



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for naturforvaltning

Masteroppgave 2015
30 stp

En analyse av læringskostnader ved produksjon av Jet A-1 basert på 2. generasjons etanol

An Analysis of the Learning Cost Production of Jet
A-1 Based on 2nd Generation Ethanol

Tore Styve Johansen

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet ved institutt for naturforvaltning (INA), ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) Og markerer min avslutning på masterstudiet fornybar energi.

Det er i dag store utslipp knyttet til bruk av fossilt Jet-drivstoff innen flytrafikk. Ved en omlegging til bruk av fornybart Jet A-1 drivstoff basert på etanol, som igjen er basert på lignocellulose holdig biomasse vil bidra til at Norge når sine sette klimamål. Det er dermed interessant å foreta en studie som undersøker hvor store lærekostnader som trengs for at Jet A-1 skal kunne produseres til tagens markedspris for fossilt Jet A-1 drivstoff.

Jeg ønsker å takke Gisle Løhre Johansen ved Borregaard for nyttig informasjon. Jeg vil videre rette en stor takk til min veileder Thomas Martinsen for å ha bidratt med sin faglige kompetanse og engasjement under skriveperioden for denne masteroppgaven.

Tore Stvve Johansen, desember 2015

SAMMENDRAG

Potensialet for fremtidig produksjon av Jet A-1 er begrenset til kostnadsrelaterte forhold. Formålet med denne oppgaven har vært å kartlegge hvor store læringskostnader Norge vil måtte subsidiere for å fremme en bærekraftig og lønnsom produksjon av 2 generasjons biodrivstoff i Norge. Dette for produksjonsprosessen Alcohol to Jet (AtJ). Oppgaven studerer hvilke potensielle kostnadsreduksjoner som vil gi mest effekt for produksjonskostnadene knyttet til biokjemisks produksjonsprosess for etanol og AtJ-prosessen. Det ble deretter konstruert to læringskurver med en læringsrate på 6 og 20% for å kartlegge hvordan effekten av læring vil påvirke produksjonskostnadene og kumulativ produksjon.

Oppgaven er kvalitativ og det er samlet inn data fra blant annet offentlige kilder. Det er deretter beregnet hvilken kumulativ produksjon som er nødvendig for å på produksjonsprisen for Jet A-1 ned på et konkurransedyktig nivå. Det ble videre beregnet totale globale læringskostnader og hvilken andel av de globale læringskostnadene Norge bør subsidiere.

Analysen som er gjennomført viser at det vil være store forskjeller mellom en læringsrate på 6 og 20%. Globale læringskostnader ble for en læringsrate på 20% på 962 milliarder, hvor Norges andel vil være på ca. 33 milliarder. Om læringsraten endre til 6% vil de globale læringskostnadene være på 62 925 milliarder kroner. Norges andel er da på ca. 2202 milliarder kroner.

Oppgaven har videre sett undersøkt hvordan krav til bærekraft øker biomasse kostnader gjennom transportkostnader og på inntektpotensial knyttet til salg av produksjonsprosessens bi-produkter.

ABSTRACT

The potential for future production of Jet A-1 is limited to cost-related factors. The purpose of this thesis has been to determine how big learning costs Norway will have to subsidize in order to promote a sustainable and profitable production of 2-generation biofuels in Norway. This for the manufacturing process of Alcohol to Jet (ATJ). The thesis evaluates the potential cost reductions that will have most impact for the production costs related to biochemical production process for ethanol and the ATJ-process. It was then constructed two learning curves with a learning rate of 6 and 20% for investigating how the effect of learning will affect manufacturing costs and cumulative production.

The task is qualitative and it is collected data from among other public sources. There is then calculated the cumulative production which is necessary to bring the production of Jet A-1 down to a competitive level. It is estimated the total global learning costs and the share of global learning costs that Norway should subsidize.

The analysis carried out shows that there would be major differences between a learning rate of 6 and 20%. A global learning cost with a learning rate of 20% is approximately 962 billion, where Norway's share will be around 33 billion. With a learning rate change to 6% will the global learning costs be at 62,925 billion. Norway's share is then approximately 2202 billion.

The mission has also seen examined how sustainability requirements increasing biomass costs through transport costs and the revenue potential associated with the sale of the production process by-products.

It is further examined how sustainability requirements increasing biomass costs through transport costs and how the revenue potential linked to the sale of the by-products from the production process.

Innholdsfortegnelse

FIGURLISTE	6
TABELLISTE	7
1. Innledning.....	8
Avgrensning av oppgaven	9
2. Bakgrunn.....	10
2.1 Bærekraftig biomasse.....	10
2.2 Annengenerasjons biodrivstoff	10
2.3 Bioraffineri.....	11
2.4 Teknologi	11
2.4.1 Produksjonsdel 1 - Biokjemisk etanolproduksjon	11
Potensielle kostnadsreduksjoner ved etanolproduksjon	12
2.3.2 Produksjonsdel 2 - Alkohol til Jet A-1 (AtJ).....	13
Potensielle kostnadsreduksjoner for AtJ	14
2.5 Tidligere studier.....	15
3. Teori.....	21
3.1 Teknologilære	21
3.2 Læringskostnader	22
4. Metode	24
4.1 Kvantitativ metode	24
4.2 Databehandling	24
Estimerte læringskostnader ved global produksjon.....	25
Estimerte læringskostnader for Norge	25
5. Resultat.....	27
5.1 Læringskurver	27
Estimerte læringskostnader for Norge.....	28
6. Diskusjon	29
6.1 Oppgavens resultat	29
Estimerte læringskostnader ved global produksjon.....	29
Estimerte læringskostnader for Norge.....	30
6.2 Potensielle kostnadsreduksjoner	31
6.3 Kostnader ved bærekraft	31
6.4 Bi-produkter og marked	32
6.5 Videre arbeid	32
7. Konklusjon	33
Litteraturliste.....	34

Vedlegg	38
Vedlegg 1 – Beregning av E, Break-even og læreknstnader	38
Læringskurve (LR = 20, Markedspris = 4.2)	38
Læringskurve (LR = 6, Markedspris = 4.2)	40
Vedlegg 2 – Beregninger av produksjonsknstnad pr dobling i kumulativ produksjon	42
Vedlegg 3 - Estimerte læringsknstnader for Norge	43

FIGURLISTE

Figur 1: Viser oppdeling av typer generasjonstrinn for biodrivstoff.....	10
Figur 2: Viser Biokjemisk og Termokjemisk konvertering av råstoff.....	10
Figur 3: Produksjonsprosessen av bioalkoholer fra biomasse i trinn.....	12
Figur 4: Produksjonsprosessen av Jet A-1 fra etanol.....	13
Figur 5: Utvikling av produksjonskostnader AtJ fra år 2012-2030.....	16
Figur 6: Anslag på produksjonskostnader for 2. generasjons biodrivstoff.....	17
Figur 7: Erfaringskurver i et bioenergisystem og sluttenergi bærere vist i %vis reduksjon.....	19
Figur 8: Produksjonskostnader for brasilianske sukkerrør og etanol.....	20
Figur 9: Lineær presentasjon av læringskurve for solcellemoduler, 1976-1992.....	21
Figur 10: Dobbellogaritmisk presentasjon av læringskurve for solcellemoduler, 1976-1992.....	22
Figur 11: Skjæringspunkt for break-even og lærekostnader for solcellemoduler.....	23
Figur 12: Læringskurven for Jet A-1 ved en læringsrate på 20%.....	27
Figur 13: Utdrag av oppgavens to Jet A-1 læringskurver med en læringsrate på 6 og 20%.....	28

TABELLISTE

Tabell 1: Beregnede produksjonskostnader for Jet A.....	15
Tabell 2: Utvikling av etanolbehov for produksjon av Jet A-1 fordelt på 3 scenario.....	16
Tabell 3: Aktører som ble intervjuet under utarbeidelse av Econ (2008).....	18
Tabell 4: Breakdown kostnad for lignocellulose prosess.....	19
Tabell 5: Forskjellige produksjonskostnader for enzym.....	20
Tabell 6: Tall lagt inn for dannelse av graf ved læringsrate på 20 %.....	25

1. Innledning

Transportsektoren i Norge står for nærmere 30 prosent av Norges totale klimagassutslipp (SSB 2014). Arvesen og Hertwich (2007) har beregnet at innenriks luftfart hadde et utslipp på 2,6 prosent av Norges totale CO₂-utslipp. Om man tar hensyn til utenlands trafikk, frem til flyet et passert 1000 meters høyde, vil flytrafikken stå for omtrent 7,5 prosent av Norges totale CO₂-utslipp. Norge er forpliktet til å redusere sine klimagassutslipp gjennom Eu ved kyoto-avtalen, klimaforliket og andre nasjonale mål (SSB 2015). For å nå målet er det aktuelt med større endringer innenfor transportsektoren. Bruk av 2. generasjons biodrivstoff er et aktuelt tiltak for reduksjon av klimagassutslipp innen luftfartssektoren (Sunde et al. 2011). Samtidig har Norge et potensial for økt utakk av biomasse fra skog på i overkant av 7 TWh/år, gitt en avvirkning som per dags dato, egnet for produksjon (Killingland et al. 2013). Norge har en spisskompetanse på treforedling og kjent teknologi knyttet til Borregaard som er verdens mest avanserte bioraffineri. Borregaard produserer mindre mengder bioetanol, som et biprodukt, men grunnet høye kostnader er etanol i dag ikke et satsningsområde.

En utredning av hele verdikjeden for norsk produksjon av Jet A-1 biodrivstoff for sivil luft-fart har konkludert med at det både er teknisk og økonomisk mulig, hvorav Norsk skog er viktigste råstoffkilde for produksjon av bærekraftig biodrivstoff (Killingland et al. 2013). For at dette skal skje må myndighetene må legge til rette for en langsiktig og forutsigbar utvikling) (Nilsen 2015). Bærekraftkravene setter krav til biomassen som kan brukes for produksjon og vil kunne bidra til en økning i kostnaden på biomasseressursene, grunnet for eksempel økte kostnader ved lengre transport og ved redusert tilgjengelighet. Kostnaden på biomasse utgjør i dag den største delen av totale produksjonskostnader (Ibenholt 2011). Marc (2012) påpeker at EU kan produsere biodrivstoff fra lignocellulose på et konkurransedyktig nivå de neste 15-20 årene, men en bred politisk satsning og up-front investering i læring knyttet til teknologi vil være nødvendig. Det samsvarer med Nilsen (2015) som konkluderer med at produksjon av biodrivstoff i Norge, i en overgangsfase, vil være avhengig av støtte.

Problemstilling:

Hvor store lærings kostnader vil Norge måtte subsidiere for å fremme en bærekraftig og lønnsom produksjon av 2 generasjons biodrivstoff i Norge ved produksjonsprosessen Alcohol to Jet (AtJ).

Delproblemstillinger:

- Hvordan påvirker bærekraftskriteriene, satt i Eu-direktivet, kostnadene av råstoff for produksjon av biodrivstoff.
- Vil det være et marked for de mest verdifulle biproduktene ved produsert av AtJ-biodrivstoff i Norge eller globalt.

Avgrensning av oppgaven

Systemgrensen for denne oppgaven er satt til å gjelde for Norge, men oppgaven vurdere mulighetene ved import av råstoff til produksjon. Oppgaven er avgrenset til å vurdere produksjon av biodrivstoff til flytransport og dermed ikke vurdere på land- og skipsfart. Ved produksjon av biodrivstoff vil denne oppgaven begrense seg til å undersøke om produksjonsprosessen Alcohol to Jet (AtJ) (Killingland et al. 2013). Fischer Tropsch (FT) er berørt på et overordnet plan og ikke i dybden. Faktorer som påvirker markedsprisen for biomasse fra skog ligger utenfor oppgaven.

2. Bakgrunn

2.1 Bærekraftig biomasse

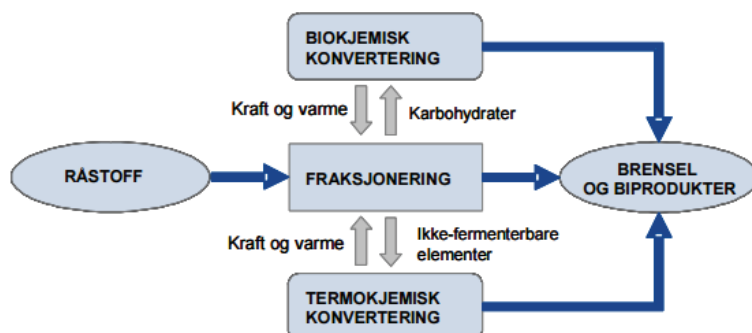
Bærekrafts kriteriene sikrer blant annet at en nettobesparelse i klimagassutslipp sammenlignet med fossilt drivstoff, da mengden CO₂ som slippes ut ved forbrenning av biodrivstoff bindes opp ved dannelse av ny biomasse (Liebe 2010). Bærekrafts kriteriene fastslår videre restriksjoner for uttak av råstoff i områder der det er et høyt biologisk mangfold og områder med høy karbonbinding, som for eksempel myr (KLD 2008). Denne oppgaven er avgrenset til å ikke se på produksjonskjeden før biomassen er levert på anlegg. Det forutsettes at levert biomasse til etanol produksjon er bærekraftig ved dagens markedspris.

