



# De potentie van Power-to-liquid kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart

RAPPORTAGE WERKPAKKET

**InCompany** 

**Milieuadvies**

REMO SNIJDER/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

ONDERZOEK UITGEVOERD IN OPDRACHT VAN BERAAD VLEIGHINDER MOET MINDER (BVM2)  
DEN HAAG, mrt-19



TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

## Colofon

<b>Naam document</b>	NB9906-PWWP-sjabloon-IM2016nj
<b>Opdrachtgever</b>	Beraad Vliegghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, Dhr. Prof. Dr.Ir. K. (Klaas) Kopinga, Bestuurslid BVM2.
<b>Uitgave</b>	InCompany Milieuadvies, faculteit Natuurwetenschappen, Open Universiteit, Postbus 2960, 6401 DL Heerlen, NL. <a href="http://www.ou.nl/nw">www.ou.nl/nw</a>
<b>Auteur</b>	Remo Snijder
<b>Projectteam (nummer)</b>	M010, Kerosine, IM2018nj
<b>Projectcoach (docent)</b>	Wilfried Ivens, Open Universiteit Nederland – InCompany Milieuadvies
<b>Datum (laatst bijgewerkt)</b>	19-3-2019 13:06
<b>Status</b>	<input checked="" type="checkbox"/> in bewerking <input type="checkbox"/> voor review (intern: team/projectcoach; extern: opdrachtgever) <input type="checkbox"/> ter beoordeling <input type="checkbox"/> definitief
	InCompany Milieuadvies hanteert de APA 5th Style als norm voor haar wetenschappelijke rapportages.

<b>Copyright</b>	© 2019 Open Universiteit, Heerlen
	<p>De auteursrechten op dit materiaal berusten bij de Open Universiteit. Behoudens uitzonderingen door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbende(n) op het auteursrecht niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins, hetgeen ook van toepassing is op de gehele of gedeeltelijke bewerking.</p> <p>Copyright on this material is vested in the Open Universiteit. Save exceptions stated by the law no part of this publication may be reproduced in any form, by print, photoprint, microfilm or other means, included a complete or partial transcription, without the prior written permission of the publisher.</p>
<b>InCompany Milieuadvies</b>	InCompany Milieuadvies is het online milieuadviesbureau van de Open Universiteit ( <a href="http://www.ou.nl">www.ou.nl</a> ). Studenten werken in teamverband aan echte milieup opdrachten van echte opdrachtgevers. Leren en werken zijn één in deze bijzondere cursus, die de afronding vormt van de wetenschappelijke Bachelor-of-Science opleiding Milieu-natuurwetenschappen

## Projectgegevens

<b>Titel (nl)</b>	<i>Milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van verschillende typen synthetische kerosines als vliegtuigbrandstof</i>
<b>Title (in English)</b>	<b><i>Environmental, climatological, financial, infrastructural and technological impacts of the use of different types of synthetic kerosene as jet fuel</i></b>
<b>Opdrachtgevende instantie</b>	Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven,
<b>Opdrachtgever</b>	Dhr. Prof. Dr.Ir. K. (Klaas) Kopinga, Bestuurslid BVM2.
<b>Omschrijving opdracht (nl)</b>	Onderzoek naar alternatieve voortstuwingsbrandstoffen voor vliegtuigen die zich ongeveer gedragen als conventionele kerosine en eventueel mengbaar zijn zonder grote aanpassingen van motoren, en die minder milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben.
<b>Description of the order (in English)</b>	Research into alternative aircraft propulsion fuels which behave approximately similar to conventional kerosene and are possibly mixable without essential adjustments to engines, and which have less environmental impact (toxic emissions and climate).
<b>Trefwoorden</b>	Kerosine, synthetische kerosine, biobrandstoffen, hernieuwbare vliegtuigbrandstoffen, Power to Liquid brandstoffen, Gas to Liquid brandstoffen, synthetische paraffine kerosine (SPK)
<b>Key words</b>	Kerosene, synthetic kerosene, biofuels, renewable jet fuels (RJF), power-to-liquid (PTL) fuels, electrofuels, gas-to-liquid (GTL) fuels, synthetic paraffinic kerosene (SPK),
<b>Betrokkene(n) bij opdrachtgevers-organisatie</b>	Klaas Kopinga, De Speldenmaker 23, 5506CE Veldhoven, inhoudelijk begeleider, <a href="#">berichten via de mail</a>
<b>Auteur Werkpakket rapportage</b>	Remo Snijder, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, <850195831>, , wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.), Zeekant 103K, 2586JJ Den Haag, projectmedewerker
<b>Leden projectteam IM</b>	Bernard Gerard, Barbara Herbschleb, Remco Kistenmaker en Remo Snijder
<b>Projectcoach</b>	dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, Vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL
<b>Examinator</b>	dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, Vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL
<b>Referentie naar dit rapport</b>	Snijder, R. 2019. Milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van Power to Liquid synthetische kerosines als vliegtuigbrandstof. Opdracht uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder moet Minder (BVM2). Eindhoven, NL. [Environmental, climatological, financial, infrastructural and technological impacts of the use of power to liquid synthetic kerosine as jet fuel]. Unpublished student paper, Open Universiteit, Heerlen, NL.

## Inhoud

Colofon	2
Projectgegevens	3
Inhoud	4
Voorwoord	5
Samenvatting	6
Abstract	7
1. Inleiding	8
1.1. Achtergrondinformatie	8
1.2. Probleemanalyse	9
1.3. Vraagstelling	9
1.4. Doelstelling	9
1.5. Randvoorwaarden en afbakening	10
2. Methode	11
2.1. Beschrijving literatuur onderzoek	11
2.2. Wetenschappelijke literatuur	12
2.3. Grijze literatuur	12
3. Resultaten	13
3.1. Productieproces PTL - kerosine	13
3.2. Antwoorden op de onderzoeksvragen	15
3.2.1. toxische stoffen PTL	15
3.2.2. CO <sub>2</sub> emissie PTL	16
3.2.3. Kosten PTL	18
3.2.4. Gevolgen ingebruikname PTL	20
3.2.5. Ontwikkeling in tijd en hoeveelheid	22
4. Discussie en Conclusie	25
4.1. Discussie	25
4.2. Conclusies	27
5. Aanbevelingen aan BVM2	28
Literatuur	29
Bijlage A	31

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

## Voorwoord

Dit rapport bevat het verslag van een onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2). Het betreft een onderzoek naar alternatieve voortstuwingsbrandstoffen voor vliegtuigen die zich ongeveer gedragen als conventionele kerosine en eventueel mengbaar zijn zonder grote aanpassingen van motoren, en die minder milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben.

## Samenvatting

Bij ~~het~~ verbrandingsproces van fossiele brandstof worden broeikasgassen en toxische stoffen uitgestoten of gevormd die het klimaat (mondiaal) en de gezondheid van de mens (lokaal) ongunstig kunnen beïnvloeden. Overheden en bedrijfsleven maken op mondiaal, Europees en landelijk niveau afspraken om gebruik van fossiele brandstoffen terug te dringen. Ook binnen de luchtvaart zijn er afspraken gemaakt. Voor andere toepassingen van fossiele verbranding zijn wel alternatieven. Denk hierbij bijvoorbeeld aan elektrische auto's, gebruik van aardwarmte voor de glastuinbouw of gebruik van zonne-energie voor verwarmen van water om mee te douchen. De alternatieven voor vliegtuigbrandstof zijn nog beperkt. Er worden wel tests gedaan met elektrisch vliegen maar dit lijkt voor de nabije toekomst nog geen uitkomst voor de luchtvaart. Toestellen zijn hiervoor te groot en moeten in één keer te veel afstand afleggen. Een alternatief voor de vliegtuigindustrie is synthetische kerosine. Hierbij hoeven de motoren van de vliegtuigen niet direct veranderd te worden maar kan het gebruik van fossiele kerosine wel teruggedrongen worden.

Een duidelijk overzicht waarin de resultaten van de recente onderzoeken zijn verzameld over emissies van synthetische kerosine ontbreekt nog. In opdracht van Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) is dit onderzoek uitgevoerd. Hierbij wordt gekeken naar CO<sub>2</sub> over de gehele levenscyclus en toxische stoffen, de fabricage- en implementatiekosten van synthetische kerosine, landgebruik en ontwikkelmogelijkheden. Dit deelrapport richt zich alleen op Power-To-Liquid (PTL) kerosine. In het adviesrapport worden alle alternatieve synthetische kerosine (BTL en GTL en CTL) besproken.

Dit rapport richt zich op PTL. Bij PTL wordt synthetische kerosine geproduceerd op basis van hernieuwbare energiebronnen, water en koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Strikt genomen hoeft PTL niet voort te komen uit hernieuwbare energie. Uit dit onderzoek blijkt dat doordat er tijdens het productieproces veel energie verloren gaat alleen een bijdrage geleverd wordt aan de doelen voor het terugdringen van broeikasgassen en toxische stoffen als er gebruikt wordt gemaakt van hernieuwbare bronnen (wind en zonne-energie). Belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat PTL kerosine schoner verbrand ~~schoner~~ dan conventioneel kerosine, hierdoor komen er minder toxische stoffen vrij wat een positieve bijdrage kan leveren aan de luchtkwaliteit rond vliegvelden.

Voor PTL via de FT route is voorlopig bijmengen van 50% met conventioneel kerosine noodzakelijk, dit wel in verband met de benodigde aromatische verbindingen ~~voorlopig bijmengen (50-50 bewezen goede resultaten) nodig met conventionele kerosine~~. Voor PTL via de methanol route is bijmenging niet nodig. Hier moet echter wel meer onderzoek naar worden uitgevoerd (nog geen goedkeuring van de American Society for Testing and Materials). De losse productiestappen om PTL te fabriceren zijn bewezen technieken. Productie op grote schaal is nog niet uitgevoerd. Kosten voor PTL zijn hoger dan conventionele kerosine. Momenteel 6 keer zo hoog, dit zal naar 2050 minder worden. Wel is de verwachting dat PTL duurder zal blijven dan conventionele kerosine. Door schaalvergroting en ontwikkelingen ~~kunnen~~ de kosten van PTL ongeveer met een derde zakken (in 2050). Voor de productie van PTL is relatief weinig water en grond nodig. Voor productie op grote schaal is wel een aanzienlijke hoeveelheid ruimte nodig voor de opwekking van zonne- en/of windenergie. Afhankelijk van de locatie van fabricering kan lokaal wel een watertekort ontstaan. Invloed van de productie van PTL op de voedselproductie is beperkt doordat er geen akkerland voor nodig is.

