i dagens flymaskiner for både kort-, mellom- og langdistanse.

På grunn av luftfartens store omfang er det sannsynlig at alle de inkluderte teknologiene spille en viktig rolle for å omstille luftfarten fra å være fossilbasert til å bli bærekraftig, uavhengig av resultatet i analysen. De ulike teknologiene vil kunne være mer optimalt for noen deler av verden enn andre. Eksempler på dette er hvordan Norge er område hvor E-Fuel vil kunne ha en større bærekraftig effekt, en andre steder grunnet andel grønn energi i energimiksen. I tillegg er Norge også godt egnet for elektrisk luftfart, i større grad enn andre områder grunnet landets topografi. I andre deler av verden hvor energimiksen i større grad er fossilbasert vil andre SAF-teknologier som HEFA eller FT-SPK være mer egnet, grunnet den lave elektrisitetsbruken.

Sensitivitetsanalysen viser hvordan de ulike energikjedene påvirkes av endringer i ulike parametere. Dette viser hvordan energieffektiviteten og bærekraftigheten påvirkes av forbruk under flygning og effektivitet i delprosesser. Scenarioanalysen viser hvordan endring i energimiksens karbonavtrykk drastisk påvirker resultatene for energikjedene. Noe som viser at visse energikjeder er mer egnet enn andre for ulike områder og verdensdeler.

Denne oppgaven inkluderer deler av et svært bredt forskningsfelt, derfor bør videre arbeid fokusere på følgende spørsmål og tema:

- Hvordan vil økt produksjonsvolum av energikrevende drivstoffvarianter påvirke utfasing av fossil energi?
- Hvordan vil økt produksjon av SAF-påvirke areal?
- Forskning på kostnadsutvikling og økonomiske aspekter ved alternative teknologier for luftfart.

- Hvordan påvirker ulike produksjonsmetoder for SAF råvaretilgjengelighet og bærekraft i andre sektorer som landbruk og skogbruk?
- Hva er de sosiale og etiske konsekvensene av implementering av nye drivstoffteknologier for ulike deler av verden?
- Hvordan kan man øke energitettheten i batterier for elektriske fly, uten å komprimere sikkerheten?

6 Referanseliste

- Airbus. (2024). *ZEROe*. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>
- Atsonios, K., Kougioumtzis, M.-A., D. Panopoulos, K., & Kakaras, E. (2015). Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy*, 138, 346-366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.056>
- Avinor. (2023). *Års- og bærekraftsrapport 2022*. <https://avinor.no/contentassets/b5d94158f9de40709e917343fde524aa/avinors-ars-og-barekrafrapport-2022.pdf>
- Baharozu, E., Soykan, G., & Ozerdem, M. B. (2017). Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors. *Energy*, 140, 1368-1377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.007>
- Ballal, V., Cavalett, O., Cherubini, F., & Watanabe, M. D. B. (2023). Climate change impacts of e-fuels for aviation in Europe under present-day conditions and future policy scenarios. *Fuel*, 338, 11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122041400?via%3Dihub>
- Balli, O., Sohret, Y., & Karakoc, H. T. (2018). The effects of hydrogen fuel usage on the exergetic performance of a turbojet engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10848-10858. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.178>
- Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 31-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>
- Béalu, Z. (2017). *Process Simulation and Optimization of Alternative Liquid Fuels Production* (Publication Number 04/17) [Techno-Economic Assesment, University of Kaiserslautern]. Kaiserslautern. <https://core.ac.uk/download/pdf/145232698.pdf>
- Benedictine University Library. (u.å., 23. januar 2024). *Primary & Secondary Data Definitions*. Benedictine University Library. <https://researchguides.ben.edu/c.php?g=282050&p=4036581>
- Bergero, C., Gosnell, G., Gielen, D., Kang, S., Bazilian, M., & Davis, S. J. (2023). Pathways to net-zero emissions from aviation. *Nature Sustainability*, 6(4), 404-414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>
- Berstad, D., Skaugen, G., & Wilhelmsen, Ø. (2019). Concepts for efficient hydrogen liquefaction. https://www.sintef.no/globalassets/project/hyper/presentations-day-2/day2_0915_wilhelmsen_sintef.pdf
- Blok, K., & Nieuwlaar, E. (2021). *Introduction to energy analysis* (3 ed.). Routledge.
- Botley, G. (2019, 10. desember 2019). *How do we calculate the amount of fuel required*. Pilot George. Retrieved 10. mai from <https://www.pilotgeorge.co.uk/blog/post/how-do-we-calculate-the-amount-of-fuel-required/>
- British Standards Institution. (2011). Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. In London: British Standards Institution.
- Brunborg, S. R. (u.å.). *Tap i nettet*. Energipolitisk.no. Retrieved 05. mai from <https://energipolitisk.no/temasider/tap-i-nettet/>