2.2 Annengenerasjons biodrivstoff

Biodrivstoff en fellesbetegnelse på drivstoff som blir produsert med et utgangspunkt i biomasse.

1.-generasjons råstoff	Matvekster, korn, sukker, sivelse, planteoljer, dyrefett
	Klimaeffekt: Liten eller ingen
	Energibalanse: Liten til veldig god
2.-generasjons råstoff	Lignocellulose
	Klimaeffekt: Middels til høy (60-80 %)
	Energibalanse: Medium til god
3.-generasjons råstoff	Mikro og makroalger
	Klimaeffekt: Middels til høy
	Energibalanse: Negativ til (teoretisk) veldig god
4.-generasjons råstoff	Alger, mikroorganismer og mikrober (genmodifiserte), røkgass
	Klimaeffekt: >100 % med karbonfangst som ressurs og lagring
	Energibalanse: Negativ til teoretisk veldig høy, gjenvinning av spillvarme

Figur 1 Første- til fjerdegenerasjons oppdeling av biodrivstoff basert på råstoff (Killingland 2013)



Figur 2 Biokjemisk og termokjemisk konvertering av råstoff til brensel (Econ 2010)

Biodrivstoff deles ofte inn i generasjonssprang basert på enten råstoff eller teknologi. I denne oppgaven vil 2. generasjon biodrivstoff være basert på lignocellulose som råstoff, se figur 1. Lignocellulose består av de tre funksjonelle gruppene: cellulose, hemicellulose og lignin og er de organiske hovedbestanddelene av de kjemiske forbindelsene i trevirke (Hamelinck & Faaij 2006). Produksjon av 2. generasjons biodrivstoff kan deles inn i to fremtredende prosessstyper; termokjemisk- og biokjemisk konvertering, se figur 2.

Sluttproduktet for biokjemisk konvertering er bioetanol og andre bioalkoholer, mens termokjemisk konvertering produserer biodiesel. Den termokjemisk prosessen biomasse to flytende (BTL) kan produsere etanol og alkoholer ved gassifisering og syntese (Econ 2010). I de neste delkapitlene vil de viktigste prosessstrinnene knyttet til produksjon av etanol, gjennom biokjemisk konvertering, og produksjon av flydrivstoffet Jet A1 fra alkohol forklares.

2.3 Bioraffineri

Et produksjonsanlegg for 2. generasjons bioetanol har i dag er oftest bioraffineri. Bioraffineri er et produksjonsanlegg hvor en helhetlig prosessering av biomasse til et bredt spekter av salgbare sluttprodukt (Galbe et al. 2007). Fordelen med et bioraffineri er at man har muligheten til å utnytte mest mulig av biomassen og videre kunne optimalisere produksjonen etter sluttprodukters lønnsomhet (Scheper et al. 2008). Borregaard er et av verdens største bioraffineri og per dags dato eneste norske produsent av etanol fra lignocellulose. Borregaard er i dag et av verdens største bioraffineri og er eneste norske produsent av etanol fra lignocellulose. Borregaard produserer i dag 18-20 millioner liter etanol fra lignocellulose basert ved behandling av enzymer (Johansen 2015). Weyland var et planlagt produksjonsanlegg av etanol, basert på syre-behandling av lignocellulose, i Norge, men har foreløpig lagt planer om produksjon i Norge på is (Berg 2015).

2.4 Teknologi

Produksjon av Jet a-1 drivstoff vil i denne oppgaven deles inn i to produksjonsdeler:

- Produksjonsdel 1 - **Biokjemisk etanolproduksjon**
- Produksjonsdel 2 – **Etanol og andre alkoholer til Jet A-1 drivstoff (AtJ)**

Prosessdel 1 er produksjon av etanol fra lignocellulose holdig biomasse. Etanolen som produseres er råstoffet som benyttes i prosessdel 2. Prosessdel 2 er produksjon av Jet A-1 flydrivstoff fra etanol. Ved prosessdel 1 vil det i tillegg til etanol bli produsert andre alkoholer. I denne oppgavene blir de andre alkoholene betegnet som et biprodukt og ikke tatt med som råstoffgrunnlag for produksjonsdel 2.

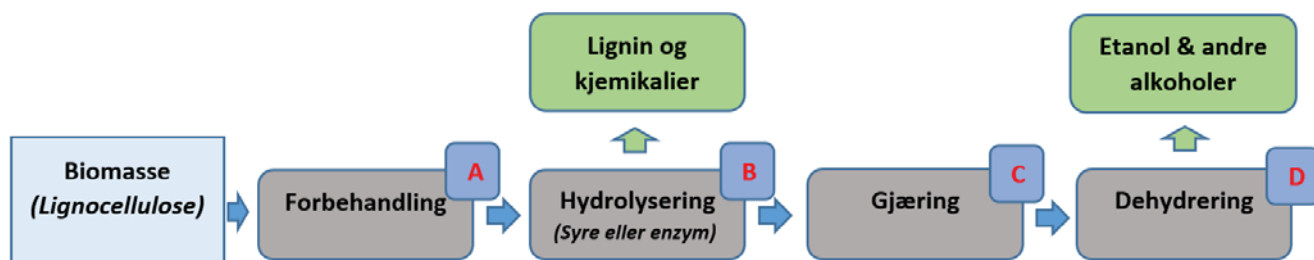
For begge produksjonsdelene vil først de viktigste produksjonstrinnene forklares, deretter potensielle kostnadsreduksjoner og før potensialet for økte inntekter av biprodukt forklares.

2.4.1 Produksjonsdel 1 - Biokjemisk etanolproduksjon

Biokjemisk konverteringsprosess av bioalkoholer fra lignocellulose til etanol deles inn i fire trinn, se figur 3. Første trinn er forbehandling av lignocellulose råstoffet (A), andre er hydrolyse eller gassifisering av behandlet lignocellulose (B). Det tredje trinnet er fermentering (C) og tilslutt separeres produkter ved dehydrering (D). Bare produksjonstrinn (A) og (B) vil forklares nærmere, se kapittel 2.3.2 Potensielle kostnadsreduksjoner.

Første prosessdel for levert biomassen til anlegg er forbehandling av levert biomasse (A). Dette prosesstrinnet klargjør biomassen, for senere prosesstrinn, ved for eksempel damp eller syre for å

maksimere utbyttet av de nesteproduksjonsprosessene. I prosesstrinnet Hydrolyse (B) biomassen ved bruk av syre, enzymer eller en blanding av begge angripes. I denne prosessen vil karbohydratene i cellulosen og hemicellulosen omdannes til individuelle sukkermolekyler som så nøytraliseres før den går videre til neste produksjonsprosess (Eggert et al. 2011).



Figur 3 Prosess for produksjon av bioalkoholer fra lignocellulose – Blå = Råstoff for prosessen Grå = prosesstrinn og Grønn = sluttprodukt – Prosesstrinn A er forbehandling av levert lignocellulose, prosesstrinn B Hydrolysering, prosesstrinn C er gjæring og produksjonstrinn D er dehydrering - basert på (Killingland 2013)

Potensielle kostnadsreduksjoner ved etanolproduksjon

Det ligger potensial for kostnadsreduksjoner knyttet til alle overnevnte produksjonstrinn. De største kostnadene knyttet til produksjon av etanol fra lignocellulose globalt er forbehandling av biomassen (A) og produksjonstrinnet hydrolyse/gassifisering (B). Borregaard påpeker at de største kostnadene knyttet til deres produksjon er kostnadene knyttet til levert biomasse på anlegg og i produksjonstrinnet hydrolyse. Produksjonsprosessene av råstoff, fra skog til anlegg, før levert på anlegg ligger utenfor oppgavens systemgrenser, vil denne potensielle kostnadsreduksjonen ikke utredes videre. Når det kommer til potensialet for kostnadsreduksjoner i produksjonstrinnet hydrolyse, vil de største reduksjonene ligge i (Johansen 2015):

1. Å redusere behovet av enzymer under prosessen og dermed redusere innkjøpskostnader.
2. Å øke prosessdyktigheten ved enzymbehandling. Ved å redusere tiden lignocellulose bruker på nedbryting av enzymer, vil anleggets størrelse kunne reduseres eller øke anleggets produksjonskapasitet. Reduksjon av anleggets størrelse kan blant annet ha en stor innvirkning på anleggets investeringskostnader og økt produksjonskapasitet vil gi større salspotensiale.

Grunnen til at det globalt er større kostnadsreduksjoner å hente ved forbehandling av råstoff kommer av at mange globale anlegg, spesielt i USA, baserer sin produksjon på blant annet lignocellulose fra halm og maisstammer. Dette råstoffet har ofte urenheter som blant annet sten og jord, som øker kostnadene for behandling. Borregaard har ikke dette problemet, da de baserer sin produksjon på ren lignocellulose fra trevirke (Johansen 2015). Ved fremtidig økt etterspørsel av

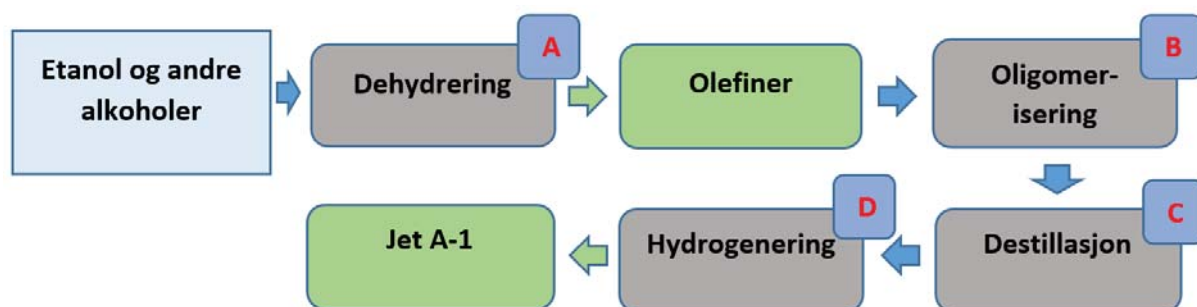
trevirke vil andre lignocellulose holdige råstoff som GROT og halm kunne bli benyttet for produksjon av 2. generasjons biodrivstoff. Ved bruk av GROT og halm til etanolproduksjon i Norge, vil det kunne føre til en økning i produksjonskostnaden for etanol.

Potensielle inntekter ved salg av bi-produkter

IEA (2011) påpeker at ved utnyttelse av bi-produktene kan produksjonskostnader for biodrivstoff reduseres med opptil 20 prosent, avhengig av tupe drivstoff og bruk av bi-produktene. Et viktig bi-produkt er lignin. Den vanligste måten å behandle lignin på er å skape lavverdi sluttprodukt som varme og elektrisitet. De store kostnadsreduksjonene ligger i å kunne omdanne biprodukt som lignin fra etanolproduksjonen til en rekke høyverdige sluttprodukter i et bioraffineri (Johansen 2015). Borregaard produserer i dag en rekke sluttprodukter, over 100 forskjellige, fra lignin. De mest verdifulle er Vanillin og spesialprodukter til blant annet oljeboring og landbruksektoren hvor salgsprisen per kg er høy. Produkter til betongindustrien gir videre større inntekter. Sluttproduktene til betongindustrien har lav kilopris, men er et godt etablert marked som etterspør større volum (Rødsrud 2015).

2.3.2 Produksjonsdel 2 - Alkohol til Jet A-1 (AtJ)

Produksjonsprosessen AtJ, er en prosess hvor etanol og andre typer alkohol prosesseres til Jet A-1 drivstoff og andre parafiner. Produksjonsprosessen kan deles inn i fire trinn, se figur 4. Første trinn i produksjonsprosessen er dehydrering av etanol, evt. andre alkoholer, til olefiner (A). Trinn to er oligomerisering av olefiner (B), for så å destillere for å skille ut ønskede produkt (C). Siste produksjonstrinn er hydrogenering (D).



Figur 4 Prosess for produksjon av Jet A-1 fra etanol - Blå = Råstoff for prosessen Grå = prosesstrinn og Grønn = sluttprodukt – Prosesstrinn A er dehydrering av etanol og andre alkoholer, prosesstrinn B er oligomerisering av olefiner, produksjonstrinn C er destillasjon og prosesstrinn D er hydrogenering _ basert på (Killingland 2013)

Potensielle kostnadsreduksjoner for AtJ

AtJ-prosessen er en velkjent teknologi innen petroleumssektoren. Selv om AtJ- prosessen basert på etanol er ny, er det lite potensielle kostnadsreduksjoner å hente i prosesstrinnene. Nærmere 90% av kostnadene for produksjon av jet A-1 fra etanol ligger i kostnaden av selve etanolen. De største potensielle kostnadsreduksjonene for AtJ-prosessen ligger dermed i reduksjon av prisen på etanol, som ble forklart i kapittel 2.3.1.