Dit alles zorgt ervoor dat PTL een volwaardig alternatief kan zijn voor conventionele kerosine. Aandachtspunten hierbij zijn dat PTL nog wel verder moet ontwikkelen en dat de prijs van PTL hoog is.

Overheden zullen de financiële randvoorwaarden moeten scheppen waarin PTL zich kan ontwikkelen tot volwaardig alternatief voor conventionele kerosine.

## Abstract

In the combustion process of fossil fuels, greenhouse gases and toxic substances are emitted that affect the climate (global) and human health (locally). For aviation, synthetic kerosene can be an alternative for conventional kerosene. At PTL synthetic kerosene is produced on the basis of renewable energy sources, water and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). An important conclusion of this research is that PTL burns kerosene cleaner than conventional kerosene, as a result of which less toxic substances are released which can make a positive contribution to the air quality around airports. The separate production steps to manufacture PTL are proven techniques. Large-scale production has not yet been carried out. Costs for PTL are higher than conventional kerosene. Currently 6 times as high. It is expected that PTL will remain more expensive than conventional kerosene. Due to economies of scale and developments, the costs of PTL can drop about a third (in 2050). Relatively little water and soil is needed for the production of PTL. For large-scale production, a considerable amount of space is required for the generation of solar and / or wind energy. Depending on the location of fabrication, a water shortage can occur locally. Influence of the production of PTL on food production is limited because no arable land is needed.

# 1. Inleiding

## 1.1. Achtergrondinformatie

Door toenemende welvaart en bevolking is de voorspelling voor de komende twee decennia dat het mondiale vliegverkeer met gemiddeld 3.5% (FAA, 2018), respectievelijk 5% per jaar (Airbus, 2018) zal toenemen.

Deze toename resulteert, naast gemak voor de mens, ook in een toename van emissies door de verbranding van meer fossiele vliegtuigbrandstof (kerosine) indien technieken en processen niet veranderen. Tijdens dit verbrandingsproces worden broeikasgassen en toxische stoffen uitgestoten of gevormd die respectievelijk het klimaat (mondiaal) en de gezondheid van de mens (lokaal) ongunstig kunnen beïnvloeden.

Vliegtuigmotoren stoten op basis van conventionele kerosine de volgende stoffen uit die, hetzij als primair product, hetzij na secundaire reacties, het klimaat beïnvloeden: (Basseur et al., 2016):

- Koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>)
- Stikstofverbindingen (NO<sub>x</sub>)
- Koolwaterstoffen (HC)
- Koolstofmonoxide (CO)
- Zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>)
- Roet/Black Carbon (BC)
- Waterdamp (H<sub>2</sub>O)

Het totaal van deze primaire stoffen en hun secundaire reactieproducten versterken het broeikas effect van de atmosfeer meer dan CO<sub>2</sub> alleen (Lee et al., 2009).

De toename van uitstoot in lagere luchtlagen door vliegverkeer zal ook een toenemend negatief effect hebben op de volksgezondheid. Volgens Yim et al. (2015) veroorzaakt de verminderde luchtkwaliteit door de extra aanwezigheid van PM<sub>2.5</sub> en ozon, ten gevolge van alle fasen van de luchtvaart, het voortijdig overlijden van ongeveer 16000 mensen per jaar op mondiaal niveau.

De momenteel gangbare vliegtuigbrandstof (conventionele kerosine) wordt vervaardigd uit ruwe olie, waarvan de voorraad eindig is. Vanwege een toekomstig tekort aan deze basisgrondstof voor kerosine zal de vliegtuigbranche op termijn dus moeten overstappen op synthetische kerosine.

Als één van de mogelijkheden om het gebruik van conventionele kerosine en de negatieve effecten daarvan te verminderen, wordt door de Luchtvaarttafel (2014) het aanpassen van de vliegtuigbrandstof genoemd.

Liu, Yan, and Chen (2013) hebben 4 vliegtuigbrandstof-productietechnologieën voor conventionele en synthetische kerosine beschreven en die als volgt gegroepeerd:

1. Raffineren (verhitten en destilleren) van conventionele ruwe olie
2. Raffineren van onconventionele olie verkregen uit o.a. oliezanden en schaalolie.
3. Fischer-Tropsch (F-T) proces: (a) produceren gas bestaande uit CO en H, (b) verwijderen ongewenste stoffen zoals CO<sub>2</sub>, (c) omzetten gas naar vloeistof van rechte koolwaterstofketens via F-T synthese (d) kraken en raffineren, op basis van verschillende grondstoffen:
  - Coal (steenkool) to Liquid (CTL)
  - Natural gas to Liquid (GTL)
  - Biomass to Liquid (BTL)

4. Andere processen met als grondstof biomassa (overige renewable jet fuel processes)

Schmidt, Batteiger, Roth, Weindorf, and Raksha (2018) voegen daar nog een 5<sup>e</sup>, recente, technologie voor synthetische kerosine aan toe:

5. Het Power-to-Liquid (PTL) proces: (a) productie van H door electrolyse van H<sub>2</sub>O met duurzame elektriciteit, (b) synthese van H met CO<sub>2</sub>/CO tot koolwaterstoffen, (c) omzetten koolwaterstoffen in gewenste eindproduct.



## 1.2. Probleemanalyse

Een duidelijk overzicht waarin de resultaten van de recente onderzoeken zijn verzameld over emissies (CO<sub>2</sub> over de gehele levenscyclus en toxische stoffen) van synthetische kerosine, de fabricage- en implementatiekosten van synthetische kerosine, de vereiste aanpassingen van vliegtuig(motor)en<sub>4</sub> en infrastructuur van vliegvelden<sub>7</sub> en de maatschappelijke gevolgen voor (agraris) landgebruik en voedselproductie (door benodigde feedstock), ontbreekt nog.

Dit deelonderzoek richt zich op PTL. PTL staat voor Power To Liquid en is een nieuw alternatief productiepad voor alternatieve brandstoffen op basis van de hernieuwbare energiebronnen, water en koolstofdioxide. Strikt genomen hoeft PTL niet voort te komen uit hernieuwbare energie; dit onderzoek zal via de deelonderzoeksvragen antwoord geven op welke feedstock bruikbaar is/zijn voor toekomstig PTL kerosine productie.

Dit deelonderzoek is onderdeel (1 van 4) van het onderzoek naar alternatieve voortstuwingsbrandstoffen voor vliegtuigen die zich ongeveer gedragen als conventionele kerosine en eventueel mengbaar zijn zonder grote aanpassingen van motoren, en die minder milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben.

## 1.3. Vraagstelling

De milieuwetenschappelijke hoofdvraag die gehanteerd wordt voor dit deel-onderzoek luidt:

***Wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van power to liquid kerosine als vliegtuigbrandstof?***

Deelvragen:

1. Wat is de energetische waarde (GJ) en massa van de emissie van toxische stoffen, door PTL kerosine, indien ingezet als vliegtuigbrandstof?
2. Wat is de energetische waarde (GJ) en massa van de emissie van CO<sub>2</sub>, door PTL kerosine over de gehele levenscyclus indien ingezet als vliegtuigbrandstof?
3. Wat zijn de fabricage- en implementatiekosten van PTL kerosine?
4. Wat zijn de gevolgen bij ingebruikname als vliegtuigbrandstof van PTL synthetische kerosine ~~voor~~<sub>4</sub>:
  - a) ~~voor~~ de vliegtuig(motor)en?
  - b) ~~voor~~ de infrastructuur van vliegvelden?
  - c) ~~voor~~ het (agraris) landgebruik?
  - d) ~~voor~~ de voedselproductie?
5. Wat is de realistisch haalbare schaal en het realistisch haalbare tijdstip van invoering van PTL kerosine als vliegtuigbrandstof?

In het adviesrapport komen conventionele kerosine en de verschillende synthetische alternatieven bij elkaar en zullen vergeleken en beoordeeld worden.

## 1.4. Doelstelling

Het Beraad Vlieg hinder Moet Minder (BVM2) zet zich in om alle negatieve effecten als gevolg van vliegverkeer rondom Vliegveld Eindhoven te verminderen door kennis hierover te vergaren en daarmee te lobbyen bij invloedrijke partijen. Het te schrijven adviesrapport heeft als doel BVM2 te ondersteunen met het gefundeerd opstellen van haalbare eisen ten aanzien van vermindering van deze negatieve effecten van het vliegverkeer.

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

Het rapport zal wetenschappelijk dienen als een review artikel met daarin een duidelijk overzicht van de mogelijkheden en effecten van het in gebruik nemen van alle nu bekende alternatieve vliegtuigbrandstoffen op het gebied van uitstoot, kosten, ~~aanpassingen~~-noodzakelijke aanpassingen op vliegtuig en vliegveld niveau en de haalbare schaal van implementatie. In het voorliggend deelonderzoek wordt deze doestelling alleen voor PTL ingevuld.

## 1.5. Randvoorwaarden en afbakening

- 1) Het onderzoek ~~blijft~~-beperkt zich tot de civiele luchtvaart.
- 2) Alleen de CO<sub>2</sub>,eq worden meegenomen in het onderzoek. De niet CO<sub>2</sub> -effecten op grote hoogte blijven buiten beschouwing.
- 3) ~~Alleen~~ Literatuur wordt alleen meegenomen vanaf ~~01~~ 1 januari 2009 (~~a~~Alleen bij eventuele kennisleemtes zal naar oudere bronnen gekeken worden-).

## 2. Methode

Dit onderzoek richt zich op het in kaart brengen van de potentie van Power-to-liquid als alternatieve brandstof voor de luchtvaart. De gekozen methode hiervoor is een systematisch literatuuronderzoek, op basis waarvan een verantwoorde keuze kan worden gemaakt voor de toekomstige invulling van de brandstofvoorziening van het vliegverkeer.

Vanwege het exploratieve karakter van de vraagstelling is gekozen voor een literatuuronderzoek als onderzoekstype. De literatuur die gebruikt wordt om de gewenste resultaten te genereren, wordt met behulp van een systematisch literatuuronderzoek geselecteerd. Deze paragraaf beschrijft de gehanteerde systematische aanpak daarvoor.