- Cavicchia, R., Tybjerg, J. K., Salonen, H., Brynteson, M., Wendt-Lucas, N., Gisladdottir, S., & Johannesson, H. (2024). Future Perspectives for Electric Aviation in the Nordic Region. 111.
- Cherubini, F., Strømman, A. H., & Ulgiati, S. (2011). Influence of allocation methods on the environmental performance of biorefinery products—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 1070-1077.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.001>
- Clean Aviation. (u.å.). *H2 powered aircraft*. Horizon 2020
- European Union Funding for Research & Innovation. Retrieved 03. april from <https://www.clean-aviation.eu/h2-powered-aircraft>
- Collin, R., Miao, Y., Yokochi, A., Enjeti, P., & von Jouanne, A. (2019). Advanced Electric Vehicle Fast-Charging Technologies. *Energies*, 12(10), 1839.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/1839>
- Concawe. (2012). *EU refinery energy systems and efficiency*. https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/rpt_12-03-2012-01520-01-e.pdf
- Council of the EU. (2023, 9. oktober 2023). *RefuelEU aviation initiative*
- Dahal, K., Brynold, S., Xisto, C., Hansson, J., Grahn, M., Grönstedt, T., & Lehtveer, M. (2021). Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15.
- Degirmenci, H., Uludag, A., Ekici, S., & Karakoc, T. H. (2023, 30. september 2023). Overview of Hydrogen-Powered Air Transportation. Research Developments in Sustainable Aviation, Cham.
- Demaco. (u.å.). *The energy density of hydrogen: a unique property*. Demaco. Retrieved 14. april from <https://demaco-cryogenics.com/blog/energy-density-of-hydrogen/>
- Diederichs, G. W., Ali Mandegari, M., Farzad, S., & Görgens, J. F. (2016). Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. *Bioresource Technology*, 216, 331-339.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090>
- DNV. (2021). *Teknologiveikart for bærekraftige drivstoff til luftfart (2021-0366)*. (Bærekraftig og Samfunnsnyttig Luftfart, Issue. <https://avinor.no/globalassets/konsern/om-oss/rapporter/rapport-teknologiveikart-biodrivstoff-luftfart---september-2021-final-report.pdf>
- DNV. (2024). *Hydrogen Supply to Norwegian Airport (2024-1270)*. Avinor.
https://avinor.no/globalassets/konsern/miljo-lokal/miljorapporter/hydrogen-supply-to-norwegian-airports_240108_update.pdf
- Elgowainy, A., Han, J., Cai, H., Wang, M., Forman, G. S., & DiVita, V. B. (2014). Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emission Intensity of Petroleum Products at U.S. Refineries. *Environmental Science & Technology*, 48(13), 7612-7624.
<https://doi.org/10.1021/es5010347>
- Equinor. (u.å.). *Derfor er elektrifisering av sokkelen et viktig klimatiltak*. Retrieved 10. mai from <https://www.equinor.com/no/energi/elektrifisering-av-plattformer>
- European Biomass Industry Association. (u.å.). *Fermentation*. European Biomass Industry Association. Retrieved 19. april from <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/fermentation/>
- European Commission, Directorate-General for Climate Action, Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J., Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C., Bauen, A., & Ziem-Milojevic, S. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA – Final report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2834/91418>