Når det kommer til produksjonstrinnene for omgjøring av etanol til Jet A-1 drivstoff er det trolig et potensial for forbedring i alle produksjonstrinnene. En forbedring i produksjonstrinnene vil kunne redusere mengden etanol som trengs for å produsere Jet A-1. Forbedringene vil kunne ha stor innvirkning på produksjonskostnadene og føre til betraktelige kostnadsreduksjoner. Det forventes ingen kostnadsreduksjoner knyttet til investering og andre kostnader, men bare ved råstoffgrunnlaget som er etanol. Grunnen er at produksjonsprosessen allerede er en utbredt teknologi innenfor petroleumssektoren og bare utgjør litt over 10% av kostnadene.

Potensielle inntekter ved salg av bi-produkter

Et viktig biprodukt ved AtJ-produksjonsprosessen er overskuddsvarmen fra dehydreringsprosessen (A) som gir mulighet til å produsere og selge lavverdi produkt som damp.

2.5 Tidligere studier

Det foreligger en del rapporter og artikler knyttet til blant annet potensial, muligheter og beregninger av estimerte kostnader og salgspriser knyttet til produksjon. Annengenerasjons biodrivstoff mangler foreløpig et kommersielt gjennombrudd og utprøvde løsninger i storskala. Derfor finnes det lite konkret data knyttet til blant annet produksjonskostnader. De viktigste vil bli vist under:

(Killingland et al. 2013):

Utredningen som er gjennomført er av hele verdikjeden for en norsk, bærekraftig og lønnsom produksjon av Jet A-1. Den har vurdert tema som bærekraft, råstoffpotensial, muligheter og utfordringer ved teknologier, produksjonskostnader, klimaeffekter og hva som er veien videre. Utredningen har estimert produksjonskostnader med framskrivninger til 2025 basert på forskjellige scenarioer. Produksjon av Jet A-1 drivstoff er sett på med Fischer Tropsch (FT) og Alkohol til Jet (AtJ), hvorav mye tyngde lagt på FT-prosessen. De beskriver videre utfordringer og barrierer som må løses for å etablere en kommersiell biodrivstoffindustri i Norge.

Økonomimodellen i utredningen tar utgangspunkt i et produksjonsanlegg som produserer 50 millioner liter Jet A-1 og andre biprodukt. Det er forutsatt et behov for 8-10 anlegg slike anlegg for å kunne produsere 230 millioner liter Jet A-1. Ved beregning av estimerte produksjonskostnader er det lagt til grunn en produksjon på 27 millioner liter Jet A-1. Ved norsk avvirkning opp til norsk balansekvantum vil, økt avvirkning, og hele volumet brukes til biodrivstoff til luftfart, er det teoretiske potensialet for produksjon av Jet A-1 på rundt 360 millioner liter. Ved dagens avvirkningsnivå, mer realistisk, vil potensialet ligge på rundt 152 millioner liter.

For beregningene av produksjonskostnadene for AtJ-prosessen er det forutsatt at prosessen kjøper inn ferdig produsert etanol til en markedspris på 6 kr/liter. Det forutsettes at det trengs 4 liter etanol for å kunne produsere 1 liter Jet A-1. Produksjonsprosessen forutsettes å være optimalisert for produksjon av Jet A-1. Markedsprisen for Jet A-1 er satt til 4,1 kr/l.

Resultatet viser at de estimerte produksjonskostnadene for jet A-1 vil være:

Tabell 1 Beregnede produksjonskostnader for Jet A

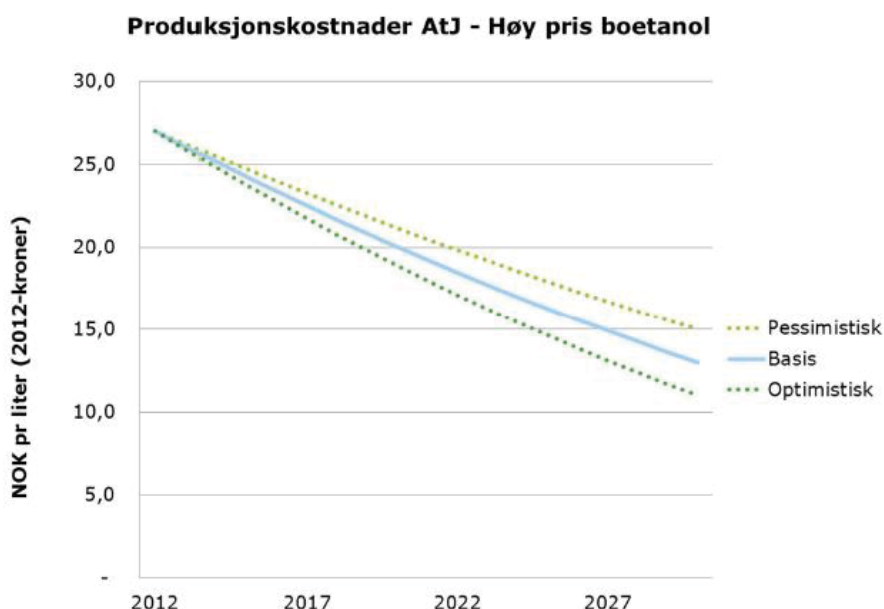
Produksjonskostnader	Kr/liter	Prosentvis andel (%)
<i>Etanol kostnad (Råstoff)</i>	24	88,9
<i>Investeringskostnader</i>	1	3,7
<i>Andre kostnader</i>	2	7,4

De totale produksjonskostnadene til Jet (AtJ) ble estimert til 27 kroner/liter i 2012 kroner, hvorav kostnaden for etanol var på 24 kroner/liter. Den prosentvise andelen i tabell 1 er beregnet selv ved: $(\text{del tall} \cdot 100) / \text{Heltall}$. I rapporten nevnes det at råvarekostnadene er i overkant av 90%, men jeg finner ikke noe som støtter dette i forutsetningene. Jeg vil videre i oppgaven anta at råstoffkostnaden etanol vil være rundt 89% av total produksjonskostnad for Jet A-1.

Tabell 2 Utvikling av etanolbehov for produksjon av Jet A-1 fordelt på 3 scenario. Tallene oppgitt i tabellen er antall liter etanol som trengs for produksjon av 1 liter Jet A-1

Etanolbehov (liter bioetanol pr. liter Jet A-1)	2012	2020	2030
Optimistisk	4	3,1	2,0
Basis	4	3,3	2,5
Pessimistisk	4	3,6	3,0

For beregning av fremtidige produksjonskostnader er det forutsatt at markedsprisen for etanol synker til 4 kr/l frem mot år 2030. Det er videre forutsatt en uendret kostnad i investering og andre kostnader, se tabell 1. Behovet for etanol til produksjon av Jet A-1 ble forutsatt i tre scenarioer, se tabell 2. Resultatet viser en forventet produksjonskostnad for Jet A-1 på 13 kr/l. i år 2030 for basis scenarioer, se figur 5.



Figur 5 Utvikling av produksjonskostnader AtJ fra år 2012-2030. Tre forskjellige senarioer for basert på forventet behov av etanol, se tabell 2

Deane et al. (2015):

En kort vurdering av ulike mål for utslippsreduksjon for luftfart frem mot år 2050 og anslår hvilke mengde jet-drivstoff fra biomasse som kreves for å nå disse målene gjennom flere vekst scenario. De viser til at dagens markedspris ligger rundt 0,48\$/l, noe som tilsvarer 4,2kr/l. Denne markedsprisen vil bli brukt i oppgavens beregninger.

Econ (2008):

Har kartlagt hvilke barrierer som hindrer produksjon av 2. generasjons biodrivstoff i Norge og hvilke ramme betingelser som er nødvendig for økt produksjon. De har drøftet både Fischer Tropsch (FT) og produksjon av bioetanol.

Forutsetningen for beregningene av produksjonskostnadene er tall fra to anlegg. Et biokjemisk anlegg i Canada av selskapet Iogen og et FT -anlegg i Tyskland. Selskapene har betydelig erfaring fra bygging og drift av større demonstrasjonsanlegg. Det er ved beregning av produksjonskostnadene for bioetanol lagt til grunn en årlig produksjonskapasitet på 90 millioner liter.

Produksjonskostnadene uten inntekter av biprodukter er beregnet til:

		<i>Biodiesel</i>	<i>Bioetanol</i>
Kapitalkostnad	Kroner/liter	2,9 – 3,6	3,4 – 4,2
Råvarekostnad	Kroner/liter	3,2 – 4,7	3,7 – 5,2
Drift og vedlikehold (20 %)	Kroner/liter	1,2 – 1,8	1,4 – 2,1
Totale kostnader	Kroner/liter	7,4 – 10,0	8,5 – 11,3
Totale kostnader	Øre/kWh	80 – 105	140 – 185

Figur 6 Anslag på produksjonskostnader av 2. generasjons biodrivstoff (Econ 2008)

Kostnaden for bioetanol er høyere enn for biodiesel, da en liter bioetanol inneholder 6,1 kWh energi, mens biodiesel inneholder 9,4 kWh. Rapporten antar, basert på intervju med Borregaard og SEKAB i Sverige, at en storskala produksjon av etanol vil bli lønnsom ved en etanolpris på 6-7 kr/liter.

Rapporten konkluderer videre med at årlig etanol kapasitet for kommersielle anlegg basert på lignocellulose antas å ligge i størrelsesorden 100-250 millioner liter biodrivstoff med en investeringskostnad på tre til syv milliarder kroner. For realisering av pilotanlegg for 2. generasjons biodrivstoff vil investerings-behovet ligge i størrelsesorden 20-30 millioner kroner (Weyland i Bergen og Inbicon i Danmark) til om lag 150 millioner kroner (SEKAB i Sverige). Alle anleggene benytter biokjemisk konvertering og har en teoretisk årskapasitet på 0,1-0,2 millioner liter etanol.

Basert på størrelsen på aktørenes anlegg som ble vurdert i 2007-2008 antas det at anleggenes størrelse må tidobles produksjonskapasitet for å være lønnsom, se tabell 3.

Tabell 3 Selskaper som ble intervjuet under utarbeidelse av (Econ 2008)

Aktører	Teknologi	Land
Borregaard	Biokjemisk celluloseetanol	Norge
Weyland	Biokjemisk celluloseetanol	Norge
Xynergo	Pyrolyseolje/FT-biodiesel	Norge
Iogen	Biokjemisk celluloseetanol	Canada
Choren	FT-biodiesel	Tyskland
Inbicon	Biokjemisk celluloseetanol	Danmark
SEKAB	Biokjemisk celluloseetanol	Sverige
Range Fuels	Termokjemisk bioetanol	USA

(McDonald & Schrattenholzer 2001):

Danner et større empirisk grunnlag for valg av læringsrater a energikonverteringsteknologier for energimodeller.

Bergseng et al. (2012):

En rapport som viser teknisk og økonomisk potensial for biomasse benyttet til energiformål fra skog på en regional basis i Norge.

Galbe et al. (2007):

Er en prosessanalyse av økonomien knyttet til produksjon av bioetanol og gir målsetninger for hvilke prosessbedrnger bør bli forsket på. En studie som trekkes frem et en sammenligning av produksjonsposessen for stivelse og lignocellulose. For begge anleggene antas det en årlig etanolproduksjon på 55m³, som er relativt lite. Verdien er satt til for ren etanol, selv om egentlig destilasjon var antatt å være 94%. Videre ble bare biprodukt I form av varme og elektrisitet inkludert. For lignocellulose prosessen var flyten av råmaterial på 200 000 dry metric tons y⁻¹.

Den totale etterspørselen av energi lignocelluloeprosessen ble estimert til 16 MJ L⁻¹ og kapitalkostnaden ble satt til 99 millioner. Den estimerte produksjonskostnaden var 0,60 US\$ L⁻¹ for den lignocellulosebaserte prosessen. I tabell 4 er breakdown kostnadene presentert:

Tabell 4 Breakdown kostnad for lignocellulose basert prosess i US\$ L⁻¹ (Galbe et al. 2007)

	Lignocellulosics	
Råstoff	0,200	
Kjemikalier	0,041	
Enzymer	0,091	
Bi-produkter	-0,147	
Sirup	-0,030	
Damp	0,130	
Andre hjelpemidler	0,031	
Vedlikehold og forsikring	0,054	
Arbeid	0,033	
Kapital	0,194	Totale kostnader uten Salg av bi-produkt
Totale koatnader	0,597	0,657

Ved beregning av prosent, $100 - ((0,597 * 100) / 0,657)$, ser vi at ca. 9% av produksjonskostnaden kan reduseres ved salg av bi-produkter.