Voor de onderbouwing van de probleemanalyse, heeft BVM2 al een eerste aanzet tot een literatuur-database opgebouwd. Samen met de door leden van ons projectteam aangeleverde artikelen is hiermee de basis gelegd voor een oriënterende literatuurstudie met enkele (recente) 'key-publications' of 'review' artikelen. Voor de toetsing van de uit de probleemanalyse afgeleide deelvragen zoals geformuleerd in de vraagstelling, worden Systematic Literature Reviews (SLRs) uitgevoerd binnen de verschillende deelonderzoeken.

1. Opstellen van zoekcriteria voor de selectie van relevante studies binnen de verschillende deelonderzoeken.

Gezien de snelle ontwikkelingen op het gebied van synthetische kerosine, in verband met de toenemende urgentie ervan, wordt naar recente literatuur gezocht (maximaal 10 jaar oud), teneinde een maximale actualiteit in de onderzoeksresultaten te bewerkstelligen. Alleen bij eventuele kennisleemtes zal naar oudere bronnen gekeken worden.

2. Selectie van relevante abstracts per deelonderzoek.

De op basis van de zoekcriteria gevonden literatuur wordt vastgelegd in een database, waarna uit de abstracts en de mate van beantwoording van de afzonderlijke deelvragen de meest relevante artikelen worden geselecteerd.

3. Evaluatie op randvoorwaarden van studies/data per deelonderzoek.

Op basis van kwaliteitscriteria en nadere randvoorwaarden die na samenstelling van de databases per deelonderzoek gezamenlijk worden opgesteld, wordt een nadere selectie gemaakt van de artikelen met het oog op betrouwbaarheid van het onderzoek.

4. Analyse van de data van de geselecteerde literatuur per deelonderzoek volgens een bepaalde uniformiteit.

Door de deelonderzoeken dezelfde interne structuur te geven, zijn ze vervolgens eenvoudig in elkaar te schuiven tot een eindproduct (het adviesrapport). De hiertoe benodigde redactionele werkzaamheden worden vooraf afgesproken. Met behulp van deze gestroomlijnde data-analyses wordt vervolgens getracht de verschillende deelvragen te beantwoorden.

### 2.1. Beschrijving literatuur onderzoek

Er is gebruik gemaakt van zowel wetenschappelijke als grijze literatuur. In eerste instantie is gezocht naar wetenschappelijke literatuur. Vervolgens is dit aangevuld met grijze literatuur. Hierbij is goed gekeken naar de bron en het belang van de bron (dit geldt overigens ook voor de wetenschappelijke literatuur). De grens tussen wetenschap en opinie is niet altijd even duidelijk. Daarnaast is voor de beoordeling van grijze literatuur ook gekeken naar de gebruikte wetenschappelijke bronnen in de grijze literatuur.

## 2.2. Wetenschappelijke literatuur

Er is gezocht in de volgende wetenschappelijke databases:

- Bibliotheek Open Universiteit
- Science Direct en
- Google scholar

Met de zoektermen:—

- Power to Liquid AND fuel
- Power to liquid AND aviation
- Power to Liquefied AND kerosine

Deze zoektermen geven veel artikelen.

Om nog verder in te zoomen op de specifieke deelvragen is de term Power to Liquid gecombineerd met alle paragrafen in hoofdstuk 3 van dit deelonderzoek (b.v. Power to Liquid AND CO<sub>2</sub> of Power to Liquid AND toxische emissies).

Ook hier zijn weer heel veel artikelen naar voor gekomen. Met het zoeken op relevantie zijn de eerste 100 hits gescand op bruikbaarheid. Op het moment dat het artikel of onderzoek betrekking had op 1 van de deelvragen is het onderzoek opgenomen in de samenvattingslijst (volgt later).

## 2.3. Grijze literatuur

"Grijze" Publicaties komen uit drie typen bronnen:

- De overheden op diverse schaalniveau's
  - \* mondiaal als bijvoorbeeld de VN of het VN-orgaan ICAO
  - \* de EU
  - \* de nationale overheid, zoals de ministeries, de SER, de Klimaattafels
- Kennisinstituten op diverse schaalniveau's
  - \* mondiaal als bijvoorbeeld de IEA of Bloomberg
  - \* EU - instituten
  - \* nationale kennisinstituten als de universiteiten, CE Delft en andere particuliere onderzoeksinstituten als bijv. McKinsey
- Het bedrijfsleven, dat ook weer op diverse schaalniveau's georganiseerd is
  - \* Mondiaal (bijv. de IATA en de ACI), de ATAG, en de oliemaatschappijen
  - \* op EU-niveau
  - \* op nationaal niveau, zoals de Nederlandse luchtvaartsector en de afzonderlijke bedrijven -daarbinnen, en bijv. het Engelse Sustainable Aviation

## 3. Resultaten

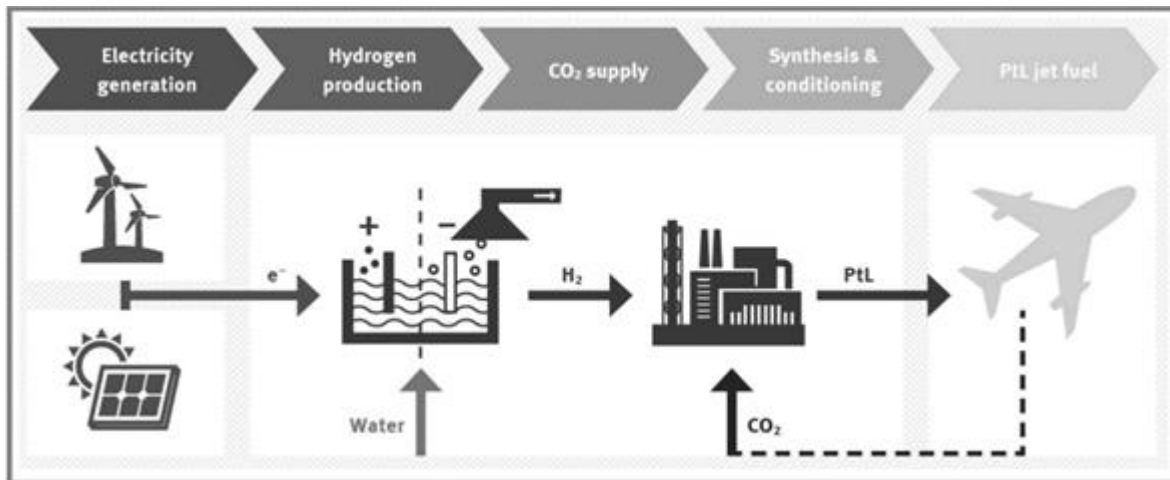
### Inleiding

De afgelopen periode is er steeds meer aandacht voor PTL. Daarbij wordt gebruik gemaakt van eerdere onderzoeken op andere synthetische kerosines (GTL, CTL, BTL) die al wat langer in de belangstelling staan. Omdat PTL via hetzelfde productieproces (FT -route en methanol-route) wordt geproduceerd, wordt voor PTL onderzoek regelmatig gebruik gemaakt van onderzoeken van andere synthetische kerosines. Vooral bij uitstoot van toxische stoffen is dit het geval. Ten opzichte van BTL, GTL en CTL is er minder onderzoek gedaan naar PTL maar momenteel vindt hier wel een inhaalslag plaats. ~~Naar~~~~Vooral~~~~over~~ hernieuwbare energie en de haalbaarheid (incl. kosten) van PTL wordt de laatste twee jaar veel onderzoek gedaan. Verder zijn er veel technische onderzoeken over nieuwe productieprocessen of over verbetering van bestaande productieprocessen. Hoewel deze laatste groep onderzoeken niet direct betrekking ~~en heeft~~~~hebben~~ op de onderzoeksvragen van voorliggend onderzoek, geeft het wel aan dat er momenteel veel ontwikkelingen zijn op het gebied van PTL.

### 3.1. Productieproces PTL - kerosine

De drie hoofdbestanddelen van PTL zijn elektriciteit, water en koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Het generieke PTL-productieproces bestaat uit de volgende stappen: Ten eerste wordt via elektrolyse waterstof geproduceerd met behulp van elektriciteit (in paragraaf 3.2.2 wordt aangegeven waarom hier wordt uitgegaan van hernieuwbare elektriciteit) en water als grondstoffen (figuur 1).

#### 3.1.1 Elektrolyse

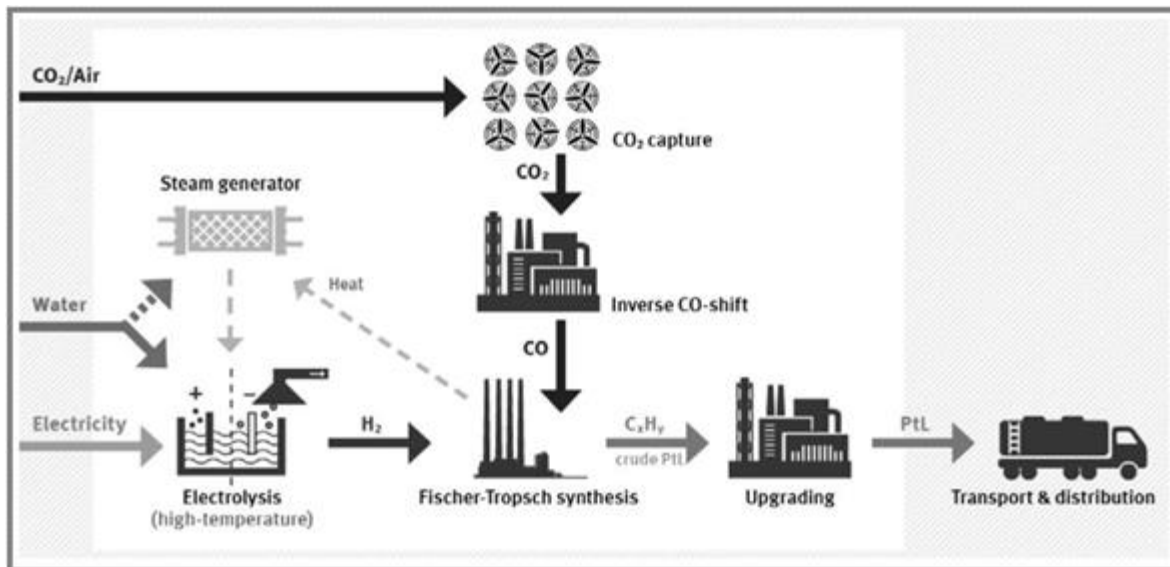


Figuur 1. Generiek PTL-productieschema (Schmidt & Weindorf, 2016).