- European Environment Agency. (2023). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation*. Retrieved 10. mai from https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-14#tab-chart_7
- European Technology and Innovation Platform. (2021). Fischer-Tropsch synthesis. *Bioenergy*. https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_FT_R1.pdf
- European Union Aviation Safety Agency. (2022). *European Aviation Environmental Report 2022*. <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/european-aviation-environmental-report-2022>
- Fuel Cell Energy. (u.å.). *Solid Oxide Electrolysis*. Fuel Cell Energy. Retrieved 19. april from <https://www.fuelcellenergy.com/platform/solid-oxide-electrolysis>
- Gathorne-Hardy, A. (2015). A Newcomer's Guide to Life Cycle Assessment- Baselines and Boundaries. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08989e5274a31e0000126/60955_A_Newcomers_Guide_to_LCA.pdf
- Geleynse, S., Brandt, K., Garcia-Perez, M., Wolcott, M., & Zhang, X. (2018). The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation. *ChemSusChem*, 11(21), 3728-3741. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>
- Guo, Z., Zhang, J., Zhang, R., & Zhang, X. (2021). Aviation-to-Grid Flexibility Through Electric Aircraft Charging. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(11), 8149-8159. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3128252>
- Halvorsen, K., Amlie, J., & Kalhagen, K. O. (2012). *Bærkraftig biodrivstoff til sivil luftfart i Norge: Delutredning 3*. https://avinor.no/globalassets/_konsern/miljo-lokal/miljo-og-samfunn/delrapport-3-lokasjon-og-logistikk.pdf
- Han, J., Tao, L., & Wang, M. (2017). Well-to-wake analysis of ethanol-to-jet and sugar-to-jet pathways. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0698-z>
- Holden, E. (2003). *Energi og miljødata for alternative og konvensjonelle drivstoffer - år 2010* (2/2003). <https://www.vestforsk.no/nn/publication/energi-og-miljodata-alternative-og-konvensjonelle-drivstoffer-ar-2010>
- Huang, W.-D., & Zhang, Y. H. P. (2011). Energy Efficiency Analysis: Biomass-to-Wheel Efficiency Related with Biofuels Production, Fuel Distribution, and Powertrain Systems. *PLOS ONE*, 6(7), e22113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022113>
- IEA ETSAP. (2014). *Hydrogen Production & Distribution* (Energy Technology System Analysis Programme, Issue).
- International Air Transport Association. (2021). *Passenger and Airport Data Interchange Standards EDIFACT Implementation Guide – PNRGOV* https://www.iata.org/contentassets/18a5fdb2dc144d619a8c10dc1472ae80/pnrgov-edifact-implementation-guide_21_1.pdf
- International Air Transport Association. (2023a). Global Air Passenger Journeys, Billion. In. Global Outlook for Air Transport.
- International Air Transport Association. (2023b). *Global Outlook for Air Transport*.
- International Air Transport Association. (2023c, 06. juni 2023). *SAF Production Set for Growth but Needs Policy Support to Diversify Sources*. International Air Transport Association. Retrieved 12. mai from <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-06-01/>
- International Air Transport Association. (2024). Aviation contrails and their climate effect. <https://www.iata.org/contentassets/726b8a2559ad48fe9dec6f2534549a6/aviation-contrails-climate-impact-report.pdf>