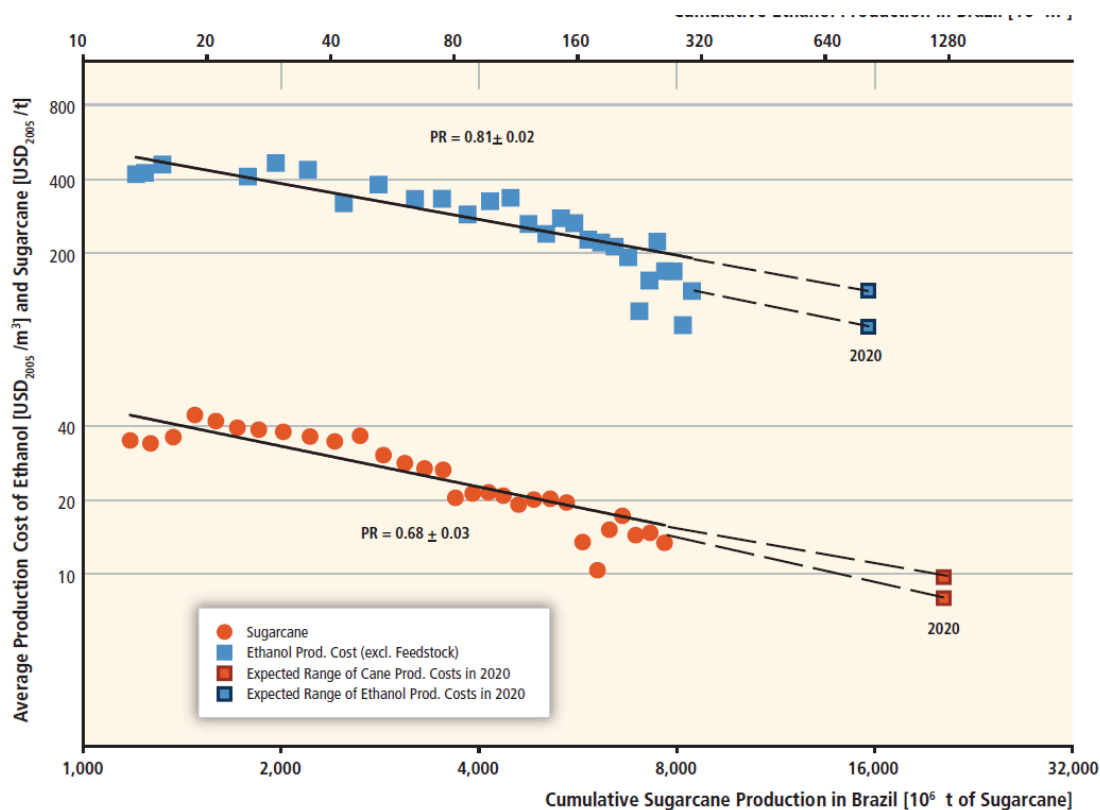
IPCC (2011):

En rapport som upartisk vurderer vitenskapelig litteratur om fornybar energi sin rolle i å forebygge klimaendringer for politikere, næringsliv, akademiske forskere og samfunnet. Del 3, kapittel 2 drøfter en rekke aspekt knyttet til Bioenergi. Det vises til en kartlegging av flere læringsrater for blant annet flere produksjonsprosesser for etanol:

Learning system	LR (%)	Time frame	Region	N	R ²
Feedstock production					
Sugarcane (tonnes sugarcane) ¹	32±1	1975–2005	Brazil	2.9	0.81
Corn (tonnes corn) ²	45±1.5	1975–2005	USA	1.6	0.87
Logistic chains					
Forest wood chips (Sweden) ³	12–15	1975–2003	Sweden/Finland	9	0.87–0.93
Investment and O&M costs					
CHP plants ³	19–25	1983–2002	Sweden	2.3	0.17–0.18
Biogas plants ⁴	12	1984–1998		6	0.69
Ethanol production from sugarcane ¹	19±0.5	1975–2003	Brazil	4.6	0.80
Ethanol production from corn (only O&M costs) ²	13±0.15	1983–2005	USA	6.4	0.88
Final energy carriers					
Ethanol from sugarcane ⁵	7 29	1970–1985 1985–2002	Brazil	~6.1	n.a.
Ethanol from sugarcane ¹	20±0.5	1975–2003	Brazil	4.6	0.84
Ethanol from corn ²	18±0.2	1983–2005	USA	7.2	0.96
Electricity from biomass CHP ⁴	8–9	1990–2002	Sweden	~9	0.85–0.88
Electricity from biomass ⁶	15	Unknown	OECD	n.a.	n.a.
Biogas ⁴	0–15	1984–2001	Denmark	~10	0.97

Figur 7 Erfaringskurver for store komponenter i et bioenergisystem og sluttenergi bærere vist i %vis reduksjon i kostnad/pris per dobling av kumulativ produksjon (IPCC 2011).

Rapporten viser videre til en graf som viser læringskurve for produksjonskostnader sukkerrør fra Brasil og etanol mellom 1975 og 2005, se figur 8.



Figur 8 Produksjonskostnader for brasilianske sukkerrør og etanol vist i læringskurver i tidsrommet 1975 og 2005 med trendlinje frem til 2020. Kostnadene er gitt i US dollar for 2006. Progresjonsraten er innhentet ved best tilpasset data innhentede kilder (IPCC 2011).

Klein-Marcuschamer et al. (2012):

Konstruerte en teknisk-økonomisk modell for fremstilling av sopp-cellulaser, enzym som bryter ned cellulose, for å forstå hvordan enzymer bidrar til kostnaden av biodrivstoff basert på lignocellulose. De hentet ut produksjonskostnader på enzym fra tidligere litteratur:

Tabell 5 Forskjellige produksjonskostnader for enzym fra Klein-Marcuschamer et al. (2012) sin litteratursøk.

(Aden & Foust 2009)	\$0.10/gal $\approx$ 0,88kr/3.7854l $\approx$ 0,2325 kr/l
(Lynd et al. 2008)	\$0.30/gal $\approx$ 2,63kr/3.7854l $\approx$ 0,6948 kr/l
(Dutta et al. 2010)	\$0.32/gal $\approx$ 2,81kr/3.7854l $\approx$ 0,7423 kr/l
(Klein-Marcuschamer et al. 2010)	\$0.35/gal $\approx$ 3,07kr/3.7854l $\approx$ 0,8110 kr/l
(Kazi et al. 2010)	\$0.40/gal $\approx$ 3,51kr/3.7854l $\approx$ 0,9273 kr/l

De kom frem til at produksjonskostnadene for enzymer var mye høyere enn allment antatt i litteraturen de undersøkte, se tabell 5.

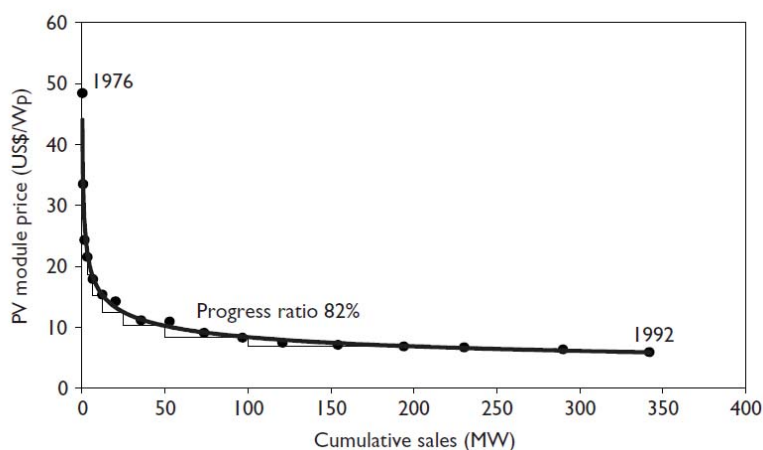
3. Teori

3.1 Teknologilære

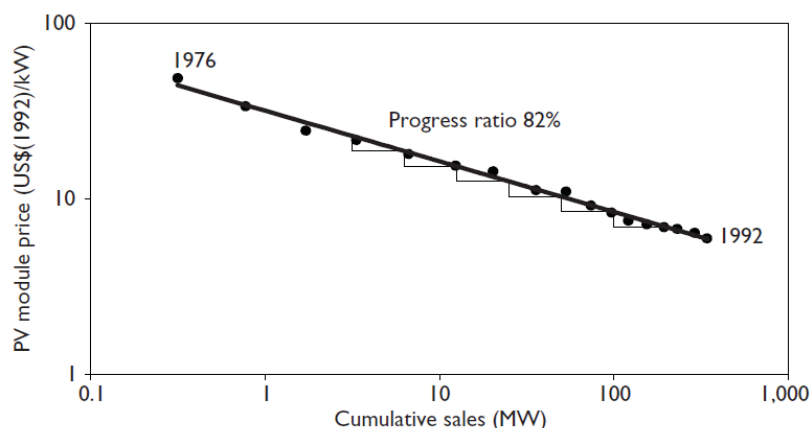
Læringsprosessen for en teknologi, ved et tidlig stadium, i et energisystem er ofte en nøkkelfaktor for å oppnå kostnadsreduksjoner for en teknologi (Barreto & Kypreos 2004). Kostnadsreduksjonene oppnås ved at produsenter og forbrukere får erfaring med teknologien, noe som fører til at den tekniske og økonomiske ytelsen som oftest øker. For å finne ut hvor mye støtte en teknologi trenger for å kunne bli konkurransedyktig med en annen kommersiell teknologi og hvor stor andel Norge må bidra med, vil læringskurver være et godt hjelpemiddel. Læringskurver er et godt hjelpemiddel fordi de gir en enkelt, kvantitativt forhold mellom kumulativ produksjon og kostnad (Wene 2000). Læringskurven kan beskrives matematisk ved hjelp av eksponentiell ligning, se ligning (1). Den resulterende kostnaden $C(X_{cum})$ er lik summen av, den akkumulerte produksjonen X_{cum} og læringsparameter E (Martinsen 2011).

$$(1) \quad C(X_{cum}) = C_0(X_{cum})^{-E}$$

Læringskurven kan presenteres grafisk på to forskjellige måter. I figur 9 er læringskurven for en PV modell presentert som en lineær funksjon. I en lineær presentasjon vil absolutte endringer reflekteres, noe som betyr at eventuelle avstander langs aksene være direkte proporsjonal med den absolutte endring i kumulativt salg og pris. Når vi ser på kurven er den i starten meget bratt, men etter hvert som erfaringen akkumuleres, flater også kurven ut og større mengde salg gir etter hvert mindre endringer.



Figur 9 Lineær presentasjon av læringskurve for solcellemoduler, 1976-1992 (Wene 2000)



Figur 10 Dobbellogaritmisk presentasjon av læringskurve for solcellemoduler, 1976-1992 (Wene 2000)

Figur 10 er akkurat samme læringskurve som i figur 9, men er presentert i et dobbelt-logaritmisk diagram. Læringskurven vil i et dobbelt-logaritmisk diagram vises som en rett linje som gjør det enkelt å identifisere læringseffekten og strukturelle endringer for en teknologi eller et marked. Progresjons-raten (PR), linjen i læringskurven, uttrykker hastigheten som enhetskostnaden avtar for hver dobling av kumulativt salg, se formel (2). Om vi har en progresjonsrate på 82 %, se figur 10, betyr det at prisen vil reduseres til 0,82 av tidligere prisnivå etter en dobling av kumulativt salg (Wene 2000). Ut fra progresjonsraten kan man finne en teknologi sin læringsrate (LR), se formel (3). Læringsraten er definert som en minus progresjonsraten (Junginger & van Sark 2010). Basert på overnevnte progresjonsrate vil læringsraten være 18% ved dobling av produksjon og kan benyttes til å estimere fremtidig kostnad.