Om vervolgens van waterstof (H<sub>2</sub>) synthetische kerosine te maken zijn er twee hoofdpaden. Deze hoofdpaden de Fischer-Tropsch (FT) -route (figuur 2) en de methanolroute (figuur 3) worden hieronder besproken voor de productie van PTL.

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

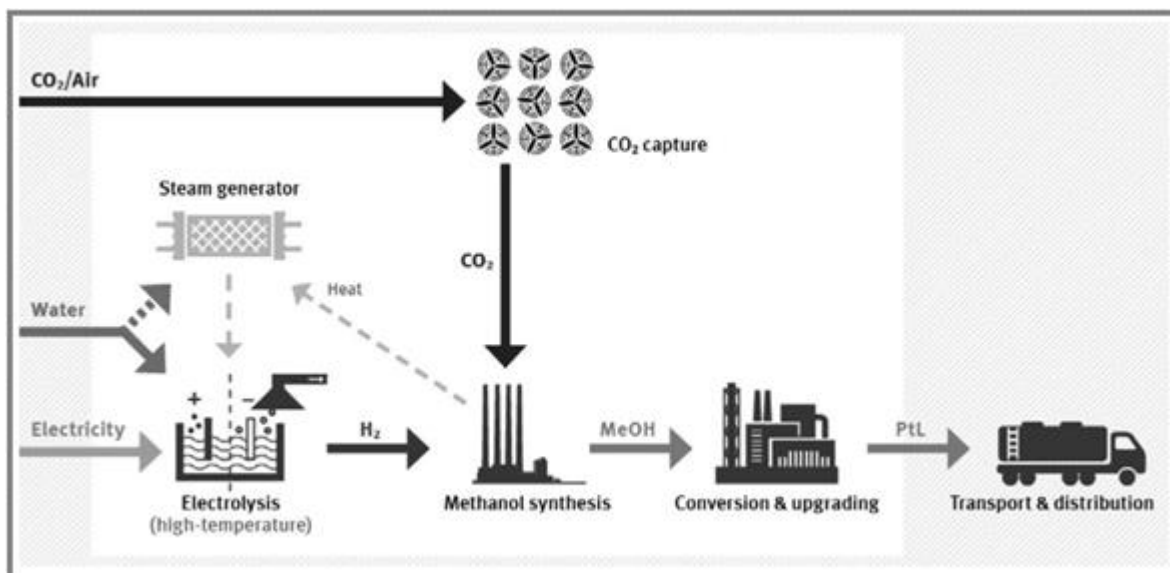
### 3.1.3 Fischer-Tropsch-route



Figuur 2. Fischer-Tropsch-route om PTL te produceren (inclusief de optie om elektrolyse bij hoge temperatuur te gebruiken)(Schmidt & Weindorf, 2016).

FT-synthese werd ontwikkeld in de jaren 1920 door Franz Fischer en Hans Tropsch met het oorspronkelijke doel om het vloeibaar maken van koolwaterstofbrandstoffen uit steenkool. Het proces wordt gevoed door synthegas (syngas), een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof (H<sub>2</sub>) en resulteert in een mengsel van verzadigde koolwaterstoffen.

### 3.1.4 Methanol route



Figuur 3. Methanol (MeOH) -route om PTL te produceren(Schmidt & Weindorf, 2016).

## 3.2. Antwoorden op de onderzoeksvragen

### 3.2.1. toxische stoffen PTL

#### **Onderzoeksvraag**

Hoeveel stoffen die aanleiding geven tot toxische emissies bevat die brandstof per kg, en tot hoeveel toxische emissies per kg brandstof leidt dat?

De toenemende luchtvaartactiviteit heeft geleid tot groeiende bezorgdheid over de gevolgen ervan voor het milieu en de volksgezondheid. Vliegtuigen produceren hetzelfde type emissies als andere voertuigen voor grondtransport, zoals koolmonoxide (CO), kooldioxide (CO<sub>2</sub>), waterdamp (H<sub>2</sub>O), stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>), onverbrande koolwaterstoffen (UHC)<sub>7</sub> en deeltjesmaterie (PM). Sommige van de stoffen die Brasseur et al. (2016) aangeeft als output hebben een broeikaswerking, soms direct en soms indirect, ook op grote hoogte. Sommige stoffen die Brasseur noemt hebben een toxisch effect dicht bij de grond (Brasseur et al., 2016).

De luchtvaartsector levert relatief weinig bijdragen aan luchtverontreinigende stoffen in vergelijking met andere sectoren. Naar schatting is deze sector goed voor 2-3% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot en minder dan 3% van de NO<sub>x</sub>-emissies voor het transport. Gezien de snelle groei, 2-5% per jaar, van de luchtvaart zullen de emissies in de toekomst waarschijnlijk een groter aandeel van de transportbronnen vertegenwoordigen (Kieckhäfer et al., 2018). Er is ook aangetoond dat emissies op grote hoogte in de buurt van of in de stratosfeer<sub>7</sub> waar vliegtuigen vaak vliegen, aanzienlijk meer impact op de klimaatverandering kunnen hebben in vergelijking met de emissies op de grond (Penner, Lister, Griggs, Dokken, & McFarland, 1999).

Synthetische kerosine gebaseerd op FT is goedgekeurd in de commerciële luchtvaart om voor maximaal 50% te vermengen met conventionele kerosine (American Society for Testing and Materials, 2017). Belangrijk hierbij is dat de goedkeuring niet afhankelijk is van de bronsoort (Schmidt et al., 2018). ASTM International (American Society for Testing and Materials) is een Amerikaanse standaardisatieorganisatie. ASTM publiceert technische standaarden op het gebied van materialen en diensten. Er zijn veel positieve eigenschappen verbonden aan FT-brandstoffen. Het meest opvallende voordeel is dat ze schoner branden dan conventionele kerosine in vliegtuigmotoren en produceren minder zwavel dan conventionele op kerosine gebaseerde vliegtuigbrandstoffen. Het grootste verschil in emissies met alternatieve vliegtuigbrandstoffen zit in de uitstoot van roet. Een mengsel van 100% GTL en een 50/50 GTL / Jet A-1 geven respectievelijk 83% en 65% minder rook vergeleken met de basis Jet A-1-brandstof (Zhang, Hui, Lin, & Sung, 2016). Hier gaat<sup>7</sup> het onderzoek er vanuit dat voor PTL via dezelfde FT proces vergelijkbare resultaten worden bereikt.

#### *Zwavel*

In het productieproces weergegeven in 3.1 is te zien dat er geen zwavel wordt gebruikt in [het](#) productieproces. Eerder is er al aangetoond bij o.a. BTL dat het zwavelgehalte van synthetische kerosine te verwaarlozen is (Moore et al., 2017).

#### *Aromatische verbindingen*

Volgens vele bronnen zijn aromaten nodig voor het zwelgedrag van seals in het brandstofsysteem, die anders kunnen gaan lekken (Liu et al., 2013; Zhang et al., 2016). Hierdoor is een minimaal<sup>8</sup> percentage van 8% vereist in vliegtuigbrandstof (Zschocke, Scheuermann, & Ortner, 2012). De productie van PTL kerosine via FT bevat nauwelijks of geen aromatische verbindingen. De makkelijkste oplossing hiervoor is synthetische kerosine te mengen met conventionele kerosine.

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

Bij de productie van PTL via de methanol route worden er wel aromatische verbindingen gevormd. Dit blijkt o.a. uit de demonstratie faciliteit van Mobil (Tabak, Avidan, & Krambec, 1985). De methanol gefabriceerd door Mobil bevat meer dan 8% aromatische verbindingen. Hierdoor is deze PTL geschikt voor 100% drop-in brandstof. Vermengen met conventionele kerosine is dus niet nodig. Kerosine via de methanol route is echter nog niet goedgekeurd door de ASTM (Schmidt et al., 2018). Ook in de Power-to-methanol pilot fabriek, gebouwd in 2008 in Osaka (Mitsui Chemicals Inc.), worden aromatische verbindingen geproduceerd (Andika et al., 2018).

### 3.2.2. CO<sub>2</sub> emissie PTL

#### **Onderzoeksvraag**

Wat is de energetische waarde (GJ) en massa van de emissie van CO<sub>2</sub>, door PTL over de gehele levenscyclus, indien ingezet als vliegtuigbrandstof?

Om te bepalen wat de CO<sub>2</sub> emissie is van PTL wordt gekeken naar alle levensfasen van het PTL via de levenscyclusanalyse (LCA). Belangrijkste onderdelen bij PTL zijn 1) de gebruikte CO<sub>2</sub>-bron in het productieproces 2) de oorsprong van de energie die gebruikt wordt om PTL te produceren.

#### *CO<sub>2</sub> bron*

Bij de productie van PTL is CO<sub>2</sub> nodig als grondstof. CO<sub>2</sub> voor de productie van PTL kan komen uit de atmosfeer of van afvalgasstromen van de industrie (geconcentreerde fossiele bronnen). O.a. bronnen (Bracker, 2017) en (Schmidt et al., 2018) geven aan dat koolstof van een fossiele bron van nature niet hernieuwbaar is. Daarom wordt bij de LCA uitgegaan van CO<sub>2</sub> gebruik uit de atmosfeer. Kosten om CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer te halen zijn hoger dan CO<sub>2</sub> halen uit geconcentreerde bronnen. Hoewel voor de lange termijn geconcentreerde bronnen geen optie zijn, kan dit op korter termijn ~~dit~~ worden toegepast om kosten te beperken. In 'carbonneutral aviation with current engine technology: the take-of synthetic kerosene production in the Netherlands' staat aangegeven dat Tata-Steel uit IJmuiden genoeg CO<sub>2</sub>-uitstoot om 50% van de vliegtuigen op Schiphol te voorzien van CO<sub>2</sub> die nodig is voor het PTL proces (Terwel & Kerkhoven, 2018).

#### *Energiegebruik*

De broeikasgasemissie voor PTL wordt voor het grootste deel veroorzaakt door de elektriciteit die nodig is voor de elektrolyse. In de levenscyclusliteratuur staat aangegeven dat PTL, met gebruik van hernieuwbare energie een hele lage koolstofemissie heeft. Well to Wing heeft PTL een CO<sub>2,eq</sub> emissie van 1,3 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ. Dit is 98% lager dan fossiele kerosine (Edwards et al., 2013). Essentieel hierbij is dat alle energie duurzaam wordt opgewekt. Door de energieverliezen bij het proces om PTL brandstof (diesel of kerosine) te produceren zou bij gebruik van fossiel energie de Well to Wing bijna 600 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ. Dat is ongeveer 6 keer slechter vliegtuigbrandstof geproduceerd uit ruwe olie 87 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ (Edwards et al., 2013).