- International Air Transport Association. (u.å.). Fact Sheet 2 - Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification.
- International Civil Aviation Organization. (2019). *ICAO Environmental Report 2019*. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg124-130.pdf
- International Civil Aviation Organization. (2022). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels* (ICAO document, Issue. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf)
- International Civil Aviation Organization. (2023). CORSIA Fact sheet. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia/>
- International Civil Aviation Organization. (u.å.). *The World of Air Transport in 2019*. ICAO. <https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022). *CORSIA Eligible Fuels - Life Cycle Assessment Methodology* (CORSIA Supporting Document, Issue.
- International Energy Agency. (2023, 25. april 2024). *Direct Air Capture*. Retrieved 01. mai from <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>
- International Energy Agency. (u.å.-a). *Aviation*. <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>
- International Energy Agency. (u.å.-b). *Total CO2 emissions*. International Energy Agency. Retrieved 12. mai from <https://prod.iea.org/world/emissions>
- International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines*. In. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jing, L., El-Houjeiri, H. M., Monfort, J.-C., Littlefield, J., Al-Qahtani, A., Dixit, Y., Speth, R. L., Brandt, A. R., Masnadi, M. S., MacLean, H. L., Peltier, W., Gordon, D., & Bergerson, J. A. (2022). Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization. *Nature Communications*, 13(1), 7853. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1>
- Johnston, M. (2014). Secondary Data Analysis: A Method of Which the Time has Come. *Qualitative and Quantitative Methods in Libraries*, 3, 619-626. <https://qqml-journal.net/index.php/qqml/article/view/169>
- Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for life cycle assessment – Detailed guidance*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2788/38479>
- Kimberlin, C. L., & Winterstein, A. G. (2008). Validity and reliability of measurement instruments used in research. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 65(23), 2276-2284. <https://doi.org/10.2146/ajhp070364>
- Kurzawska-Pietrowicz, P. (2023). Life Cycle emission of selected Sustainable Aviation Fuels – A review. *Transportation Research Procedia*, 75, 77-85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652301253X>
- Lee, S., Speight, J. G., & Loyalka, S. K. (2007). *Handbook of Alternative Fuel Technologies* (1. ed.). CRC Press.
- Lee, S., Speight, J. G., & Loyalka, S. K. (2014). *Handbook of Alternative Fuel Technologies, Second Edition* (2. ed.). Taylor & Francis. <https://books.google.no/books?id=1dXhAwAAQBAJ>

- Lee, U., Cai, H., Ou, L., Benavides, P. T., Wang, Y., & Wang, M. (2022). LCA of gasification and F-T conversion of MSW for transportation fuel production.
- Lee, U., Cai, H., Ou, L., Benavides, P. T., Wang, Y., & Wang, M. (2023). Life cycle analysis of gasification and Fischer-Tropsch conversion of municipal solid waste for transportation fuel production. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135114>
- Liu, C. M., Sandhu, N. K., McCoy, S. T., & Bergerson, J. A. (2020). A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer–Tropsch fuel production [10.1039/C9SE00479C]. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(6), 3129-3142. <https://doi.org/10.1039/C9SE00479C>
- Manning, C. G. (2023, 27. september 2023). *Technology Readiness Levels*. The National Aeronautics and Space Administration. Retrieved 13. mai from <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
- Manochio, C., Andrade, B. R., Rodriguez, R. P., & Moraes, B. S. (2017). Ethanol from biomass: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 743-755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.063>
- Melancon, S. (2022, 22. desember 2022). *Fuel Cells vs. Batteries: What's the difference*. Powermag. Retrieved 07. mai from <https://www.powermag.com/fuel-cells-vs-batteries-whats-the-difference/>
- Meld.St.10 (2022-2023). *Bærekraftig og sikker luftfart*. Retrieved from <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-10-20222023/id2960568/?ch=1>
- Menon Economics. (2022). *Grønn luftfart i Norge: Løsninger, muligheter og offentlige virkemidler*. <https://www.menon.no/gronn-luftfart-i-norge-losninger-muligheter-og-offentlige-virkemidler/>
- Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. (2022). *Validation of a high-performance hydrooogen liquefier*. (HORIZON-JTI-CLEANH2-2022-1). Frankrike: Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Retrieved from <https://www.horizon-europe.gouv.fr/validation-high-performance-hydrogen-liquefier-29660>
- Mitici, M., Pereira, M., & Oliviero, F. (2022). Electric flight scheduling with battery-charging and battery-swapping opportunities. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 11, 100074. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100074>
- Mukhopadhaya, J. (2023). *Performance analysis of fuel cell retrofit aircraft*. T. I. C. o. C. Transportation. <https://theicct.org/publication/fuel-cell-retrofit-aug23/>
- Mukhopadhaya, J., & Graver, B. (2022). *Performance analysis of regional electric aircraft*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/global-aviation-performance-analysis-regional-electric-aircraft-jul22-1.pdf-1.pdf>
- Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2017). Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels. *Fuel Processing Technology*, 171, 54-69.
- Ni, M., Leung, M. K. H., & Leung, D. Y. C. (2008). Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(9), 2337-2354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.048>
- Nickel, L. (2024, 25. april 2024). *How to interpret your LCA results*. Ecochain. Retrieved 01. mai 2024 from <https://ecochain.com/blog/how-to-interpret-your-lca-results/>
- Norges Vassdrags- og Energidirektorat. (2023, 13. september 2023). *Energibruk i petroleumssektoren*. NVE. Retrieved 09. mai from <https://www.nve.no/energi/energisystem/energibruk/energibruk-i-petroleumssektoren/>