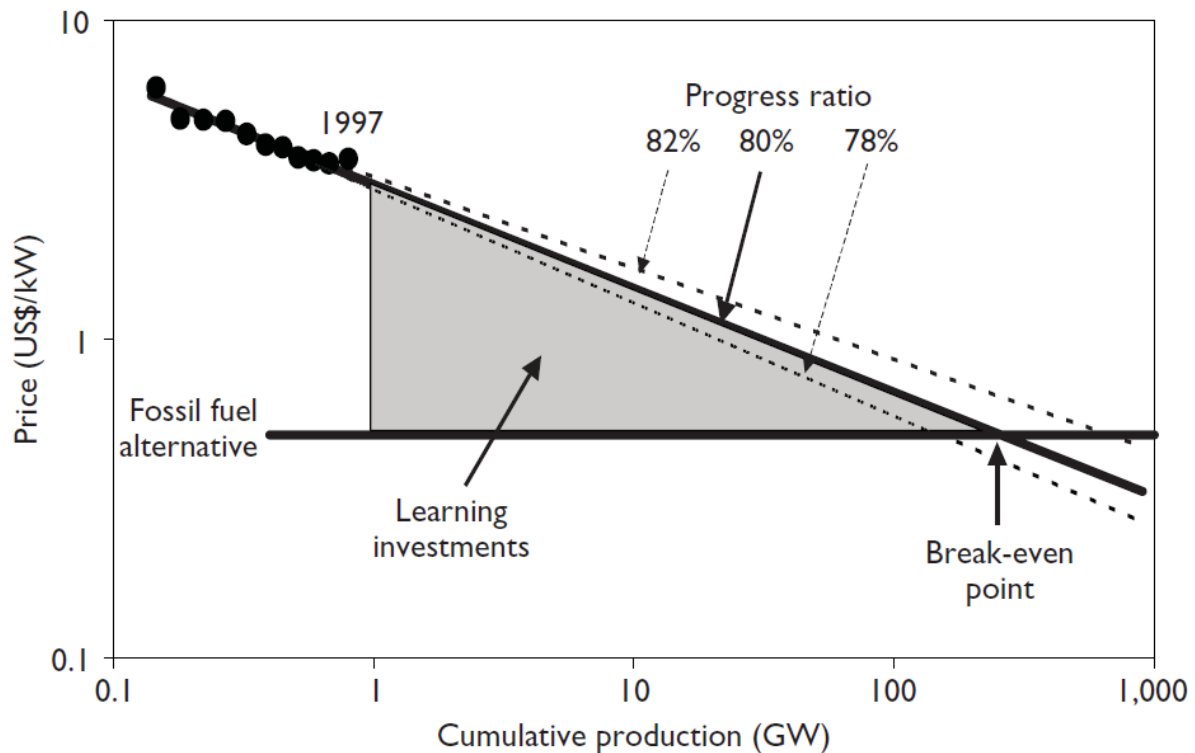
$$(2) \quad PR = \frac{C_0(X_{cum})^{-E}}{C_0(X_{cum})^{-E}}$$

$$(3) \quad LR = 1 - PR = 1 - 2^{-E}$$

3.2 Læringskostnader

Figur 11 indikerer hvordan læring ervervet gjennom kumulativ produksjon reduserer kostnaden for en teknologi, i dette tilfeller solcellemoduler. Læringskurven, figur 11, viser hvilke investeringer som må til for at teknologien skal bli konkurransedyktig, men læringskurven kan ikke forutsi når teknologien vil nå break-even. De nødvendige læringskostnadene som kreves er definert som differansen mellom den aktuelle prisen og pris ved kommersiell teknologi. Ved en break-even pris vil produksjonskostnaden for en enhet være lik enhetens markedspris og ingen tap eller profitt vil

forekomme. I figur 11 er den gjenværende læringskostnaden vist som grå området under linjen. Lærekostnadene inkluderer også kostnadene for forskning og utvikling fra aktørene i markedet, som dekker nevnte kostnadene gjennom andre markeds inntekter. Læringskostnaden i grafen vil kunne beregnes ved å integrering, se formel 4.



Figur 11 Skjæringspunkt for break-even og lærekostnader for solcellemoduler med en progresjonsrate på 80%. Det markerte området indikerer gjenværende lærekostnader for å nå break-even punktet og kunne bli kommersielt lønnsom. Viser videre endringer i punkt for break-even med en PR på 78% og 82% (Wene 2000).

$$(1) \quad \int_a^b f(x) dx$$

Ved å bare se på deler av en teknologi vil ikke resultatet være samme for hele teknologien. Det kan likevel være nyttig å undersøke delkomponenter av en teknologi for å undersøke hvilke komponenter som har størst læringseffekt og kan bidra til en størst kostnadsreduksjon. Det er imidlertid ikke mulig å summere læringseffektene fra de forskjellige delkomponentene.

4. Metode

Dette kapitlet vil redegjøre for valgt metode for å kartlegge læringskostnader Norge må subsidiere med, kostnader ved bærekraft og om det er et marked salg av biprodukt knyttet til produksjon av Jet A-1 fra lignocellulose. Denne oppgaven er basert på kvantitativ metode. Det er i tillegg hentet inn relevant forskning, data og andre erfaringer for oppgavens problemstilling. I hovedsak offentlig tilgjengelige rapporter, artikler og annen litteratur. I tillegg er noen bransjeforeninger og produsenter for 2. generasjons biodrivstoff kontaktet. Bruk og produksjon av etanol og spesielt jet A-1 er et relativt nytt fagområdet område. Mye av litteraturen og datamaterialet har vært ufullstendig og at det har vært knyttet mye usikkerhet til data og forutsetninger, noe som har ført til visse utfordringer.

4.1 Kvantitativ metode

Det er ved beregning av læringskurver blitt benyttet kvantitative analyse som kan brukes til å undersøke kausale sammenhenger, som er en eller flere uavhengige variablers påvirkning på en avhengig variabel (Dahlum 2014). I denne oppgaven vil jeg på bakgrunn av det teoretiske grunnlaget av innhentet data finne ut hvordan en økt produsert mengde bioetanol vil påvirke produksjonsprisen for etanol. Ved å gjøre dette kan jeg kartlegge læringskostnadene som trengs for at produksjon 2. generasjons biodrivstoff skal bli kommersielt, for så å finne Norges andel av læringskostnadene. Beregningene vil være regresjonsanalyse ved bruk av Excel 2013. Teorien bak beregningene er en regresjonsanalyse. En regresjonsanalyse er en statistisk metode for å finne en modell basert på forholdene mellom et eller flere uavhengige variabler. Ved utførelsen av denne typen analyse vil man få en lineær regresjonslinje som beskriver hvordan den avhengige variabelen (Y) vil forandres ved en endring i de uavhengige variablene. Ved denne metoden vil jeg kunne tilpasse regresjonslinjen for å estimere fremtidige verdier.

4.2 Databehandling

Læringsrater skal ifølge Grübler et al. (1999) beregnes ut fra historisk data. For denne oppgaven vil læringsraten være beregnet ut fra forventede fremtidige kostnads beregninger fra noen få rapporter. Usikkerheten til beregningene er dermed stor. Første steg i oppgavens resultat er å estimere læringskostnader for global produksjon av Jet A-1 for å nå break-even som i oppgaven ligger ved dagens pris for fossilt Jet-drivstoff. I andre steg vil det estimeres hvor stor andel av de globale læringskostnadene Norge bør bidra med basert på årlig forbruk av flydrivstoff. Læringskostnadene er utarbeidet ved bruk av produksjonskostnadene (kroner/liter) målt opp mot kumulativ produksjonsmengde (liter). Læringskostnadene, som nevnt tidligere, er differansen mellom faktisk kostnad for Jet A-1 og kostnaden for fossilt Jet-drivstoff. Break-even er satt til å være dagens markedspris for Jet drivstoff på 4,2 kr/liter hentet fra Deane et al. (2015). Det er grunnet manglende

data blitt benyttet alternativ beregning for å beregne læringsraten. Killingland et al. (2013) sin læringsrate er basert på antagelser og forklart bakgrunnen for valgte antagelser. Dermed stiller jeg meg kritisk til deres læringskurve for Jet A-1

Estimerte læringskostnader ved global produksjon

For å kunne beregne de globale læringskostnadene må læringsparametere E beregnes, se vedlegg 1.

Ved en læringsrate på 20% vil progresjonsraten være 0,8. Ved omgjøring av formel 3 ble

læringsparametere E beregnet til å være 0,322. Lagt til grunn for dannelsen av grafen ble estimerte produksjonskostnader, i 1012 kroner, fra Killingland et al. (2013) lagt inn som startpunkt i linjen. For å kunne danne en trendlinje i grafen, var jeg nødt til å beregne hva den kumulative produksjonen ville være ved en produksjonspris lik markedsprisen for Jet drivstoff i dag, se vedlegg 1. Ved break-even for Jet A1 er kumulativ produksjon beregnet til 8693 millioner liter ved en læringsrate på 20%

Deretter de to forklarte punktene puttes inn i en graf i Excel, se tabell 6 og trakk en trendlinje mellom disse to punktene. Samme fremgangsmåte ble brukt for dannelsen av graf med en læringsrate på 6%.

Deretter ble den globale lærekostnaden beregnet ved integralberegning.

Tabell 6 Tall lagt inn for dannelsen av graf ved læringsrate på 20 %

Kumulativ produksjon (Liter)	Prod. Kostnad (Kr/liter)
27	27
54	-
108	-
8693	4,2

Læringskurven med en læringsrate på 6% vil i oppgaven vil ikke vise hele kurven fra start til break-even. For sammenligning av en læringsrate for 6 og 20% vil starten av hver kurve vises i en skala for kumulativ produksjon på mellom 0-2000. Siden det i grafen bare var oppgitt start og sluttpunkt, var jeg nødt til å beregne produksjonskostnaden for hver dobling basert på Killingland et al. (2013) sin produksjonskostnad. Denne er, som tidligere nevnt, på 27 kr/l ved en produksjon på 27 millioner liter Jet A-1 drivstoff, se vedlegg 1.

Estimerte læringskostnader for Norge

For å estimere hvor stor andel av de globale læringskostnadene Norge burde bidra med ble mengde globalt Jet-drivstoff kartlagt. USEIA (2010) viser statistikk, for år 2010, på mengde produsert jet-drivstoff, i fat, per dag. Mengden ble omregnet til årlig produksjon og deretter kjørt gjennom IEA sin enhetskonvertering for omregning til liter (IEA 2015). Killingland et al. (2013) refererer til et testprogram hos Lufthansa som viser at energitettheten for Jet A-1 er 1-2% høyere enn for fossilt jet

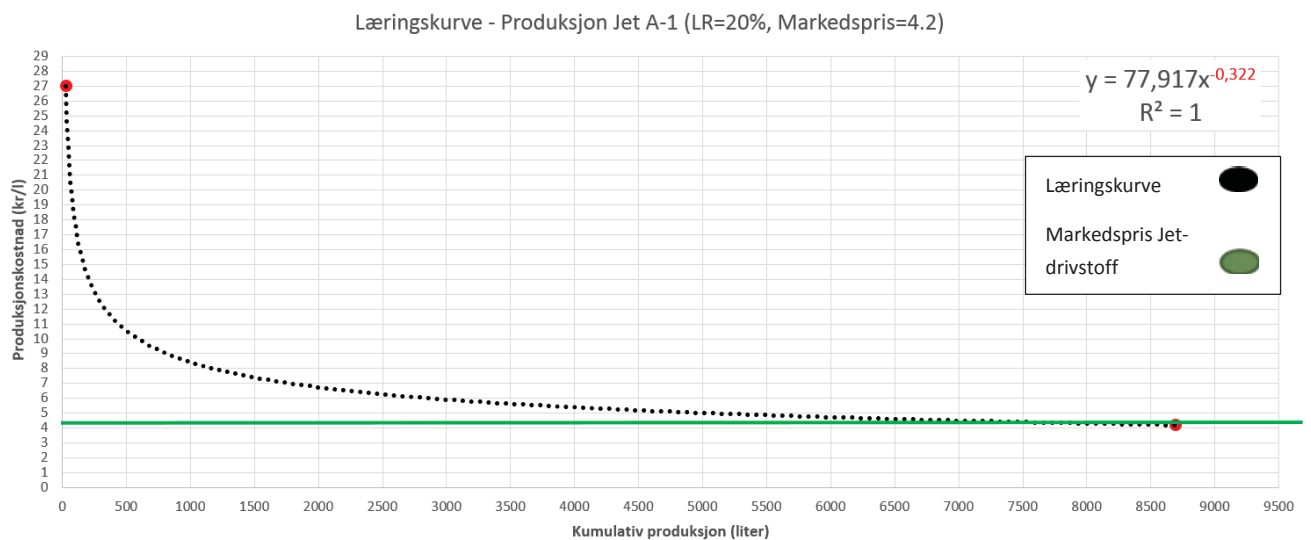
drivstoff. Det er i denne oppgaven antatt at energitettheten for Jet A-1 er lik energitettheten for fossilt Jet a-1, da det ikke er funnet ytterligere dokumentasjon for denne testen. Wiig et al. (2009) viser til at det norske drivstofforbruket vil utgjøre ca. 3,5% av den globale biodrivstoff produksjonen. Deretter ble det ved enkel prosentregning regnet ut hvor stor estimert andel Norge må bidra med årlig. Det ble antatt at produksjonskostnaden for Jet A-1 basert på lignocellulose skal være lik dagens markedspris i år 2030.

5. Resultat

Det vil her bli presentert hvordan produksjonskostnaden forandres ved økt kumulativ produksjon gjennom en læringskurve med en læringsrate på 6 og 20 prosent. For begge læringskurvene vil mengde kumulativ produksjon beregnes og lærekomsten beregnes for å nå dagens markedspris for Jet A-1.