Schmidt and Weindorf (2016) vinden net als Edwards et al. (2013) voor productie van PTL met duurzame energie (wind en PV) in Duitsland een vergelijkbare lage CO<sub>2,eq</sub>/MJ emissie. De constructies (incl. ontwikkeling) die de duurzame energie leveren zitten vaak niet in de LCA. Schmidt and Weindorf (2016) hebben onderzocht dat voor windenergie 10 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ moet worden toegevoegd. Voor PV (zonne-energie) is dit 27 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ.



TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

*Tabel 1. Specifieke broeikasgasemissies van PTL-brandstof in vergelijking met referentie straalmotorbrandstoffen (Schmidt et al., 2018).*

Vliegtuigbrandstof pathway	Broeikasgas uitstoot zonder landgebruik verandering [gCO <sub>2</sub> eqMJBrandstof <sup>-1</sup> ]
Ruwe olie (referentie)	87.5
PTL (wind / PV in Duitsland)	~1
PTL (wind / PV in Duitsland, incl. materiaal bron en constructie)	11 - 28

**CO<sub>2</sub>**

Bij gebruik van hernieuwbare energie (wind en zonne-energie) en CO<sub>2</sub>,eq uit de atmosfeer is de uitstoot van PTL-kerosine laag.

### 3.2.3. Kosten PTL

#### onderzoeksvraag

Wat zijn de fabricage- en implementatiekosten van PTL kerosine?

Hoewel het lage milieurisico van PTL een aanzienlijk voordeel is, zullen de productiekosten waarschijnlijk op korte termijn een significante belemmering vormen voor de ontwikkeling. Schattingen van de kosten van de productie van PTL kerosine met behulp van de huidige technologieën en elektriciteitsprijzen zijn veel hoger dan de prijs van fossiele alternatieven. De productiekosten zullen op de korte termijn waarschijnlijk 3 €/kg aan PTL kerosine en misschien hoger zijn. Dit is ten minste zes keer meer dan de huidige prijzen voor diesel en vliegtuigbrandstof en aanzienlijk hoger dan de productiekosten voor geavanceerde biobrandstofinstallaties (Maling, 2017). In de literatuur zijn wat lagere kostenramingen zie hiervoor ook tabel 2.

Tabel 2: kostenoverzicht van FT en Methanol PTL productie nu en in 2050.

Document	FT jet/diesel route (€/kg)		Methanol jet/diesel route (€/kg)		Verwijzing
	Korte termijn	Lange termijn	Korte termijn	Lange termijn	
Electrofuels for the transport sector	1.51 – 8.96 (central 2.7)	1.28 – 3.95 (central 2.1)	1.86 – 12.21 (central 3.3)	1.51 – 5.00 (central 2.5)	(Brynolf, Taljegard, Grah, & Hansson, 2017)
Carbondioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis.					(Dimitriou et al., 2015)
Small (0.5 MW) Medium (500 MW) Large (900 MW)	23.11 2.93 1.76				
Concept for the generation of synthetic fuel from CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>					(König, Baucks, Dietrich, & Wörner, 2015)
Energiebron offshore wind	3.15				
PTL potentials.. of renewable aviation fuel					(Schmidt & Weindorf, 2016)
CO <sub>2</sub> direct uit de lucht		1.84		1.72	
Renewables in transport 2050					(Schmidt, Zittel, Weindorf, & Raksha, 2016)
geïmporteerde PTL Noord Afrika		2.06 - 2.41		2.1 - 2.28	
Roadmap to decarbonising European aviation		2.1*			(Murphy et al., 2018)

\* Geen onderscheid tussen FT en Methanol

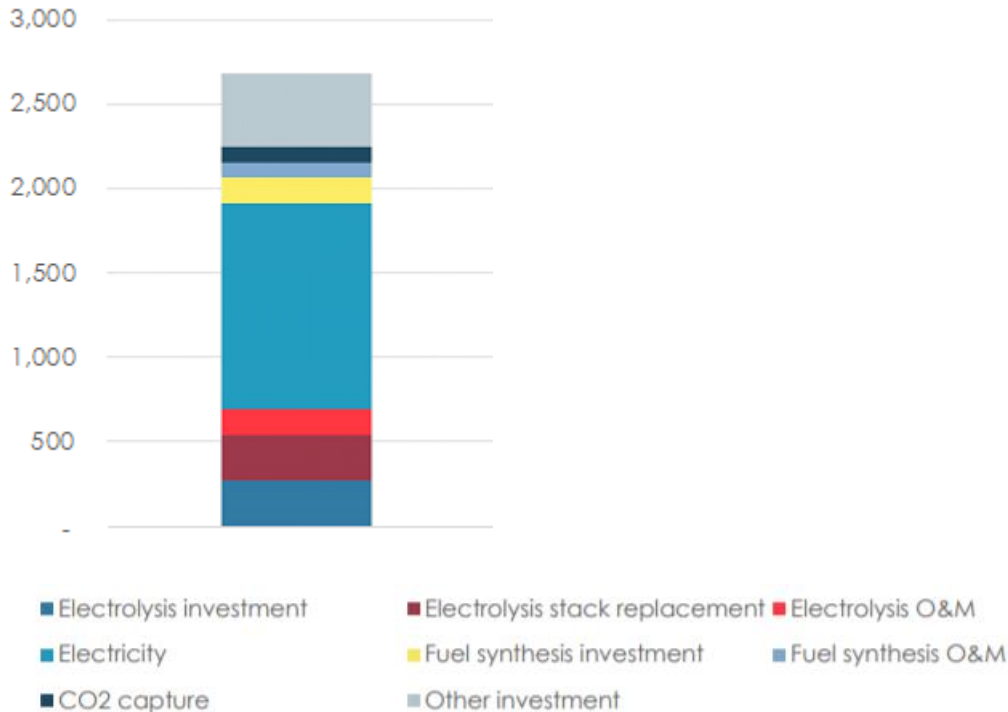
Murphy et al. (2018) gaat uit van een prijs voor PTL van 2.1 €/kg. Als dit verrekend wordt in de prijs van een vliegticket, zal het ticket 23% omhoog gaan.

De onderstaande grafiek geeft een indicatieve uitsplitsing van de kosten van de elektrofuel productie op korte termijn, genomen van (Brynolf et al., 2017). De gepresenteerde kosten voor het

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

productietraject is via de Fischer-Tropsch (FT) -synthese voor destillaatbrandstoffen (diesel en jet). Deze kostenraming is gebaseerd op een elektriciteitsprijs van 5 € cent / kWh en een rentevoet van 5%, beide waarschijnlijk te laag voor ontwikkelingen op korte termijn, dus deze aantallen kunnen worden beschouwd als een ondergrens voor haalbare prijzen. De kosten van elektriciteit zijn de dominante term in de productiekosten van electrofuel. Met 5 € cent / kWh, draagt het 1.200 € / ton elektrofuel bij voor een faciliteit met 50% conversie-efficiëntie van elektriciteit tot brandstof.

Grafiek 1: Indicatieve uitsplitsing van de kosten van de electrofuel productie op korte termijn in €/ton (Brynolf et al., 2017).



### Kosten

De kosten voor PTL-kerosine zijn op de korte termijn ongeveer 3 €/kg<sup>1</sup>. Voor de lange termijn (2050) kan dit teruglopen naar 2 €/kg<sup>2</sup>.

1 uitgaande van de volgende bronnen: Dimitriou et al. (2015) bij opwekking van 500 MW, Brynolf et al. (2017) met elektriciteit kosten van 0,05 Euro/kWh en König et al. (2015) met energielevering van offshore windturbines.

2 uitgaande van de volgende bronnen: Brynolf et al. (2017) met elektriciteit kosten van 0,05 Euro/kWh, Schmidt and Weindorf (2016) met CO<sub>2</sub> direct uit de lucht (waarom CO<sub>2</sub> uit geconcentreerde bronnen geen optie is aangegeven in paragraaf 3.2.2), Schmidt et al. (2016) met geïmporteerde PTL uit Noord Afrika.

### 3.2.4. Gevolgen ingebruikname PTL

#### Onderzoeksvraag

Wat zijn de gevolgen bij ingebruikname als vliegtuigbrandstof van PTL synthetische kerosine:

- a) voor de vliegtuig(motor)en?
- b) voor de infrastructuur van vliegvelden?
- c) voor het (agrarisch) landgebruik?
- d) voor de voedselproductie?

#### 3.2.5.a gevolgen vliegtuigmotoren

Volgens vele bronnen onder andere Liu et al. (2013) en Zhang et al. (2016) zijn aromaten nodig voor het zweelgedrag van seals in het brandstofsysteem, die anders kunnen gaan lekken. Hierdoor is een minimale percentage van 8% vereist in vliegtuigbrandstof (Zschocke et al., 2012). De productie van PTL kerosine via FT bevat nauwelijks of geen aromatische verbindingen. De makkelijkste oplossing hiervoor is synthetische kerosine te mengen met conventionele kerosine.

Bij de productie van PTL via de methanol route worden er wel aromatische verbindingen gevormd. Er zijn geen onderzoeken gevonden waarbij wordt onderzocht wat de mogelijkheden zijn om van PTL kerosine via de FT route bij te mengen met PTL via de methanol route (i.p.v. conventionele kerosine).

#### 3.2.5.b gevolgen voor de infrastructuur vliegvelden

Als de PTL kerosine bijgemengd wordt voor hij het vliegveld bereikt, zijn er geen gevolgen. Het bestaande pijpleidingensysteem voldoet. Als de PTL kerosine bijgemengd wordt op het vliegveld, zijn er extra leidingen en is er extra beheer nodig.

#### 3.2.5.c land- en watergebruik

Naast toxische uitstoot en uitstoot CO<sub>2</sub> (equivalenten) zijn er voor de productie van vloeibare energie andere middelen nodig zoals water en bodem. Dit gebruik kan invloed hebben op de voedselproductie of beschikbaarheid van drinkwater. In deze paragraaf wordt het water- en grondgebruik besproken van PTL.

#### Water

In PTL-brandstof-productie is water vooral nodig als waterstof-bron in de water elektrolyse stap, waar deze het nodig is als grondstoffen in hoeveelheden die worden bepaald door de reactie van de brandstofsynthese.