- Norges Vassdrags- og Energidirektorat. (2024, 20. mars 2024). *Hvor kommer strømmen fra?* Retrieved 10. mai from <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-stroemmen-fra/>
- Norgesnett. (u.å.). *Nettap - Hva er nettap?* Norgesnett. Retrieved 14. mai from <https://norgesnett.no/kunde/hva-er-nettap/>
- Norsk e-Fuel. (2024). Norsk E-Fuel. In N. E.-F. AS (Ed.), (pp. 5).
- Norsk E-Fuel. (u.å.). *Driving the transition to renewable aviation today*. Norsk E-Fuel. Retrieved 27. mars 2024 from <https://www.norsk-e-fuel.com/>
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2022). Defining Functional Units for LCA and TEA. In U.S. Department of Energy (Ed.), (pp. 12).
- Pamula, A. S. P., Lampert, D. J., & Atiyeh, H. K. (2021). Well-to-wake analysis of switchgrass to jet fuel via a novel co-fermentation of sugars and CO₂. *Science of The Total Environment*, 782, 146770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146770>
- Pettinato, B., Kurz, R., Moroz, L., Mohamed, Z., Freund, S., Winkelmann, B., & Karakas, E. (2022). Chapter 3 - Machinery basics. In K. Brun & T. Allison (Eds.), *Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy* (pp. 31-94). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90394-3.00008-4>
- Pressley, P. N., Aziz, T. N., DeCarolis, J. F., Barlaz, M. A., He, F., Li, F., & Damgaard, A. (2014). Municipal solid waste conversion to transportation fuels: a life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 70, 145-153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.041>
- Quist, Z. (2024a, 25. april 2024). *Life Cycle Assessment (LCA) - Everything you need to know*. Ecochain. Retrieved 28. april 2024 from <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>
- Quist, Z. (2024b, 25. april 2024). *Primary vs. secondary data – What's the best in LCA?* Ecochain. <https://ecochain.com/blog/primary-vs-secondary-data-in-lca/>
- Regjeringen. (2022). *Høy gassproduksjon og store ringvirkninger fra norsk sokkel*. Energidepartementet Retrieved from <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/hoy-gassproduksjon-og-store-ringvirkninger-fra-norsk-sokkel/id2930619/>
- Reimers, J. O. (2018). *Introduction of Electric Aviation in Norway*. Avinor, N. A. Federation, & N. Luftfart. <https://avinor.no/contentassets/c29b7a7ec1164e5d8f7500f8fef810cc/introduction-of-electric-aircraft-in-norway.pdf>
- Reimers, J. O. (2020). *Electric Aviation in Norway*. S. Norge. <https://www.elflyportalen.no/rapporter/electric-aviation-in-norway-2020/>
- Ren, L., Zhou, S., & Ou, X. (2020). Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China. *Energy*, 209, 118482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118482>
- Rojas-Michaga, M. F., Michailos, S., Cardozo, E., Akram, M., Hughes, K. J., Ingham, D., & Pourkashanian, M. (2023). Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. *Energy Conversion and Management*, 292, 117427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117427>
- Ruud, M. (2023). *Fem spørsmål og svar om hydrogen*. Teknisk Ukeblad. Retrieved 13. mai from <https://www.tu.no/artikler/fem-sporsmal-og-svar-om-hydrogen/524736>
- Raadal, H. L., & Modahl, I. S. (2021). *Life Cycle Assessment of CCS (carbon capture and storage) and CCU (carbon capture and utilization)*. <https://norsus.no/publikasjon/life-cycle-assessment-of-ccs-carbon-capture-and-storage-and-ccu-carbon-capture-and-utilization/>