5.1 Læringskurver

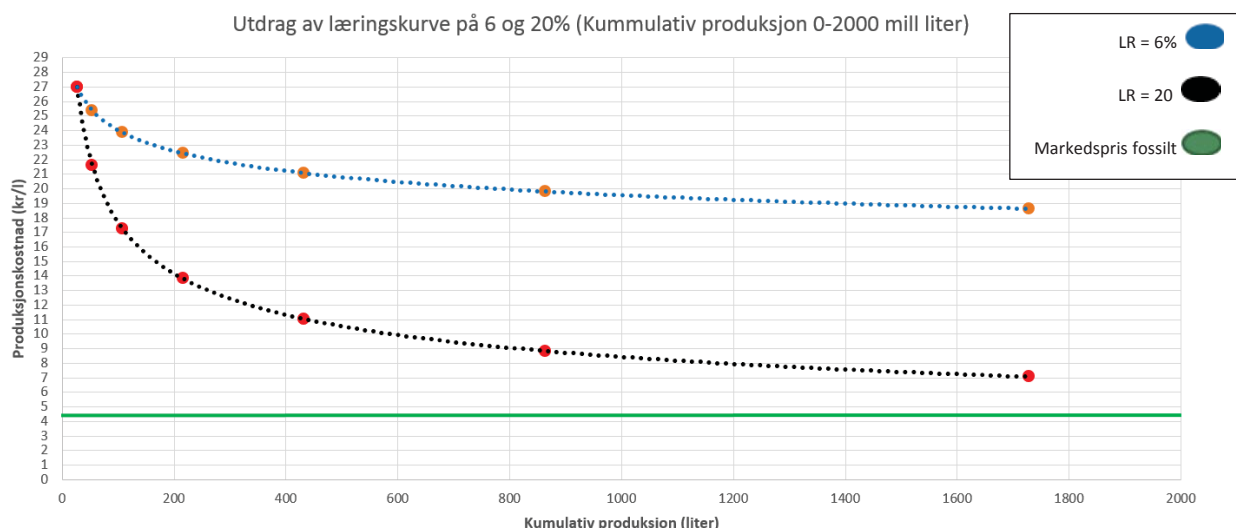
For en læringskurve av Jet A-1 på 20% ble læringsparameter beregnet til 0,322, se vedlegg 1. Ved å se på læringskurven kan vi se at kurven synker bratt i starten og flater så ut. I kurvens startpunkt ser vi at produksjonskostnaden er 27 kr/l ved en kumulativ produksjon på 27 millioner liter jet A-1, se figur 12 (Killingland et al. 2013). Ved en kumulativ produksjon på 500 millioner liter vil produksjonskostnaden være redusert med ca. 16,5 kroner og være på ca. 10,5kr/l. Produksjonskostnaden reduseres videre fra kumulativ produksjon til den når Break-even kostnaden, men ved en mindre redusert produksjonspris ved dobling av kumulativ produksjon. Formelen for læringskurven ble beregnet i Excel og er $Y = 77,917x^{-0,322}$. Ved bruk av formelen ble Break-even kostnaden beregnet til å være ved en kumulativ produksjon på 8693 millioner liter jet A-1, se vedlegg 1. I figur 12 vil break-even kostnaden det punktet hvor læringskurven, den sorte linjen, krysser linjen for markedsprisen av Jet drivstoff vist som den grønne linjen. For å beregne hvilke globale lærekomsten som trengs for å nå dette målet, må arealet mellom læringskurven og markedsprisen bregnes.



Figur 12 Læringskurven for Jet A-1 ved en læringsrate på 20% (sort linje) og en markedspris på 4,2kr/l. Formelen for lærekurven vises øverst til høyre, hvorav læringsparametere er markert i rødt.

For å tydelig vise forskjellen ved en læringsrate på 6 eller 20% er disse i figur 12 satt sammen i samme graf. Om vi sammenligner produksjonsprisen ved dobling i kumulativ produksjon ser vi store forskjeller. Vi ser at læringskurven med en læringsrate på 20%, sort linje, har en mye større kostnadereduksjon per dobling i kumulativ produksjon enn ved en kurve på 6%, blå linje, læringsrate.

Hvert punkt i grafe etter første fellespunkt representerer en dobling fra foregående punk. Første dobling tilsvarer en kumulativ produksjon på 54 millioner liter. Ved en kumulativ produksjon på 54 millioner liter ser vi at produksjonskostnaden for kurven med LR=6% er 25,38kr/l, mens produksjonskostnaden for kurven med en LR=20 er 21,6 kr/l. En femdobling av kumulativ produksjon, i forhold til startpunktet på 27 millioner liter, ligger på 864 millioner liter. Ved en kumulativ produksjon på 864 millioner liter vil produksjonskostnden ved en LR=6% være 19,08kr/liter og for en LR=20 være nede i 8,84kr/l.



Figur 13 Utdrag av oppgavens to Jet A-1 læringskurver med en læringsrate på 6 og 20%. Den blå linjen representerer en læringsrate på 6% og den sorte representerer en læringsrate på 20%. I tillegg vises dagens markedspris på fossil Jet drivstoff som grønn linje.

For læringskurven med en læringsrate på 6% ble læringsparametere E beregnet til å være 0,089, se figur 13. Formelen for læringskurven ble beregnet i Excel og er $Y = 26,239x^{-0,322}$. Ved bruk av formelen ble Break-even kostnaden beregnet til å være ved en kumulativ produksjon på 33000 millioner liter jet A-1, se vedlegg 1.

De totale globale læringskostnadene for læringskurven med en læringsrate på 20% ble beregnet til ca. 949 milliarder kroner. Ved en læringsrate på 6% vil de globale læringskostnadene ligge på ca. 62925 milliarder kroner, se vedlegg 1.

Estimerte læringskostnader for Norge

Årlig global produksjon av jet-drivstoff er beregnet til ca. 301 milliarder liter. Om en læringsarete på 20% vil Jet A-1 nå en kommersiell produksjon ved en kumulativ produksjon lik 8693 millioner liter og læringskostnaden lik 962 milliarder kroner. Med utgangspunkt i at Norge skal bidra med 3,5% av de totale ble læringskostnadene, vil Norges læreandel beregnet til ca. 34 milliarder kroner, se vedlegg 2. For en læringsrate på 6% var kumulativ produksjon for å nå en markedspris lik 4,2 kr/liter på 33000 millioner liter og global læringskostnad ble beregnet til 62925 milliarder kroner. Norges andel av læringskostnadene er beregnet til ca. 2202 milliarder kroner.

6. Diskusjon

6.1 Oppgavens resultat

Estimerte læringskostnader ved global produksjon

Det forventes ingen endring i investerings- og andre kostnader. Dermed vil kostnadsreduksjonene ved kumulativ produksjon i læringskurven skyldes to faktorer. Reduksjon i markedspris for etanol og/eller reduksjon i behovet av etanol for å produsere Jet A-1 drivstoff. Det har ikke vært mulig å kalkulere hvor stor andel av kostnadsreduksjonene som kommer av hvilken faktor. Om vi tar utgangspunkt i læringskurven med en læringsrate på 20% er forholdet mellom behov og pris klart. For å kunne produsere 27 millioner liter Jet A-1 med et etanolbehov på 4 liter etanol for 1 liter Jet A-1 trengs det $4 \cdot 27 = 108$ millioner liter etanol. Forutsatt en markedspris for etanol på 6 kr/liter. Om vi beregner produksjonskostnaden ved en markedspris for etanol på 5 kr/liter vil dagens produksjonskostnad for Jet A-1 være 23 kr/l basert på Killingland et al. (2013) sine estimat. I læringskurven ser vi at produksjonskostnaden ved en kumulativ produksjon på 500 millioner liter vil være på ca. 10,5kr/liter. Om kostnadsreduksjonen alene skulle skyldes reduksjon i prisen av etanol, ville markedsprisen for etanol ligge på ca. 1,9 kroner per liter. Om motsatt, prisen for etanol forblir på 6 kr/liter, ville etanolbehovet for produksjon av 1 liter Jet vært redusert til 1,5 liter etanol. Begge disse alternativene virker urealistiske og en kombinasjon av disse vil være nødvendig for å nå en produksjonskostnad på ca. 10,5 kr/l ved en kumulativ produksjon på 500 millioner liter Jet A-1.

Dagens markedspris for etanol ligger på 5 kr/liter og skiller ikke om etanolen er produsert av stivelse, sukker eller lignocellulose. En svakhet med oppgavens læringskurve er at den ikke viser hvordan 1. generasjons etanol vil påvirke læringskurven. I oppgaven er har Break-even blitt satt til å ligge på 4,2 kr/l og det er ikke medberegnet en eventuell reduksjon i markedsprisen for fossilt Jet drivstoff.

Læringskurvene i resultatet viser hvordan læring gir økt effektivitet for produksjonsprosessen til Jet A-1, og det er beregnet læringskostnadene som trengs for å nå break-even. Salg av bi-produkter har en innvirkning på et anleggs økonomi og kan være med på å redusere anleggets egne produksjonskostnader. Galbe et al. (2007) kom frem til at salg av biprodukter vil kunne redusere et anleggs produksjonskostnader med ca. 9%. Økte inntekter ved salg av bi-produkter vil likevel ikke påvirke læringsprosessen for produksjon av Jet A-1. Læringsprosessen vil imidlertid kunne påvirke inntekter ved salg av biprodukter. Ved en økt læring vil for eksempel mengde biprodukter ved produksjon av etanol kunne reduseres gjennom bedret utnyttelse av råstoffet som gir økt utbytte av etanol. Et eksempel er Borregaard som i dag finner stor lønnsomhet i å optimalisere produksjon basert på hvilke sluttprodukt som gir mest lønnsomhet. Ved økt læring i produksjon av etanol vil Borregaard

finne mer lønnsomhet i å optimalisere produksjonen for etanol. De vil imidlertid ikke redusere inntektsnivået fra andre bi-produkt før produksjon av etanol gir bedre lønnsomhet gjennom læring.

IPCC (2011) angir læringsrater på ca. 20-30% for produksjonskostnader for etanolproduksjon fra sukkerrør og mais i henholdsvis Brasil og USA i tidsperioden 1980-1990 og raten er noe høyere frem til 2005. Ut fra figur 8, under tydeligere studier, ser vi at læringsraten for etanol fra sukkerrør i tidsperioden 1975-2005 ligger på ca. 22%. McDonald og Schrattenholzer (2001) undersøkte læringsrater for en rekke energisystem og kom frem til at middelverdien av læringsratene lå rundt 16-17% ved en bred fordeling. IPCC (2011) og McDonald og Schrattenholzer (2001) gir indikasjoner på mulige læringsrater for Jet A-1. Læringskurven og beregningene ved en læringsrate på 20 % virker mer realistiske sett opp mot overnevnte læringsrater. Det kunne i oppgaven vært laget en læringskurve med læringsrate knyttet opp mot utviklingen av etanol basert på sukkerrør for å finne den mest realistiske kumulative produksjonen. Dette fordi læringskurven for Jet A-1 vil være relativt lik læringskurven for produksjonskostnaden til etanol.

Læringskurvene som er beregnet er basert på en estimert produksjonskostnad for et norsk anlegg og en global markedspris for Jet-drivstoff. Om beregningene for å komme frem til produksjonskostnadene hadde vært basert på globale gjennomsnittstall ville muligens linjen vært annerledes. Det at det ikke har vært mulighet til å få tak i dagens eller historiske produksjonskostnader gjør at læringskurven inneholder lite data. Dette øker usikkerheten ved kurven.

Estimerte læringskostnader for Norge

Resultatet for Norges andel av de globale læringskostnadene for å få Jet A-1 drivstoff basert på cellulose ned på et kommersielt nivå er beregnet. Det er imidlertid ikke vurdert om Norge som i dag har spisskompetanse ved produksjon av etanol i hvilken grad Norge skal være et foregangsland for å redusere kostnadene ved Jet A-1. Om Norge bidrar i med mer i starten vil Norge bidra til større kostnadsreduksjoner enn ved å vente til med å bidra. Et problem med nye teknologier som produksjonsprosessen for AtJ er at land ofte ikke vil bidra med subsidier i starten, men håpe på at noen andre land vil bidra for å redusere produksjonskostnadene for teknologien. Ved å beregne årlige subsidier for læring av denne teknologien ville man kunne testet effekten ved at Norge dekket en større andel læringskostnader i starten kontra i slutte av læringskurven.

Ved en endring oppgavens markedspris på 4,2, vil levekostnaden for teknologien endres. Om markedsprisen reduseres i fremtiden, vil lærekostnadene øke og reduseres ved en økning i markedspris.

6.2 Potensielle kostnadsreduksjoner

Det ble i kapittel 2.4.1 nevnt at det fra produsentens side at det foreligger størst potensial ved å kunne redusere behovet for enzymer/syre og øke prosessdyktigheten ved enzym-/styrebehandling. Innkjøpsprisen for enzym og syrer vil variere fra type til type og ligger i kostnadsintervallet \$0,10-0,40/gal (Klein-Marcuschamer et al. 2012).

Eggert et al. (2011) påpeker at det er gjort betydelige fremskritt i kostnader for enzym, men at ytterligere kostnadsreduksjoner trengs. Vider påpekes det at et viktig potensial for kostnadsreduksjoner ligger i å implementere resirkuleringssløyfer av enzymer. Weyland oppgir at de kan produsere til lave kostnader om kostnaden på lignocellulose biomassen er lav. Hovedgrunnen til at de kan produsere etanol til en lav pris ligger i at de resirkulerer syrene som brukes under hydrolysesteget av lignocellulose biomassen. Den største utfordringen ved resirkulering av enzymer ligger i kontaminering. Kontaminasjon vil si en forurensning av enzymene ved at de reagerer med andre stoffkomponenter i biomassen og egenskapene vil forandres. Ved resirkulering vil det skilles ut det substratet som kan brukes igjen. Resirkulering av enzymer er avhengig av at basisprosessene for etanol produksjoner på plass og utbedret, se figur 3. Dette er ikke tilfellet for Borregaard. De utelukker ikke muligheten for resirkulering, men har i dag ikke begynt å resirkulere og forventer ikke at dette skjer de nærmeste årene (Rødstrud 2015).

Ved at produsenter av enzymer i dag klarer å produsere mer robuste, effektive enzymer til en lavere kostnad kunne påvirke produksjonskostnadene for etanol. Potensialet for store kostnadsreduksjoner i etanolproduksjon hos produsenter ligger i å utbedre sin utnyttelse av enzymer og viktige biprodukt som lignin (Galbe 2007).

6.3 Kostnader ved bærekraft

For et bioraffineri kommer opp i en viss størrelse vil en økning i produksjonskapasitet ikke nødvendigvis få reduserte produksjonskostnader. Grunnen er at prisen på biomassen, spesielt trevirke, er høy og at transportkostnaden vil øke ved økt avstand. Når et anlegg øker i størrelse vil avstanden mellom anlegget og biomassen øke og dermed øker transportkostnaden knyttet til biomassen (Rødstrud 2015). Bergseng et al. (2012) sine beregninger bekrefter at kostnadene for biomasse øker ved avstand til leveringsanlegg. Kravet til bærekraftig biomasse vil i tillegg bidra til økte transportkostnader i områder, ved at potensiell biomasse ikke kan tas i bruk. Ved krav om bærekraftig biomasse vil for eksempel 30 % av tilgjengelig biomasse i lokalområdet ikke kunne benyttes til produksjon av etanol. Dermed vil kostnaden for resterende 30% biomasse som trengs

øke når biomassen må hentes utenfor lokalområdet. Transportkostnaden vil kunne utgjøre hele 25% av biomassekostnadene for de største anleggene som skal kunne produsere etanol til konkurransedyktige priser (PFI et al. 2007)

6.4 Bi-produkter og marked

McAloon et al. (2000) påpeker at biprodukter kan ha en betydelig innvirkning på et anleggs økonomiske levedyktighet som skal etanol til en konkurranse dyktig pris. Et sikkert marked for salg av nåværende og potensielle biprodukter er dermed et viktig aspekt ved langvarig kommersiell levedyktighet for etanol produksjon. Salg av høyverdige bi-produkt i et mindre marked vil for de første etanolprodusentene kunne gi drahjelp. Ved flere og større produsenter må imidlertid markedet etterspørre mer for at det skal ligge lønnsomhet i salg av biprodukt (McAloon et al. 2000).

Borregaard produserer i dag større mengder vanillin og andre spesialprodukter fra lignin. Det påpekes at det er lite trolig at nye produksjonsanlegg vil kunne komme inn på eksisterende markeder for bi-produkt. Hovedgrunnen er at markedet ikke er stort nok. «Flaskehalsen» ligger i etterspørselen av biprodukter og Borregaard venter på å kunne tilføre markedet mer, om økt etterspørsel. Med mindre et nytt anlegg kan produsere bi-produkter til en lavere kostnad enn Borregaard eller eventuelt et nytt biprodukt med et nytt salgsmarked er det lite trolig at nye anlegg kan forvente stor lønnsomhet ved salg av biprodukter (Johansen 2015).

6.5 Videre arbeid

Denne oppgavens hovedfokus har vært å kartlegge hvilken effekt en læringsrate på 6 og 20% vil ha for mengde kumulativ produksjon som trengs for å nå en konkurransedyktig pris. Grunnleggende data knyttet til statistikk for historiske produksjonskostnader og hvilke produksjon som er knyttet til produksjonskostnaden er ikke å oppdrive. Ved videre arbeid vil det være viktig å innhente all ny data som kan bidra til å redusere usikkerheten knyttet til oppgaven. Videre vil en kartlegging av kjemiske begrensninger knyttet til produksjonsprosessen for etanol og for AtJ prosessen være viktig.

7. Konklusjon

Hovedformålet med oppgaven har vært å kartlegge komme frem til hvor store læringskostnader Norge vil måtte subsidiere for å fremme en bærekraftig og lønnsom produksjon av 2. generasjons biodrivstoff i Norge. Dette for produksjonsprosessen Alcohol to Jet (AtJ).

Det er forventet større kostnadsreduksjoner knyttet til produksjonsprosessen for AtJ. De store kostnadsreduksjonene ligger for det første i effektivisering av alle produksjonstrinn for å redusere etanolbehovet som går inn i prosessen for produksjon av Jet A-1. Det ligger også store potensielle kostnadsreduksjoner knyttet til reduksjon i innkjøpspris av etanol. De største kostnadsreduksjonene for produksjon av etanol er kostnadene knyttet til levert biomasse på anlegg og i produksjonstrinnet hydrolyse. Oppgaven har ikke tatt for seg kostnader knyttet til levert biomassen. For reduksjon av kostnader ved hydrolyse kan det konkluderes med at enzymer og eventuelle syrer som er barrieren. Enzymer og syrer er dyre å produsere og det er stor satsning på å redusert kostnaden. Det jobbes videre med å effektivisere enzymer for å kunne øke utbyttet. En kombinasjon av kostnadsreduksjoner knyttet til etanolproduksjon og redusert etanolbehov for AtJ-prosessen er essensielt. Salg av biprodukter spiller i dag en stor rolle for å kunne produsere etanol som selges ved en markedspris på 5 kr/liter. For et produksjonsanlegg for etanol vil det trolig ikke være et marked for salg av biprodukter. Dette gjør at det vil kreves statlig initiativ i form av for eksempel subsidier. Ved bærekraftig produksjon vil kostnaden for biomasse kunne stige, det er imidlertid på grunn av økte transportkostnader.

Det er beregnet læringskurver for produksjon av Jet A-1 med læringsrater på 6 og 20%. Ved en læringsrate på 20% vil det være behov for en kumulativ produksjon på 8693 millioner liter Jet A-1. De globale læringskostnadene ble beregnet til 962 milliarder kroner, hvorav Norges andel på 3,5% av lærekostnadene vil utgjøre ca. 33,67 milliarder kroner. For en læringsrate på 6 % vil kumulativ produksjon ved kommersiell skala ligge på 33 000 millioner liter. Beregnet global lærekostnad vil da være på ca. 62 925 milliarder kroner og Norges andel er beregnet til 2202,375 milliarder kroner.

Litteraturliste

- Aden, A. & Foust, T. (2009). Technoeconomic analysis of the dilute sulfuric acid and enzymatic hydrolysis process for the conversion of corn stover to ethanol. *Cellulose*, 16 (4): 535-545.
- Arvesen, A. & Hertwich, E. (2007). Utslipp av klimagasser fra flytrafik.
http://www.flyglarm.se/Rapport_NTNU.pdf: Report.
- Barreto, L. & Kypreos, S. (2004). Emissions trading and technology deployment in an energy-systems “bottom-up” model with technology learning. *European Journal of Operational Research*, 158 (1): 243-261.
- Berg, J. T. (2015). *Samtale Weyland*: Weyland (27.11.2015).
- Bergseng, E., Eid, T., Rørstad, P. K. & Trømborg, E. (2012). BIOENERGIRESSURSER I SKOG – KARTLEGGING AV ØKONOMISK POTENSIAL. I: Trømborg, E. (red.): Institutt for naturforvaltning.
- Dahlum, S. (2014). *Kvantitativ analyse*. https://snl.no/kvantitativ_analyse: Store Norske Leksikon (lest 27.11.2015).
- Deane, P., Shea, R. O. & Gallachóir, B. Ó. (2015). Biofuels for Aviation. I: Buchholz, D. (red.): European Commission - INSIGHT_E.
- Dutta, A., Dowe, N., Ibsen, K. N., Schell, D. J. & Aden, A. (2010). An economic comparison of different fermentation configurations to convert corn stover to ethanol using *Z. mobilis* and *Saccharomyces*. *Biotechnology progress*, 26 (1): 64-72.
- Econ, P. G. (2008). Virkemidler for andregenerasjons biodrivstoff.
<http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/2476/ta2476.pdf>: Econ - Member of the Pöyry group.
- Econ, P. G. (2010). Potensialstudie for flytende biobrensel. <http://www.transnova.no/wp-content/uploads/2011/03/Potensialstudie-for-flytende-biobrensel-i-Norge1.pdf>.
- Eggert, H., Greker, M. & Potter, E. (2011). Policies for second generation biofuels - Current status and future challenges.
https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/rapp_201124/rapp_201124.pdf.
- Galbe, M., Sassner, P., Wingren, A. & Zacchi, G. (2007). Process engineering economics of bioethanol production. I: *Biofuels*, s. 303-327: Springer.
- Galbe, M. F. (2007). Process Engineering Economics of Bioethanol Production. I, s. 304-327.
http://www.researchgate.net/profile/Matti_Siika-aho/publication/6247270_Thermostable_enzymes_in_lignocellulose_hydrolysis/links/09e41510be7f787a2d000000.pdf.

- Grübler, A., Nakićenović, N. & Victor, D. G. (1999). Dynamics of energy technologies and global change. *Energy policy*, 27 (5): 247-280.
- Hamelinck, C. N. & Faaij, A. P. (2006). Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy*, 34 (17): 3268-3283.
- Ibenholt, K. (2011). *Biodrivstoff: hva er netto klimaeffekt? -en oversikt over nyere forskning*: Vista analyse AS.
- IEA. (2011). Technology Roadmap - Biofuels for transport. I: Tanaka, N. (red.).
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Biofuels_Roadmap_WEB.pdf: International Energy Agency.
- IEA. (2015). *Unik Converter*. <http://www.iea.org/statistics/resources/unitconverter/>: International Energy Agency (lest 14,12).
- IPCC. (2011). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. I: Edenhofer, O., Madruga, R. P. & et.al., H. H. N. (red.). http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Vedlegg 7_12-13 s.
- Johansen, G. L. (2015). *Samtale 27.11.2015*: Borregaard.
- Junginger, M. & van Sark, W. (2010). *Technological learning in the energy sector: lessons for policy, industry and science*: Edward Elgar Publishing.
- Kazi, F. K., Fortman, J. A., Anex, R. P., Hsu, D. D., Aden, A., Dutta, A. & Kothandaraman, G. (2010). Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. *Fuel*, 89: S20-S28.
- Killingland, M., Aga, P. & Grinde, M. (2013). Bærekraftig biodrivstoff for luftfart. I: Aanonsen, I. & Helland, L. (red.).
- KLD. (2008). *Faktanotat om biodrivstoff (fornybardirektivet og drivstoffkvalitetsdirektivet / FQD) - A)* *Direktivene*: Klima- og miljødepartementet. Tilgjengelig fra:
<https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2007/mai/faktanotat-om-biodrivstoff-fornybardirektivet-og-drivstoffkvalitetsdirektivet--fqd/id2434344/>.
- Klein-Marcuschamer, D., Oleskowicz-Popiel, P., Simmons, B. A. & Blanch, H. W. (2010). Technoeconomic analysis of biofuels: A wiki-based platform for lignocellulosic biorefineries. *biomass and bioenergy*, 34 (12): 1914-1921.
- Klein-Marcuschamer, D., Oleskowicz-Popiel, P., Simmons, B. A. & Blanch, H. W. (2012). The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnology and Bioengineering*, 109 (4): 1083-1087.
- Liebe, L. o. H., Tale. (2010). *Bærekraftig biodrivstoff - et avgjørende klimatiltak*.

- Lynd, L. R., Laser, M. S., Bransby, D., Dale, B. E., Davison, B., Hamilton, R., Himmel, M., Keller, M., McMillan, J. D. & Sheehan, J. (2008). How biotech can transform biofuels. *Nature biotechnology*, 26 (2): 169-172.
- Marc, W. d. J., Martin and Faaij, André. (2012). Learning in dedicated wood production systems: Past trends, future outlook and implications for bioenergy.
- Martinsen, T. (2011). Technology learning in a small open economy—The systems, modelling and exploiting the learning effect. *Energy Policy*, 39 (5): 2361-2372.
- McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K. & Wooley, R. (2000). Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks. *National Renewable Energy Laboratory Report*. <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28893.pdf>: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- McDonald, A. & Schrattenholzer, L. (2001). Learning rates for energy technologies. *Energy policy*, 29 (4): 255-261.
- Nilsen, H. H. (2015). Skog22 - Rapport energi. http://www.innovasjon Norge.no/PageFiles/1219801/Skog_22_rapport_DEL1.pdf.
- PFI, P.-o. f. A., ZERO, Z. E. R. O., NoBio, N. B., TØI, T. i., Bioforsk, KanEnergi, NTNU, N. t.-n. u., SINTEF, landskap, N. i. f. s. o. & UMB, U. f. m.-o. b. (2007). *Fra biomasse til biodrivstoff - Et veikart til Norges fremtidige løsninger*.
https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/sd/vedlegg/transport/biodrivstoff_veikart.pdf: Regjeringen
- Rødsrud, g. (2015). *Samtale Borregaard*: Borregaard.
- Scheper, T., Faurie, R. & Thommel, J. (2008). *Advances in biochemical engineering/biotechnology*. Advances in Biochemical Engineering Biotechnology, b. 109.
http://www.researchgate.net/profile/Matti_Siikaho/publication/6247270_Thermostable_enzymes_in_lignocellulose_hydrolysis/links/09e41510be7f787a2d000000.pdf.
- SSB. (2015). *Utslipp av klimagasser, 2014, foreløpige tall - Norges mål og forpliktelser for klimagassutslipp*: Statistisk Sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-endelige>.
- Sunde, K., Brekke, A. & Solberg, B. (2011). Environmental impacts and costs of woody Biomass-to-Liquid (BTL) production and use—A review. *Forest Policy and Economics*, 13 (8): 591-602.

- USEIA. (2010). *World Jet Fuel Production by Year*. I: Administration, U. S. E. I. (red.).
<http://www.indexmundi.com/energy.aspx?product=jet-fuel&graph=production>: Index
Mundi (lest 14.12.).
- Wene, C.-O. (2000). *Experience Curves for Energy Technology Policy*. France, Paris.
- Wiig, H., Bernhard, P. & Bugge, L. (2009). Vurdering av biodrivstoff i transportsektoren.
http://www.vegvesen.no/_attachment/125304/binary/240431.

Vedlegg

Vedlegg 1 – Beregning av E, Break-even og læreknostnader

Læringskurve (LR = 20, Markedspris = 4.2)

a) $E = -0,322$

$$\text{Progresjonsraten} = 2^{(-0,322)} = 0,80 = 80\%$$

$$\text{Læringsraten} = 100\% - 80\% = 20\%$$

b) Break-even kostnad (markedspris for Jet-drivstoff) $y = 4,2 \text{ Kr/l}$

$$4,2 = 770917 * x^{-0,322}$$

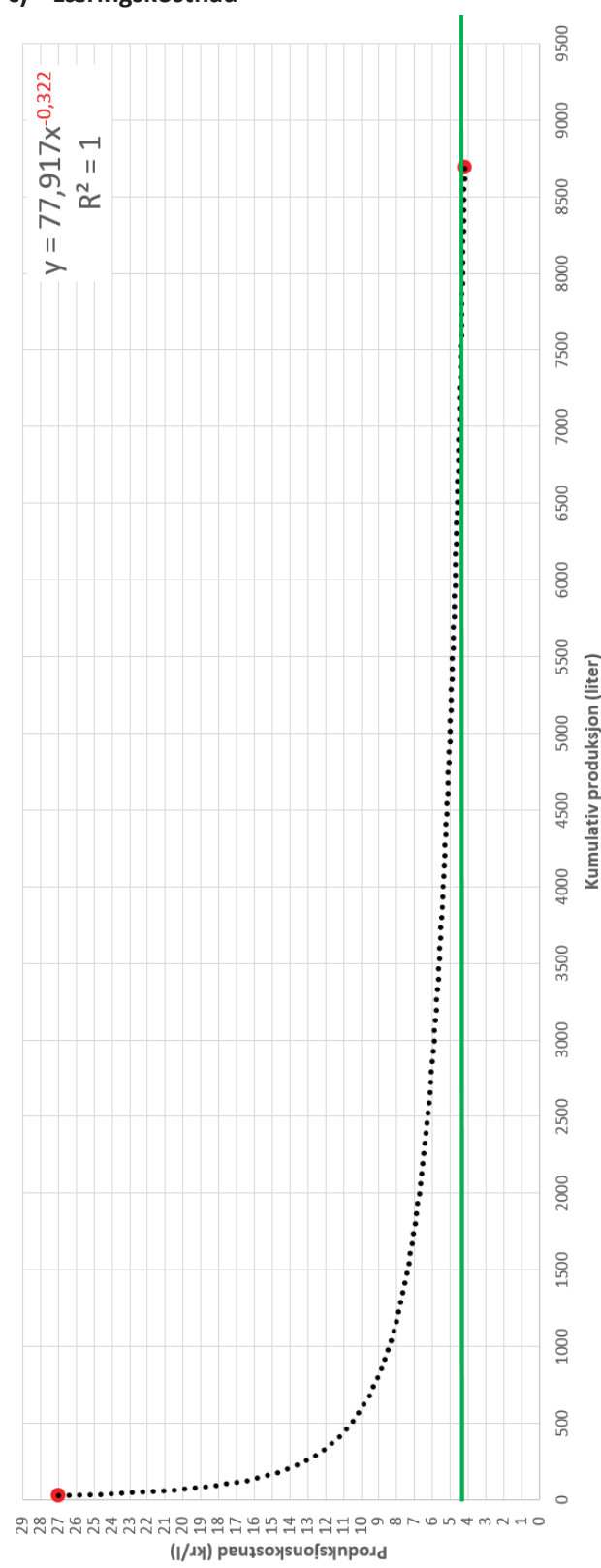
$$x^{-0,322} = 0,0539$$

$$(-0,322) \ln x = \ln 0,0539$$

$$x \approx 8693 \text{ mill. liter}$$

Den estimerte totale produksjonen vil ligge på 8693 mill. liter.

Læringskurve - Produksjon Jet A-1 (LR=20%, Markedspris=4.2)



c) Læringskostnad

$$LI = \int_{27 \cdot 10^6}^{8693 \cdot 10^6} (y_1 - y_2) dx = \int_{27 \cdot 10^6}^{8693 \cdot 10^6} (77,917 \cdot X^{-0,322} - 4,2) dx$$

$$= \frac{8693 \cdot 10^6}{27 \cdot 10^6} \left[\frac{1}{-0,322+1} 77,917 X^{-0,322+1} - 4,2x \right]$$

= 962 milliarder kroner

Læringskurve (LR = 6, Markedspris = 4.2)

a) $E = -0,089$

Progresjonsraten = $2^{(-0,089)} = 0,94 = 94\%$

Læringsraten = $100\% - 94\% = 6\%$

b) Break-even kostnad (markedspris for Jet-drivstoff) $y = 4,2 \text{ Kr/l}$

$$4,2 = 36,261 \cdot x^{-0,089}$$

$$x^{-0,089} = 0,11583$$

$$(-0,089) \ln x = \ln 0,11583$$

$$x \approx 3,3 \cdot 10^{10} \text{ liter}$$

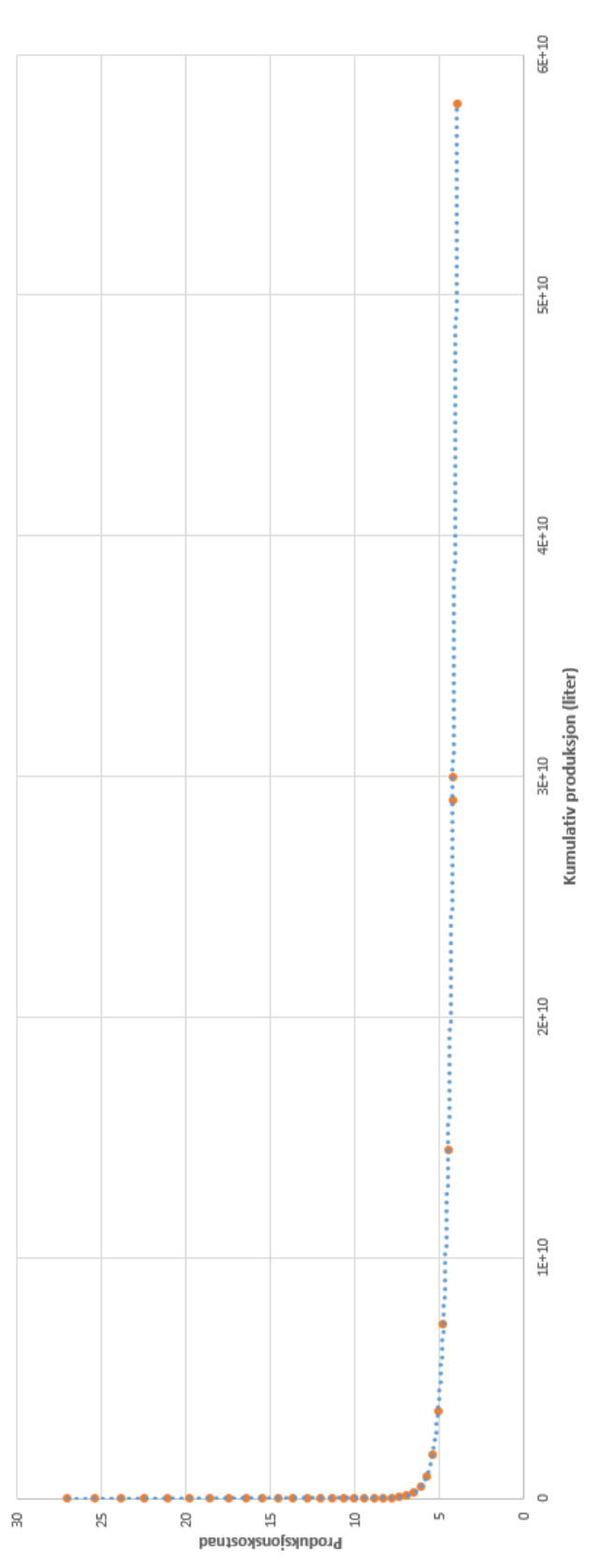
Den estimerte totale produksjonen vil ligge på 33000000000 mill. liter.

c) **Læringskostnad**

$$LI = \int_{27 \cdot 10^6}^{3,3 \cdot 10^{10}} (y_1 - y_2) dx = \int_{27 \cdot 10^6}^{3,3 \cdot 10^{10}} (36,261 \cdot X^{-0,322} - 4,2) dx$$

Læringskurve - Produksjon Jet A-1 (LR=6%, Markedspris=4.2)

$$y = 36,261x^{-0,089}$$



$$= \frac{3,3 \cdot 10^{10}}{27 \cdot 10^6} \left[\frac{1}{-0,089+1} 36,261 x^{-0,089+1} - 4,2x \right]$$

= 62 milliarder kroner

Vedlegg 2 – Beregninger av produksjonskostnad pr doubling i kumulativ produksjon

Kumulativ prod.	6 %	20 %
27	27	27
54	25,38	21,6
108	23,8572	17,28
216	22,425768	13,824
432	21,0802219	11,0592
864	19,8154086	8,84736
1728	18,6264841	7,077888
3456	17,508895	5,6623104
6912	16,4583613	4,52984832
13824	15,4708597	3,62387866
27648	14,5426081	2,89910292
55296	13,6700516	2,31928234
110592	12,8498485	1,85542587
221184	12,0788576	1,4843407
442368	11,3541261	1,18747256
884736	10,6728786	0,94997805
1769472	10,0325059	0,75998244
3538944	9,4305555	0,60798595
7077888	8,86472217	0,48638876
14155776	8,33283884	0,38911101
28311552	7,83286851	0,31128881
56623104	7,3628964	0,24903104
113246208	6,92112262	0,19922484
226492416	6,50585526	0,15937987
452984832	6,11550394	0,1275039
905969664	5,74857371	0,10200312
1811939328	5,40365928	0,08160249
3623878656	5,07943973	0,06528199
7247757312	4,77467334	0,0522256
14495514624	4,48819294	0,04178048
28991029248	4,21890137	0,03342438
30000000000	4,2	0,0267395
57982058496	3,96576728	0,0213916

Vedlegg 3 - Estimerte læringskostnader for Norge

- Årlig global produksjon av Jet-drivstoff:

$5161170 \text{ fat per dag} * 365,25 \text{ dager} = 1885117343 \text{ fat/år} \rightarrow \text{Kjørt gjennom IEA sin enhets konverterer}$
 $= 301209499000 \text{ liter/år}$

- Norges andel ved en læringsrate på 20%:

$962 \text{ milliarder kroner} * 0,035 = \underline{33,67 \text{ milliarder kroner}}$

- Norges andel ved en læringsrate på 6%:

$62\,925 \text{ milliarder kroner} * 0,035 = \underline{2202,375 \text{ milliarder kroner}}$



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no