Tabel 3. Waterbehoefte voor productie van PTL. water = waterverbruik van oppervlakte- en grondwater (Schmidt et al., 2018)

Feedstock/productiepad	Water [m <sup>3</sup> GJ <sup>-1</sup> ]
PtG hydrogen (wind, PV)	0.076
PTL via FT (wind, PV, CSP <sup>a</sup> )	0.040
PTL via methanol (wind, PV, CSP <sup>a</sup> )	0.038

a) Geconcentreerde zonne-energie via zonne-thermische stoomturbine met droog koelsysteem.

De PTL-watervoetafdruk vertaalt zich in een netto waterconcessie verbruik van 170 000 m<sup>3</sup> water per jaar voor een productie van 100 ktPTLa-1. Dit is laag in vergelijking met BTL, dit is ongeveer 400 keer lager dan BTL met algen en waterrecycling. Ook al kan dit als verwaarloosbaar worden beschouwd vergeleken met de vraag naar water van de productie van biobrandstoffen, lokale

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

waterbeschikbaarheid en aanbodopties zijn relevante aspecten die meestal worden aangepakt in lokale beoordelingen op milieueffecten ~~beoordelingen~~ voor fabrieksgoedkeuring (Schmidt et al., 2018).

#### Landgebruik

De vraag naar land vertegenwoordigt een andere prestatie-indicator van ecologische en sociale relevantie. Tabel 4\* geeft de specifieke bruto gebiedsvraag aan.

Tabel 4: Gebied specifieke opbrengst en haalbare vliegafstand in verband met bruto oppervlak (Schmidt & Weindorf, 2016).

Productie pad	opbrengst <sup>a)</sup> [GJ ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	Haalbare afstand <sup>b)</sup> [km ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
PTL (fotovoltaïsche elektriciteit)	580 – 1070 <sup>c)</sup>	4950 – 9080
PTL (windelectriciteit)	470 – 1040 <sup>d)</sup>	4040 – 8860

a) Bandbreedte als gevolg van matige tot hoogproductieve productielocaties en CO2-bronnen

beschikbaar. b) Ervan uitgaande dat een Airbus A320neo met een specifieke air kilometerstand van 0,37 km kgjet-fuel-1. c) In omvat werkruimte en afstand tussen paneelrijen om (gedeeltelijke) schaduw te voorkomen. d) Het merendeel van de gebied kan nog steeds voor andere doeleinden worden gebruikt, omdat slechts ongeveer 2,6 - 3,4% van het gebied daadwerkelijk is overdekt (5500 m<sup>2</sup> voor fundering, werkruimte en toegangswegen met betrekking tot een bruto grondoppervlakte van 163 216 - 211 600 m<sup>2</sup> per windturbine).

### Gebruik bodem, water en voedselproductie

Voor de productie van PTL kerosine is relatief weinig water nodig. In landen waar water schaars is, kan PTL productie (op grote schaal) wel lokaal zorgen voor een tekort aan water. Voor de energie die nodig is voor de PTL productie is wel ruimte nodig.

#### 3.2.5.d Voedselproductie

Fabrieken ~~die om~~ PTL ~~te~~ produceren hebben weinig invloed op voedselproductie. Wel gaat dit onderzoek er vanuit dat hernieuwbare energie (wind en zonne-energie) wordt gebruikt voor de productie van PTL. Met name in het geval van windenergie kan ~~het de~~ benodigde land nog steeds voor andere doeleinden gebruikt worden. Het is ook belangrijk om te erkennen dat niet alleen de hoeveelheid landoppervlak welke vereist is voor productie moet worden beschouwd, ~~maar het is~~ ook het type land. In principe is hernieuwbare stroomgeneratie niet afhankelijk van akkerland. ~~er~~ ~~bijvoorbeeld~~ een woestijngebied ~~en~~ biedt ~~een~~ zeer geschikte omstandigheden voor fotovoltaïsche of zonne-thermische energieopwekking. Hierbij zijn de risico's van concurrentie tussen energie- en voedsel-productie sterk verminderd.

### Voedselproductie

Voor de energie die nodig is voor de PTL productie is ruimte nodig. Deze ruimte (grond) hoeft niet te concurreren met voedsel-productie.

### 3.2.5. Ontwikkeling in tijd en hoeveelheid

#### Onderzoeksvraag

Wat is de realistisch haalbare schaal en het realistisch haalbare tijdstip van invoering van PTL kerosine als vliegtuigbrandstof?

#### Stadium van ontwikkeling

Tot op heden zijn er geen volledige PTL kerosine brandstofpaden gedemonstreerd. PTL-systemen ~~z~~Zijn wel in ontwikkeling in IJsland (Chemicalstechnology, 2009), Finland (Lut-University, 2017), Duitsland veel (sunfire.de, 2017) en Noorwegen (news.bio-based.eu, 2017). Deze huidige fabrieken zijn belangrijk voor de ontwikkeling van technologieën/processtappen in de richting van industriële schaal van productiepaden.

Tabel 5: Bestaande demonstratie en pilot fabrieken voor Electro brandstof in Europa (Schmidt et al., 2018)

Faciliteit/operator naam	Land	Jaar start	Output elektro brandstof	Elektriciteit verbruik	Productie resultaat	Conversie efficiëntie	CO <sub>2</sub> bron
Audi	Duitsland	2015	H <sub>2</sub>	6,3 MW	3,5 MW	56%	Afvalwater biogas
BioCAT	Denemarken	2016	CH <sub>4</sub>	1 MW	0,56 MW	56%	Afvalwater biogas
CRI	IJsland	2012	Methanol	6 MW	10 ton/dag	-	Geothermische vloeibaar gas
MetCO <sub>2</sub>	Duitsland	Planning 2018	Methanol	1 MW	1 ton/dag	-	Powerplant vloeibaar gas

Beide PTL-routes (via Fischer-Tropsch en methanol) zijn bewezen technisch uitvoerbaar. Individuele processen op grote schaal zijn reeds geïmplementeerd. In de demonstratie fabriek Sunfire in Dresden Duitsland is ~~er~~ momenteel voor de Fischer-Tropsch route een volledige systeemintegratie voor PTL in gebruik.

In -Karlsruher heeft de Karlsruher Institut für Technologie (KIT) de eerste 200 liter synthetische brandstof geproduceerd door middel van PTL met zonne-energie en CO<sub>2</sub> uit de lucht. Deze opstelling kan ook PTL kerosine produceren (Karlsruher-Institut-für-Technologie, 2017).

Om te bepalen in welke fase de technische ontwikkeling is heeft de Europese Commissie TRL Technology Readiness Levels ontwikkeld. TRL geven de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is. Schmidt and Weindorf (2016) geven aan dat een groot aantal stappen in het productieproces een TRL hebben van 9. Er zijn ook een aantal productiestappen minder ver en die hebben een TRL van 6 (deze bevinden zich aan het eind van de ontwikkelingsfase). Stappen met een TRL van 6 zijn voor de CO<sub>2</sub> levering: absorptie/elektrodialyse en absorptie en desorptie (het weer losraken van een oppervlakte). Voor de synthese is dit de omgekeerde water gas verschuiving. De Sustainable Transport Forum sub groep voor biobrandstof (2017a) komen op een vergelijkbaar TRL van 5-6.

Lehmann (2018) van de German Environment Agency geeft aan dat voor zowel PITL via de Fischer-Tropsch-route en de methanol-route met geconcentreerde CO<sub>2</sub> bron de TRL 8 ~~à~~ 9 zijn. Verder geeft Goede (2018) aan dat de directe luchtvang van CO<sub>2</sub> momenteel wordt gecommmercialiseerd.

Ontwikkeling in stappen van het productieproces heeft hebben ook invloed op de kosten van PTL<sub>17</sub>. Waar het voorheen € 520 kosten om 1 ton CO<sub>2</sub> uit de lucht te halen, kost dit met een nieuwe proces (Het proces maakt gebruik van een luchtcontractor, pelletreactor en calcinatie voor het opvangen, zuiveren en comprimeren van CO<sub>2</sub>) ongeveer tussen de 80 en 200 euro. Het proces maakt gebruik van een luchtcontractor, pelletreactor en calcinatie voor het opvangen, zuiveren en comprimeren van CO<sub>2</sub>. (Keith, Holmes, St. Angelo, & Heidelberg, 2018).

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

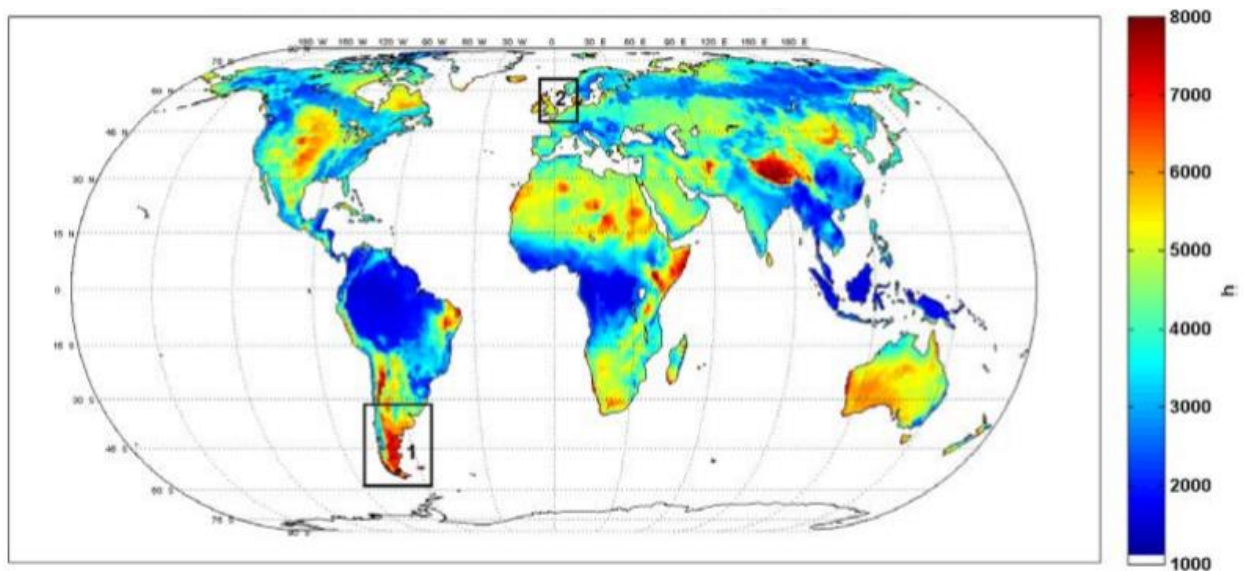
De productie van vliegtuigbrandstof van FT-synthese is al aangetoond en goedgekeurd voor gebruik door ASTM. De straalbrandstofroute via methanol is echter niet aangetoond en nog niet gecertificeerd door ASTM voor gebruik op commerciële vluchten. Als de route via methanol zou worden gevolgd, zou technische goedkeuring een belangrijke stap zijn voordat de implementatie zou kunnen beginnen (Schmidt et al., 2018).

Lehmann (2018) geeft aan dat het niet waarschijnlijk is dat PTL in 2030 een grote rol heeft in de brandstoflevering. Goldmann et al. (2018) geeft aan dat de technologische paraatheid van alle elektrochemisch paden ver achter lopen, maar hebben de potentie het potentieel om met hernieuwbare energie op maat gemaakte emissievrije vliegtuigbrandstoffen te produceren.

Vliegtuigen op batterijen zullen waarschijnlijk niet haalbaar zijn tegen 2050. Waterstof heeft een te lage energiedichtheid en wordt achtervolgd door veiligheidsproblemen. Biobrandstoffen zijn beperkt in de hoeveelheid te leveren brandstof. PTL kan kerosine leveren voor langeafstandstransport en lange termijn, grootschalige energieopslag mogelijk maken om de seizoensgebonden mismatch tussen vraag en aanbod van hernieuwbare elektriciteit te dekken. De conversietechnologie van water en CO<sub>2</sub> door elektrolyse is onlangs uitgebreid naar nieuwe plasmatechnologie. Voor CO<sub>2</sub>-splitsing door plasmolyse is het verminderde elektrische veld geïdentificeerd als de belangrijkste parameter voor het verklaren en verbeteren van de energie-efficiëntie. Energie-efficiëntie door plasmolyse is vergelijkbaar met die van elektrolyse, maar biedt voordelen in energiedichtheid, opschaling en omschakeling in reactie op intermitterend vermogen zonder gebruik van schaarse materialen (Goede, 2018).

### Schaalgrootte

De fysiek beperkende factor voor het toepassen van PTL op grote schaal is de ruimte die nodig is voor het opwekken van hernieuwbare energie. Om in 2050 50% van de benodigde vliegtuigbrandstof in Europa via PTL op te wekken is 3000 PJ (Maling, 2017) nodig. Om dit op te wekken met windenergie is bijna 2x de oppervlakte van Nederland nodig. De Europese windenergie potentie is 44.000 – 110.000 PJ (European\_Environment\_Agency, 2009). Er lijkt dus voldoende potentie voor windenergie in Europa. Echter, ook andere sectoren zullen CO<sub>2</sub> doelstellingen willen halen en een beroep doen op de potentiële windenergie locaties. Een andere mogelijkheid is om de energie buiten Europa op te wekken. Op de wereld zijn betere locaties om wind en zonne-energie op te wekken. ~~Q.a.~~ (Argentinië is een goede locatie). De energie (PTL) kan voor Europa getransporteerd worden naar de haven van Rotterdam (Fasihi, Bogdanov, & Breyer, 2016).



Figuur 4: toont het aantal vol-last-uren voor hybride PV-windkrachtcentrale locaties in de wereld (de beste locaties worden aangegeven met een rode kleur)(Fasihi et al., 2016)

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

Via System Dynamics approach (onderzoeksofzet waarin inzichtelijk wordt gemaakt hoe complexe processen zich in werkelijkheid gedragen) onderzoekt Kieckhäfer et al. (2018) wat de potentie is van alternatieve brandstoffen voor de luchtvaart. De resultaten geven aan dat de invoering van alternatieve brandstoffen in de meeste scenario's vrij beperkt is, aangezien de huidige productieprocessen geen concurrerende prijzen toestaan in vergelijking met conventionele vliegtuigbrandstof. Daarom is het potentieel van emissiearme luchtvaart vrij beperkt. Dit vraagt om de ontwikkeling van nieuwe productieprocessen die ~~dit mogelijk maken~~ economische haalbaarheid van het omzetten van biomassa of waterstof in drop-in brandstoffen mogelijk maken. Daarnaast kunnen politieke maatregelen de adoptie van alternatieve brandstoffen bevorderen.



## 4. Discussie en Conclusie

### 4.1. Discussie

Uit de studie blijkt dat PTL veel potentie heeft om, op de lange termijn, op grote schaal kerosine te leveren voor vliegtuigen. PTL productie is echter nog niet op grote schaal toegepast. Het is daarom lastig in te schatten wat de verdere ontwikkelingen gaan zijn en waar er tegen beperkingen wordt aangelopen. De afgelopen jaren zijn er veel technische studies uitgevoerd die aantonen dat een onderdeel van het productieproces efficiënter kan of dat er zelfs een nieuwe productiestap wordt geïntroduceerd. Dit stemt positief, maar de gebruikte studies voor het opstellen van voorliggend rapport hebben allen te maken gehad met de onzekere situatie dat waar PTL nog niet op grote schaal is geproduceerd. Deze onzekerheden zijn overgenomen in dit rapport. Het advies is dan ook om de resultaten naar de toekomst toe niet te gedetailleerd te lezen maar op grote lijnen te gebruiken. De studie geeft wel voor alle deelvragen, met de huidige kennis, een goed beeld wat over de mogelijkheden zijn van PTL. Dit overzicht is nog niet eerder opgesteld. Waarbij moet worden aangetekend dat voor toxische emissies voor PTL geen apart onderzoek is gevonden. Er is gebruik gemaakt van onderzoeken van andere synthetische kerosines (GTL en BTL).

Uit de gebruikte literatuur blijkt dat de kosten van PTL nu van 3 €/kg kan zakken naar 2 €/kg in 2050. Kostenvoordeel wordt hierbij voornamelijk veroorzaakt door schaalvergroting en verbeterde productieprocessen. De voornaamste kosten voor het produceren van PTL zijn kosten voor is energie. Prijsontwikkelingen van zowel de elektriciteitsprijs als de prijs van ruwe olie zijn is grillig en lastig te voorspellen naar 2050 toe. Vandaar dat in dit onderzoek is gekozen voor een gemiddelde prijsontwikkeling. Een andere onzekerheid is de ontwikkeling van beleid (zowel landelijk, Europees als mondiaal). Wanneer door overheden echt werk wordt gemaakt van een meer duurzame energievoorziening en gestuurd wordt door middel van subsidies of/ en CO<sub>2</sub> belasting, is PTL een brandstof die grootschalig kan worden opgewekt.

Omdat er momenteel nog niet echt een ander alternatief is voor duurzame brandstof voor de luchtvaart (er wordt wel geëxperimenteerd met elektrische vliegtuigen) is PTL kerosine een goed alternatief voor fossiele brandstof. Naast maatregelen van de overheid zullen er ook stappen gezet moeten worden in de verdere ontwikkeling van nieuwe productieprocessen die de economische haalbaarheid vergroten.

Voor de lange termijn is PTL alleen toepasbaar bij het gebruik van schone energie (wind of zon). Het fabriceren van PTL kosten relatief veel energie. Vandaar dat het zo belangrijk is dat er schone energie wordt gebruikt. Dit geldt ook voor de gebruikte CO<sub>2</sub> bron. Uiteindelijk zal dit alleen uit de lucht gehaald moeten worden. Echter is het wel belangrijk dat de technologische ontwikkeling van het productieproces doorgaat. Vandaar dat op de korte termijn hergebruik van een CO<sub>2</sub> bron van fossiele oorsprong, zoals dat van Tata steel in IJmuiden, er voor kan zorgen dat technieken zich verder ontwikkelen.

Verder lijkt er voldoende potentie voor windenergie in Europa voor de productie van PTL. Echter, ook andere sectoren zullen CO<sub>2</sub> doelstellingen willen behalen en een beroep doen op de potentiële windenergie-locaties. Daarnaast zal de wereldbevolking verder groeien waardoor gronden voor windenergie concurreren met andere functies zoals woningbouw.

Voor de productie van PTL is relatief weinig water en grond nodig. Voor productie op grote schaal is wel een aanzienlijke hoeveelheid ruimte nodig voor de opwekking van zonne- of/ en windenergie.

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

Afhankelijk van de locatie van fabricering kan lokaal wel een watertekort ontstaan. Invloed van de productie van PTL op de voedselproductie is beperkt doordat er geen akkerland voor nodig is. Wanneer bijvoorbeeld windenergie wordt gebruikt voor de productie van PTL kan dit samengaan met grond voor voedselproductie. Voor grootschalige opwekking van energie door zonne-energie parken, kan gekozen worden voor locaties die niet geschikt zijn voor voedselproductie zoals woestijngebied.

In verband met voldoende aromaten moet PTL kerosine (via de FT-route) worden bijgemengd met 50% conventionele kerosine. Een mogelijk vervolgonderzoek kan zijn ; onderzoeken of conventionele kerosine vervangen kan worden door~~met~~ PTL kerosine via de methanol-route.

Dit deelonderzoek heeft zich beperkt tot PTL ; Mogelijkheden ten aanzien van een combinatie met GTL, CTL of BTL zijn~~is~~ niet meegenomen.

## 4.2. Conclusies

De onderzoeksvraag van dit deelonderzoek is: Wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van power to liquid kerosine als vliegtuigbrandstof? Hieronder staat de conclusie van de verschillende deelvragen.

- PTL kerosine verbrandt schoner dan conventionele kerosine, hierdoor komen er minder toxische stoffen vrij wat een positieve bijdrage kan leveren aan de luchtkwaliteit rond vliegvelden.
- Voor PTL via de FT route is 50% bijmengen met conventionele kerosine nodig. Dit wel-in verband met de benodigde aromatische verbindingen -voorlopig bijmengen (50-50 bewezen goede resultaten) nodig met conventionele kerosine. Voor PTL via de methanol route is bijmenging niet nodig. Hier moet echter wel meer onderzoek naar worden uitgevoerd (nog geen goedkeuring van de American Society for Testing and Materials).
- De gebruikte energiebron en gebruikte CO<sub>2</sub> bron voor de productie van PTL zijn het meest bepalend voor de CO<sub>2</sub> prestatie van PTL. Bij gebruik van fossiele energie en CO<sub>2</sub> uit geconcentreerde bronnen is bij de productie van PTL de CO<sub>2</sub> prestatie minder dan van direct verbranden van fossiele energie. PTL heeft bij gebruik van schone energie (wind of zonne-energie) en CO<sub>2</sub> gebruik uit de atmosfeer een zeer lage CO<sub>2</sub> emissie. Conclusie is dat alleen PTL alleen toegepast moet worden met schone energie en CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer.
- De Kosten voor PTL zijn hoger dan conventionele kerosine. Momenteel 6 keer zo hoog. Dit zal naar 2050 minder worden. Wel is de verwachting dat PTL duurder zal blijven dan conventionele kerosine. Door schaalvergroting en technische ontwikkelingen kunnen de kosten van PTL ongeveer met een derde zakken (in 2050).
- Voor de productie van PTL is relatief weinig water en grond nodig. Voor productie op grote schaal is wel een aanzienlijke hoeveelheid ruimte nodig voor de opwekking van zonne- of/ en windenergie. Afhankelijk van de locatie van fabricering kan lokaal wel een watertekort ontstaan. Invloed van de productie van PTL op de voedselproductie is beperkt doordat er geen akkerland voor nodig is.
- De losse productiestappen om PTL te fabriceren zijn bewezen technieken. Productie op grote schaal is nog niet uitgevoerd.

Dit alles zorgt er-voor dat PTL een volwaardig alternatief kan zijn voor conventionele kerosine. Aandachtspunten hierbij zijn dat PTL nog wel verder moet ontwikkelen en dat de prijs van PTL hoog is. Overheden zullen de financiële randvoorwaarden moeten scheppen waarin PTL zich kan ontwikkelen tot volwaardig alternatief voor conventionele kerosine.

## 5. Aanbevelingen aan BVM2

Uit dit onderzoek blijkt dat PTL kerosine een alternatief is voor conventionele kerosine, waarbij minder toxische stoffen vrijkomen en minder CO<sub>2</sub>. Wel zijn de kosten voor PTL kerosine hoger dan conventionele kerosine en moet PTL kerosine zich nog verder ontwikkelen tot een volwaardig productieproces. Door PTL kerosine kan de luchtkwaliteit rond vliegvelden verbeterd worden. Hoewel PTL kerosine op korte termijn geen alternatief is voor conventionele kerosine is de aanbeveling om richting overheden (gemeente, provincie, landelijk en Europees) te lobbyen om stappen te zetten in de ontwikkeling van PTL kerosine. ~~Om tot een volwaardig productieproces te komen moeten er stappen gezet worden.~~ Door PTL hoger op de politieke agenda te krijgen ontstaat de mogelijkheid tot meer ~~kan~~ meer onderzoek ~~gedaan worden~~ en het uitvoeren van pilots ~~uitgevoerd worden~~. Een pilot kan bijvoorbeeld zijn dat vliegtuigen op Eindhoven Airport/vliegbasis Eindhoven PTL kerosine tanken. BVM2 (en bewoners) kunnen dan betrokken worden bij het meten (eerste een nul meting) van de luchtkwaliteit rond Eindhoven Airport/vliegbasis.

Het bijmengen ~~van 50%~~ van PTL kerosine (via de FT-route) met 50% conventionele kerosine is een mooi begin. In de lobby naar overheden kan echter ook worden meegenomen;

1) Het ~~maar~~ onderzoek naar het bijmengen van PTL kerosine via de methanol-route (in plaats van conventionele kerosine) ~~kan een volgende stap zijn.~~

2) Ook dit kan meegenomen worden in de lobby naar overheden. Net als ~~h~~ het ondersteunen van onderzoeken zoals van Tata-Steel (ook al is dit niet de invulling van het productieproces zoals deze in de toekomst wordt gezien) kan er voor zorgen dat er stappen gezet worden. Hier kan van worden geleerd en hiervandaan kunneneen verdere ontwikkelingen plaatsvinden.

## Literatuur

- Airbus. (2018). Global market forecast 2018-2037. Retrieved from <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>
- Andika, R., Nandiyanto, A. B. D., Putra, Z. A., Bilad, M. R., Kim, Y., Yun, C. M., & Lee, M. (2018). Co-electrolysis for power-to-methanol applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 227-241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.030>
- Bracker, J. (2017). *An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport*. Retrieved from Freiburg:
- Brasseur, G. P., Gupta, M., Anderson, B. E., Balasubramanian, S., Barrett, S., Duda, D., . . . Zhou, C. (2016). IMPACT OF AVIATION ON CLIMATE FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 97(4), 561-583. doi:10.1175/BAMS-D-13-00089.1
- Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M., & Hansson, J. (2017). *Electrofuels for the transport sector: A review of production costs*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (July 2016), 1-11. . Retrieved from
- Chemicalstechnology. (2009). George Olah CO2 to Renewable Methanol Plant, Reykjanes. <https://www.chemicals-technology.com/projects/george-olah-renewable-methanol-plant-iceland/>
- Dimitriou, I., García-Gutiérrez, P., Elder, R. H., Cuéllar-Franca, R. M., Azapagic, A., & Allen, R. W. K. (2015). Carbon dioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis. *Energy & Environmental Science*, 8(6), 1775-1789. doi:10.1039/C4EE04117H
- Edwards, R., Hass, H., Lavivé, J.-F., Lonza, L., Mass, H., Rickeard, D., & Weindorf, W. (2013). *Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context Well-To-Tank (WTT)*. Retrieved from Ispra, Italy:
- European Environment Agency. (2009). Europe's onshore and offshore wind energy potential.
- FAA. (2018). FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2018-2038. Retrieved from [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/)
- Fasihi, M., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia*, 99, 243-268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>
- Goede, A. P. H. J. E. W. C. (2018). CO2 neutral fuels. 189, 00010.
- Goldmann, A., Sauter, W., Oettinger, M., Kluge, T., Schröder, U., Seume, J., . . . Dinkelacker, F. (2018). A Study on Electrofuels in Aviation. *Energies*, 11(2):392.
- Karlsruher-Institut-für-Technologie. (2017). Power-to-liquid: 200 liters of fuel from solar power and the air's carbon dioxide: Pilot plant produces first synthetic fuel from solar power and the air's carbon dioxide/KIT spin-off inerattec supplied key component. *ScienceDaily*.
- Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573-1594. doi:10.1016/j.joule.2018.05.006
- Kieckhäfer, K., Quante, G., Müller, C., Spengler, T., Lossau, M., & Jonas, W. (2018). Simulation-Based Analysis of the Potential of Alternative Fuels towards Reducing CO2 Emissions from Aviation. . *Energies*, 2018;
- König, D. H., Baucks, N., Dietrich, R.-U., & Wörner, A. (2015). Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO2 and H2. *Energy*, 91, 833-841. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.099>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., . . . Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22), 3520-3537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>
- Lehmann, H. (2018). *Power to liquids potentials ald perspectives*. Paper presented at the Workshop Decarbonization of Aviation [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Power-to-Liquids%2C%20Potentials%20and%20Perspectives\\_Dr.%20Harry%20Lehmann.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Power-to-Liquids%2C%20Potentials%20and%20Perspectives_Dr.%20Harry%20Lehmann.pdf)
- Liu, G., Yan, B., & Chen, G. (2013). Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 59-70. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025>

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

- Luchtvaarttafel. (2014). *Deelrapport brandstofvisie duurzame luchtvaart; Reductie van emissies en kosten door daadwerkelijke groene groei*. Retrieved from
- Lut-University. (2017). Finnish demo plant produces renewable fuel from carbon dioxide captured from the air.
- Maling, C. (2017). *What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?* . Retrieved from
- Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D'Ascoli, E., Kim, J., & etal. (2017). Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature*, 543.
- Murphy, A., Hemmings, B., Calvo Ambel, C., Buffet, L., Gilliam, L., Sihvonen, J., & Earl, T. (2018). *Roadmap to decarbonising European aviation*. Retrieved from Brussel: news.bio-based.eu. (2017). Erste kommerzielle Blue Crude-Production entsteht in Norwegen.
- Penner, J., Lister, D., Griggs, D., Dokken, D., & McFarland, M. (1999). *Aviation and the global atmosphere*. . Retrieved from Cambridge:
- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *90*(1-2), 127-140.  
doi:doi:10.1002/cite.201700129
- Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). *Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Retrieved from  
[http://www.lbst.de/news/2016\\_docs/161005\\_uba\\_hintergrund\\_ptl\\_barrierrefrei.pdf](http://www.lbst.de/news/2016_docs/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierrefrei.pdf)
- Schmidt, P., Zittel, W., Weindorf, W., & Raksha, T. F. (2016). *Renewables in Transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity*. Retrieved from Frankfurt: . Retrieved from
- sunfire.de. (2017). blue-crude-sunfire-produziert-nachhaltigen-erdoelersatz.  
<https://www.sunfire.de/de/unternehmen/news/detail/blue-crude-sunfire-produziert-nachhaltigen-erdoelersatz>
- Tabak, S. A., Avidan, A. A., & Krambec, F. (1985). *Production of synthetic gasoline and diesel fuel from non-petroleum sources*. Retrieved from paulsboro, New Jersey:
- Terwel, R., & Kerkhoven, J. (2018). *carbonneutral aviation with current engine technology: the take-of synthetic kerosene production in the Netherlands* Retrieved from
- Yim, S. H., Lee, G. L., Lee, I. H., Allroggen, F., Ashok, A., Caiazzo, F., . . . Barrett, S. R. J. E. R. L. (2015). Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *10*(3), 034001.
- Zhang, C., Hui, X., Lin, Y., & Sung, C.-J. (2016). Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 120-138. doi:10.1016/j.rser.2015.09.056
- Zschocke, A., Scheuermann, S., & Ortner, J. (2012). High Biofuel Blends in aviation (HBBA) (*ENER/C2/2012/420-1*).

TITEL IN BESTAND/EIGENSCHAPPEN INVULLEN

## Bijlage A

Literatuuroverzicht (verzamelstaat samenvattingen gelezen literatuur.xlsx, tabblad: PTL.



## InCompany Milieuadvies

faculteit Management, Science & Technology,  
Vakgroep Science  
Open Universiteit  
Postbus 2960  
6401 DL Heerlen, NL  
tel. +31 45 576 2877  
[secretariaat.mst@ou.nl](mailto:secretariaat.mst@ou.nl)  
[www.ou.nl/nw](http://www.ou.nl/nw)  
[www.Incompany-milieuadvies.nl](http://www.Incompany-milieuadvies.nl)