- Statista. (2024, 28. mars 2024). *Expected SAF required to reach Net Zero in the aviation industry by 2050*. Statista Research Department. Retrieved 12. mai from <https://www.statista.com/statistics/1364493/expected-required-saf-net-zero-aviation-industry/>
- Statistisk Sentralbyrå. (2024, 22. april 2024). *Elektrisitet*. Statistisk sentralbyrå. Retrieved 06. mai from <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet>
- Swanson, R., Satrio, J., Brown, R., Platon, A., & Hsu, D. (2010). Techno-Economic Analysis of Biofuels Production Based on Gasification.
- Tan, E. C. D., & Tao, L. (2019). Economic Analysis of Renewable Fuels for Marine Propulsion. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74678.pdf>
- Tao, L., Milbrandt, A., Zhang, Y., & Wang, W.-C. (2017). Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 261. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>
- Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185 of 10 February 2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels, 14 (2023). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj
- The European Parliament, & The Council of the European Union. (2023). *Amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*. (2023/2413). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>
- Tomasgard, A., Berstad, D., Blekkan, E. A., Karstad, P. I., Burheim, O. S., Dawson, J., Espegren, K. A., Løvås, T., Meyer, J., Møller-Holst, S., Neksa, P., Pollet, B., Størset, S. Ø., Sundseth, K., Thomassen, M., & Ulleberg, Ø. (2019). *Hydrogen i fremtidens lavkarbonsamfunn*. N. Center for Sustainable Energy Research (CenSES). https://www.ntnu.no/documents/7414984/0/Hydrogen+i+framtiden_rapport_A4_web_LR+28-03-2019.pdf/cbcf5251-7a61-41ac-88ea-faef5daf558c
- US Department of Energy Efficiency & Renewable Energy. (u.å.). *Batteries for Electric Vehicles*. US Department of Energy. Retrieved 01. mai from <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-batteries>
- van der Giesen, C., Kleijn, R., & Kramer, G. J. (2014). Energy and Climate Impacts of Producing Synthetic Hydrocarbon Fuels from CO₂. *Environmental Science & Technology*, 48(12), 7111-7121. <https://doi.org/10.1021/es500191g>
- Vela-García, N., Bolonio, D., García-Martínez, M.-J., Ortega, M. F., Almeida Streitwieser, D., & Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244, 114534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114534>
- Verstraete, D. (2015). On the energy efficiency of hydrogen fuelled transport aircraft. 7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991500943X>
- Volvo Trucks. (2018). Emissions from Volvo's Trucks. 3. https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/global/our-values/environmental-care/our-trucks/Emis_eng_10110_14001.pdf
- Volvo Trucks. (2022, 14. desember 2022). *Volvo Trucks reduserer drivstofforbruk med 18 % i test på vei*. Retrieved 17. april from <https://www.volvotrucks.no/no-no/news/press-releases/2022/des/volvo-trucks-cuts-fuel-use-in-road-test.html>

- Watson, M. J., Machado, P. G., da Silva, A. V., Salzar, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141472. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>
- Zang, G., Sun, P., Elgowainy, A., Bafana, A., & Wang, M. (2021). Life Cycle Analysis of Electrofuels: Fischer–Tropsch Fuel Production from Hydrogen and Corn Ethanol Byproduct CO₂. *Environmental Science and Technology*, 55, 3888-3897. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05893>
- ZeroAvia. (2024a). *The contrails and tribulations of aviation's climate impact*. ZeroAvia. Retrieved 14. mai from <https://zeroavia.com/blogs/the-contrails-and-tribulations-of-aviations-climate-impact/>
- ZeroAvia. (2024b). *ZA2000*. Retrieved 15. mars from <https://zeroavia.com/za2000/>



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway