



De potentie van gas-to-liquid (en coal-to-liquid) kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart

Deelonderzoeksrapport bij het project
synthetische kerosine

RAPPORTAGE DEELONDERZOEK

InCompany ■■■■

■■■■■■■■■■

Milieuadvies

REMCO KISTEMAKER

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

Colofon

Naam document	PWWP-IM2018nj-M010-rkistemaker.doc
Opdrachtgever	Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Beraad Vliegghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, contactpersoon: Prof. Dr. Ir. K. (Klaas) Kopinga
Uitgave	InCompany Milieuadvies, faculteit Management, Science & Technology Open Universiteit, Postbus 2960, 6401 DL Heerlen, NL. www.ou.nl/nw
Auteur	Remco Kistemaker
Projectteam (nummer)	M010, Synthetische kerosine, IM2018nj
Projectcoach (docent)	Dr. Wilfried Ivens, Open Universiteit – InCompany Milieuadvies
Datum (laatst bijgewerkt)	19-3-2019 12:59
Status	<input type="checkbox"/> In bewerking <input type="checkbox"/> voor review (intern: team/projectcoach; extern: opdrachtgever) <input type="checkbox"/> ter beoordeling <input checked="" type="checkbox"/> definitief
	InCompany Milieuadvies hanteert de APA 5th Style als norm voor haar wetenschappelijke rapportages.

Copyright	© 2019 Open Universiteit, Heerlen
	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 veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins, hetgeen ook van toepassing is op de gehele of gedeeltelijke bewerking. 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.
InCompany Milieuadvies	InCompany Milieuadvies is het online milieuadviesbureau van de Open Universiteit (www.ou.nl). Studenten werken in teamverband aan echte milieupdrachten 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

Titel (nl)	De potentie van synthetische kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart (Milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van het gebruik van verschillende typen synthetische kerosine als vliegtuigbrandstof).
Title (in English)	The potential of synthetic kerosene as an alternative fuel for aviation (Environmental, climate, financial, infrastructural and technological impacts of the use of different types of synthetic kerosene as jet fuel).
Opdrachtgevende instantie	Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vliegghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, NL
Opdrachtgever	Prof. Dr. Ir. K. (Klaas) Kopinga, BVM2, Eindhoven, NL
Omschrijving opdracht (nl)	Onderzoek naar effecten van alternatieve voortstuwingsbrandstoffen voor vliegtuigen, die zich ongeveer gedragen als conventionele kerosine en eventueel daarmee mengbaar zijn zonder grote aanpassingen van vliegtuigen, en die minder nadelige milieueffecten (toxische emissies en klimaat) hebben.
Description of the order (in English)	Research into impacts of alternative propulsion fuels for aircraft, that behave similarly to conventional kerosene and are possibly miscible with it without major aircraft modifications, and that have less adverse environmental effects (toxic emissions and climate).
Trefwoorden	Kerosine, synthetische kerosine, biobrandstoffen, hernieuwbare vliegtuigbrandstoffen, Power to Liquid brandstoffen, Gas/Coal to Liquid brandstoffen (GTL/CTL), Synthetische Paraffine Kerosine (SPK)
Key words	Kerosene, synthetic kerosene, biofuels, renewable jet fuels (RJF), Power-to-Liquid (PTL) fuels, electrofuels, Gas/Coal-to-Liquid (GTL/CTL) fuels, Synthetic Paraffinic Kerosene (SPK).
Betrokkene(n) bij opdrachtgevers-organisatie	Klaas Kopinga, De Speldenmaker 23, 5506CE Veldhoven, inhoudelijk begeleider, berichten via de mail
Auteur deelonderzoeksrapportage	Remco Kistemaker, cursus Virtueel milieuadviesbureau 2, NB9906, 835219349, wo-bachelor Milieu-natuurwetenschappen (B.Sc.); Veldesebosweg 6, 7231 DW, Warnsveld; projectmedewerker
Leden projectteam IM	Bernard Gerard, Barbara Herbschleb, Remo Snijder
Projectcoach	Dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL
Examinator	Dr. Wilfried Ivens, faculteit Management, Science & Technology, Vakgroep Science, Open Universiteit, Heerlen, NL
Referentie naar dit rapport	Kistemaker, R., (2019). De potentie van gas-to-liquid (en coal-to-liquid) kerosine als alternatieve brandstof voor de luchtvaart. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Beraad Vliegghinder Moet Minder (BVM2), Eindhoven, NL. [The potential of gas-to-liquid (and coal-to-liquid) kerosene as an alternative fuel for aviation (in Dutch)]. Unpublished student paper, Open Universiteit, Heerlen, NL.

Inhoud

Colofon	2
Projectgegevens.....	3
Inhoud	4
Voorwoord.....	5
Samenvatting	6
Abstract	7
1. Inleiding: Het probleem.....	8
1.1 Achtergrondinformatie	8
1.2 Probleemanalyse.....	8
1.3 Vraagstelling	9
1.4 Doelstelling	9
2. Methode: onderzoekopzet	10
2.1 Onderzoekstype	10
2.2 Randvoorwaarden en afbakening	10
2.3 Systematisch literatuuronderzoek	10
3. Resultaten	12
3.1 Productieroutes.....	12
3.2 Gevolgen voor milieu: emissie van toxische stoffen	13
3.3 Gevolgen voor klimaat: CO _{2,eq} -emissie.....	15
3.3.1 Lifecycle broeikasgasemissie	15
3.3.2 'Well to tank' emissie	15
3.3.3 'Tank to wing' emissie	16
3.4 Brandstofprijzen.....	16
3.4.1 GTL-kerosine.....	16
3.4.2 CTL-kerosine	17
3.5 Gevolgen voor vliegtuigen en infrastructuur	17
3.5.1 Vliegtuigen.....	17
3.5.2 Infrastructuur op vliegvelden.....	18
3.6 Gevolgen voor landgebruik en voedselproductie.....	18
3.7 Beschikbaarheid naar volume en tijd	19
3.7.1 CTL-kerosine	19
3.7.2 GTL-kerosine.....	19
4. Discussie en conclusies.....	22
4.1 Discussie	22
4.2 Conclusies.....	23
5. Aanbevelingen	24
Bijlage A: Literatuuronderzoek (A).....	27
Bijlage B: Literatuuronderzoek (B).....	28
Bijlage C: Verkorte samenvattingen GTL/CTL uit verzamelstaat.....	29

Voorwoord

Dit rapport bevat het verslag van een literatuuronderzoek uitgevoerd in opdracht van het Beraad Vlieghinder Moet Minder (BVM2) te Eindhoven, en maakt deel uit van het project 'Synthetische kerosine'. Dit deelonderzoek vormt daarin één van vier deelonderzoeken waarvan de rapportages uiteindelijk gecombineerd zullen worden tot een adviesrapport. Dit overzicht van Gas-to-Liquid (en Coal-to-Liquid) synthetische kerosine is hiermee onderdeel van een totaaloverzicht van meerdere soorten synthetische kerosine. Dit onderzoek beoogt BVM2 te ondersteunen bij het maken van een verantwoorde keuze voor de toekomstige invulling van de brandstofvoorziening van het vliegverkeer. Dat is nodig omdat door de verwachte toename van het vliegverkeer de emissies van broeikasgassen en toxische stoffen verder zullen toenemen indien wordt vastgehouden aan conventionele (fossiele) kerosine. Deze emissietoename zal het klimaat en de gezondheid van de mens ongunstig beïnvloeden.

Samenvatting

Tijdens het verbrandingsproces van kerosine worden broeikasgassen en toxische stoffen uitgestoten of gevormd die respectievelijk het klimaat (mondiaal) en de gezondheid van de mens (lokaal) ongunstig kunnen beïnvloeden. Eén van de mogelijkheden om het gebruik van conventionele kerosine (gebaseerd op ruwe olie) en de negatieve effecten daarvan te verminderen, is het aanpassen van de vliegtuigbrandstof, bijvoorbeeld in de vorm van synthetische kerosine (niet gebaseerd op ruwe olie).

Een duidelijk overzicht waarin de resultaten van recente onderzoeken zijn verzameld van emissies (toxische stoffen en CO₂-equivalenten over de gehele levenscyclus), kosten, eventueel noodzakelijke aanpassingen van vliegtuigen en infrastructuur van vliegvelden, gevolgen voor landgebruik en voedselproductie (door benodigde feedstock), en beschikbaarheid naar volume en tijd van verschillende typen synthetische kerosine, ontbreekt nog. Dit deelonderzoek, uitgevoerd in opdracht van Beraad Vliegghinder Moet Minder (BVM2), richt zich op het opstellen van zo'n overzicht voor synthetische Gas-to-Liquid (GTL; gebaseerd op aardgas) en Coal-to-Liquid (CTL; gebaseerd op steenkool) kerosine, als onderdeel (deelonderzoek) van het project 'Synthetische Kerosine'.

Vanwege het exploratieve karakter van de vraagstelling is gekozen voor een literatuuronderzoek als onderzoekstype. De literatuur die gebruikt is om deze deelonderzoeksrapportage te genereren, werd met behulp van een systematisch literatuuronderzoek (Systematic literature review) geselecteerd.

Uit de gevonden resultaten blijkt dat het voordeel van synthetische GTL- en (in mindere mate) CTL-kerosine (boven conventionele kerosine) vooral zit in een schonere verbranding en een lagere uitstoot van met name fijnstof, roet, koolwaterstoffen en aerosolen, die vooral op lokaal niveau van de omgeving van vliegvelden gunstig kan uitpakken. De volledige inzetbaarheid van GTL- en (in mindere mate) CTL-kerosine wordt voorsnog echter vooral beperkt door het gebrek aan aromaten, waardoor altijd, volgens ASTM-voorschrift, bijgemengd moet worden met conventionele kerosine (minimaal 50 vol%). Dit reduceert de emissievoordelen op lokaal niveau weer in belangrijke mate.

Van klimaatvoordeel is geen sprake omdat over de gehele levenscyclus bekeken de CO_{2,eq}-uitstoot voorsnog circa 10-15% hoger uitvalt dan bij conventionele kerosine, waarbij bij de productie van CTL bovendien CCS-technologie noodzakelijk is. Als enig mogelijk klimaatvoordeel is de verwachte afname van de vorming van contrails te noemen bij gebruik van deze synthetische kerosine, dankzij een afname van de vorming van aerosolen. Contrails dragen bij aan de netto klimaatopwarming.

Omdat synthetische GTL- en CTL-kerosine (evenals conventionele kerosine) zijn gebaseerd op fossiele brandstoffen, dragen deze niet bij aan een vermindering van het gebruik hiervan. Vooral steenkool als grondstof komt bovendien steeds meer onder druk te staan vanwege de hoge CO₂-emissies bij het omzettingproces. Gezien de onzekere toekomstperspectieven in verband met de sterke afhankelijkheid van de olieprijs (GTL) en de ontwikkeling van meer 'duurzame' vormen van synthetische kerosine (met name Power-to-Liquid), en van alternatieve, meer 'duurzame' vormen van voortstuwing (waterstof en elektriciteit), is het de vraag of GTL- en (zeker) CTL-kerosine geschikte alternatieven kunnen zijn op de langere termijn (na ca. 2050).

Aanbevolen wordt aan BVM2 om te lobbyen voor het gebruik van GTL-kerosine, weliswaar als mengsel met conventionele kerosine, als een te verantwoorden (maar duurder), voorlopig (enkele decennia?) alternatief voor de invulling van de brandstofvoorziening van het vliegverkeer, met het oog op de (iets) lagere uitstoot op lokaal niveau (omgeving vliegvelden). Bovendien wordt verder onderzoek naar de inzetbaarheid van GTL-kerosine in zuiverder vorm en naar synergetische, hybride vliegtuigbrandstof-combinaties van GTL- en biokerosine aanbevolen.

Abstract

By burning kerosene, greenhouse gases and toxic substances are emitted or formed that can adversely affect the climate (globally) and human health (locally), respectively. One of the ways to reduce the use of conventional kerosene (based on crude oil) and its negative effects is to modify the aircraft fuel, for example by synthetic kerosene (not based on crude oil). This sub-study gives an overview of the impacts of the use and production of synthetic Gas-to-Liquid (GTL; based on natural gas) and Coal-to-Liquid (CTL; based on coal) kerosene. The advantage of GTL and (to a lesser extent) CTL kerosene (over conventional kerosene) is mainly in cleaner combustion and lower emissions of toxic substances, which can be particularly beneficial in the vicinity of airports. However, the full applicability of GTL and CTL kerosene is particularly limited by the lack of aromatics, which means that it must always be mixed with conventional kerosene. There is no climate benefit because, over the entire life cycle, CO_{2,eq} emissions are currently about 10-15% higher compared to conventional kerosene. CTL also requires CCS technology. Given the uncertain future prospects associated with the high dependency on oil prices (GTL) and the emergence of more 'sustainable' forms of synthetic kerosene and alternative forms of propulsion, it is questionable whether GTL and (certainly) CTL kerosene can be suitable alternatives in the longer term. It is recommended that BVM2 insist on the use of GTL kerosene as an alternative for the filling in of the fuel supply for the time being.

1. Inleiding: Het probleem

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 4.4% per jaar (Airbus, 2018) zal toenemen. Dit komt neer op een verdubbeling over 15 jaar (Airbus, 2018). 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 proces worden broeikasgassen en toxische stoffen uitgestoten of gevormd die respectievelijk het klimaat (mondiaal) en de gezondheid van de mens (lokaal) ongunstig kunnen beïnvloeden.

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 brandstoffen die niet gebaseerd zijn op ruwe olie (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.

Kerosine kan ingedeeld worden naar koolstof-feedstock, waarbij 3 verschillende categorieën zijn te onderscheiden: fossiel, biomassa en CO₂/CO. Binnen de categorie 'fossiel' zijn 3 subcategorieën te onderscheiden: aardolie of ruwe olie, aardgas en steenkool. Deze fossiele feedstock kan met verschillende technologieën worden omgezet in fossiele kerosine (Liu, Yan, & Chen, 2013): Aardolie via raffinage (verhitten en destilleren) tot conventionele kerosine, en aardgas en steenkool via het Fischer-Tropsch (FT) proces tot synthetische Gas-to-Liquid (GTL), respectievelijk Coal-to-Liquid (CTL) kerosine. De via het FT-proces verkregen synthetische alifatische kerosine wordt ook wel synthetische paraffine kerosine (SPK) genoemd.

1.2 Probleemanalyse

Er ontbreekt een duidelijk overzicht waarin de resultaten uit recente onderzoeken zijn verzameld van emissies (toxische stoffen en CO₂-equivalenten over de gehele levenscyclus), kosten, vereiste aanpassingen van vliegtuigen en infrastructuur van vliegvelden, gevolgen voor landgebruik en voedselproductie (door benodigde feedstock), en beschikbaarheid naar volume en tijd van verschillende typen synthetische kerosine. Dit deelonderzoek richt zich op het opstellen van zo'n overzicht voor GTL- en CTL-kerosine, als onderdeel van het project 'Synthetische kerosine' (naast de deelonderzoeken conventionele kerosine, biokerosine en Power-to-Liquid kerosine).

Voor de productie van GTL-brandstof wordt aardgas als feedstock gebruikt. Aardgas is een van de schoonste en meest voorkomende fossiele brandstoffen, die echter 4 maal zo duur is in het transport dan ruwe olie. Het omzetten van aardgas uit een afgelegen bron in een vloeistof ('liquefied natural gas', LNG) vóór transport is kosten-efficiënter (Liu et al., 2013) en een aantrekkelijke strategie voor landen met overvloedige gasreserves zoals Qatar (Al-Nuaimi et al., 2016).

GTL-technologie kan in dit verband ook een interessante optie zijn om aardgas te vermarkten en in te zetten als alternatieve brandstof bij een stijgende olieprijs door uitputting van deze fossiele brandstof (ruwe olie) en de met oliewinning en oliegebruik gepaard gaande milieuvervuiling (Liu et al., 2013).

CTL en GTL zijn gebaseerd op dezelfde technologie. Maar CTL-kerosine is geen aantrekkelijk alternatief voor conventionele kerosine vanwege de hoge CO₂-emissies bij het omzettingsproces naar deze brandstof ('well to tank'-emissie) en bij de opwekking van de benodigde energie hiervoor (Vallentin, 2008). Desalniettemin zal CTL-kerosine naast GTL-kerosine volledigheidshalve als potentieel alternatieve vliegtuigbrandstof worden meegenomen in dit deelonderzoek.

1.3 Vraagstelling

De milieuwetenschappelijke hoofdvraag die gehanteerd wordt voor elk deelonderzoek luidt: Wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van productie en gebruik van synthetische kerosine? Dit resulteert in de volgende deelonderzoeksvragen:

- 1) Welke stoffen die tot toxische emissies aanleiding geven, bevat deze brandstof (per kg) en tot welke toxische emissies leidt dat (per kg brandstof)?
- 2) Hoeveel CO₂-equivalenten komen er, over de gehele levensloop van deze brandstof gerekend, vrij per kg brandstof en per GJ energie-inhoud van de brandstof?
- 3) Wat kost de brandstof?
- 4) Wat zijn de gevolgen bij ingebruikname?
 - a) Voor vliegtuigen?
 - b) Voor de infrastructuur op vliegvelden?
 - c) Voor landgebruik en voedselproductie?
- 5) Wat is de (realistisch) haalbare beschikbaarheid naar volume en tijd?

1.4 Doelstelling

Het doel van dit deelonderzoek is een wetenschappelijke rapportage waarin een overzicht gegeven wordt van enerzijds de effecten van ingebruikname van GTL- en CTL-kerosine op gebied van emissies (milieu en klimaat), kosten, vliegtuigen en infrastructuur, landgebruik en voedselproductie, en anderzijds van de huidige en verwachte toekomstige beschikbaarheid. Op basis van dit rapport zou een verantwoorde keuze gemaakt moeten kunnen worden voor het al of niet in gebruik nemen van GTL- en/of CTL-kerosine als alternatieve vliegtuigbrandstof. Dit rapport beoogt daarmee BVM2 te ondersteunen met het gefundeerd opstellen van haalbare eisen ten aanzien van vermindering van de negatieve effecten van het vliegverkeer.

2. Methode: onderzoeksofzet

2.1 Onderzoekstype

Vanwege het exploratieve karakter van de vraagstelling is gekozen voor een literatuuronderzoek als onderzoekstype.

In de wetenschappelijke literatuur zijn diverse (recente) artikelen te vinden die een overzicht geven van alternatieve vliegtuigbrandstoffen, waarbij de focus meestal ligt op biobrandstoffen (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Janic, 2018; Richter, Braun-Unkhoff, Naumann, & Riedel, 2018).

Omdat GTL en (vooral) CTL relatief lang bestaande (meerdere decennia, respectievelijk een eeuw!), min of meer uitontwikkelde processen zijn en gebaseerd zijn op fossiele feedstock, worden de hieruit gevormde brandstoffen niet gezien als heel innovatief en blijven daardoor in de recente (tot ca. 10 jaar terug) wetenschappelijke en vooral 'grijze' literatuur wat onderbelicht. Het onderzoek op het gebied van 'duurzame' alternatieve brandstoffen, gebaseerd op biomassa (biokerosine) of CO₂/duurzame elektriciteit (Power-to-Liquid kerosine), is in dit opzicht een stuk 'populairder', vooral in de 'grijze' literatuur. Desalniettemin worden GTL-kerosine (en in mindere mate CTL-kerosine) meestal als serieuze kandidaten meegenomen in de evaluaties van alternatieve kerosinesoorten, hetgeen dit onderzoek meer dan rechtvaardigt. Van 'grijze' literatuur is in dit onderzoek slechts beperkt en intuïtief gebruik gemaakt.

De wetenschappelijke literatuur die gebruikt is om deze deelonderzoeksrapportage te genereren, werd met behulp van een systematisch literatuuronderzoek ('Systematic literature review') geselecteerd. Paragraaf 2.3 beschrijft de gehanteerde systematische aanpak hiervoor.

2.2 Randvoorwaarden en afbakening

- 1) Dit deelonderzoek beperkt zich tot GTL- en CTL-kerosine.
- 2) Het onderzoek blijft beperkt tot de civiele luchtvaart.
- 3) Alleen de CO₂-equivalenten worden meegenomen in het onderzoek; de niet CO₂-effecten op grote hoogte in de atmosfeer blijven buiten beschouwing.
- 4) Alleen Engels-, Duits- en Nederlandstalige literatuur vanaf 01-01-2009 wordt meegenomen in dit deelonderzoek.
- 5) De te gebruiken literatuur moet voldoen aan wetenschappelijke kwaliteitscriteria.

2.3 Systematisch literatuuronderzoek

Het Systematisch literatuuronderzoek is opgebouwd uit 5 stappen:

1. Opstellen van zoekcriteria voor de selectie van relevante studies.

Om een maximale actualiteit in de onderzoeksresultaten te bewerkstelligen, is naar recente wetenschappelijke literatuur gezocht (maximaal 10 jaar oud) in de digitale bibliotheek van de Open Universiteit.

Hiertoe zijn zogenaamde Quick Searches uitgevoerd in de discipline Natuurwetenschappen zonder voorselectie van zoekmachines. Hierbij zijn in eerste instantie 6 verschillende combinaties van de volgende zoektermen gebruikt: "gas to liquid", GTL, CTL, kerosene, GHG en emissions (zie bijlage

A). Deze zoektermen leverden al relatief veel artikelen (>100) op die ingaan op de meeste aspecten uit de afzonderlijke deelvragen (zie §1.3).

2. Selectie van relevante artikelen.

De eerste honderd in volgorde van relevantie gevonden artikelen per zoekcombinatie zijn vervolgens beoordeeld op afbakening op GTL- (en CTL-)kerosine en op aspecten uit de afzonderlijke deelvragen. Dit is gedaan op basis van de abstracts, inleiding en conclusies.

Hierbij bleek dat de aspecten uit deelvraag 2 (levensloop CO_{2,eq}-emissie) wat onderbelicht bleven. Daarom zijn in tweede instantie Quick Searches uitgevoerd met de extra zoektermen LCA, lifecycle, "well to tank", "well to wake" en "well to wing" in combinatie met GTL en kerosine (en in mindere mate met CTL omdat die vaak in combinatie met GTL wordt behandeld) (zie bijlage A). Deze 9 extra zoekcombinaties leverden nog ca. 20 aanvullende artikelen op die vervolgens op dezelfde manier zijn beoordeeld.

3. Evaluatie op randvoorwaarden.

De hierna overgebleven artikelen, waarvan het merendeel uit ScienceDirect, SpringerLink of Wiley (in deze volgorde), zijn na kritische beoordeling op wetenschappelijke kwaliteitscriteria vastgelegd in een database. Dit leverde 44 geselecteerde artikelen op (zie bijlage B), waaronder een aantal artikelen die voornamelijk over biokerosine gaan en waarin GTL- (en CTL-)kerosine slechts zijdelings wordt behandeld. Deze zogenaamde 'bio bijvangst' (rood gemarkeerd in bijlage B) is niet gebruikt. Daarnaast is een aantal artikelen (cursief weergegeven in bijlage B) afgefallen omdat ze sterk technologisch van aard zijn en/of heel gedetailleerd een specifiek model beschrijven. Ook deze groep artikelen is niet gebruikt.

Een aantal artikelen gaat over Fischer-Tropsch(FT)-SPK, waar GTL- en CTL-kerosine onder vallen, of over GTL/CTL-transportbrandstof in het algemeen. Informatie uit deze artikelen is op onderdelen gebruikt die ook GTL- (en/of CTL-)kerosine aangaan, waarbij de gebruikte verzamelnaam (FT-SPK of GTL/CTL-brandstof) in de betreffende passages steeds wordt vermeld.

4. Maken van een ranking van meest gevonden artikelen.

Op basis van het aantal keren dat de hierboven geselecteerde 44 artikelen zijn gevonden via 1 of meer gebruikte zoektermen of combinaties, is een ranking gemaakt van meest gevonden artikelen naar aantal zoekterm 'hits' (zie bijlage B).

5. Analyse van de data van de geselecteerde literatuur volgens een bepaalde uniformiteit.

In de meest gevonden artikelen (exclusief 'bio bijvangst' en afgefallen artikelen) is vervolgens, in volgorde van genoemde ranking (tot minimaal 3 'hits'), gezocht naar trefwoorden in de tekst die aansluiten op aspecten uit de afzonderlijke deelvragen (zie §1.3).

Op deze manier zijn relevante passages gevonden in 16 artikelen (vet weergegeven in bijlage B), die vervolgens zijn gekopieerd naar een aan het artikel gekoppeld document met een onderverdeling in deelvragen volgens een binnen het projectteam afgesproken uniform systeem.

Deze passages zijn vervolgens voor alle artikelen kort samengevat in een verzamelstaat die binnen het projectteam wordt gebruikt en waarin de afzonderlijke deelvragen systematisch per deelonderzoek worden beantwoord. Op deze manier kunnen ook deelonderzoek-overlappende en -overstijgende artikelen worden meegenomen in het onderzoek. Bijlage C bevat het gedeelte uit deze verzamelstaat met de verkorte samenvattingen voor dit deelonderzoek (GTL/CTL-kerosine) als los supplement.

3. Resultaten

3.1 Productieroutes

De Gas-to-Liquid (GTL) en vooral de Coal-to-Liquid (CTL) brandstofproductieprocessen lopen al enige decennia mee. Zo verzorgde het CTL-proces 92% van de vliegtuigbrandstofproductie in Duitsland tijdens de tweede wereldoorlog en wordt nu 30% van de autobrandstof in Zuid-Afrika vanuit dit proces geleverd (Liu et al., 2013).

GTL- en CTL-kerosine worden beide via het Fischer-Tropsch (FT) proces gesynthetiseerd. Hierbij wordt een uit de feedstock (in dit geval aardgas, resp. steenkool, maar ook biomassa) verkregen synthetisch gas ('syngas') omgezet in brandstof en andere vloeibare producten.

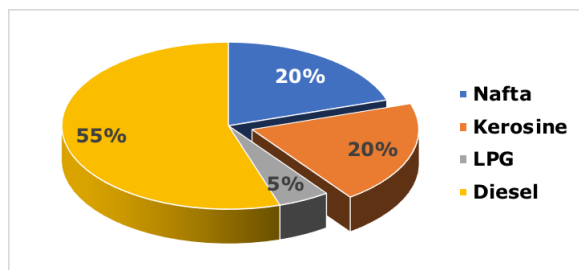
De hele synthese bestaat uit 4 stappen (Liu et al., 2013):

1. Productie van een synthetisch gas bestaande uit een mengsel van koolmonoxide en waterstof.
2. Verwijdering van ongewenste verbindingen (zoals CO₂ en SO₂) en verontreinigingen.
3. Het FT-proces, waarbij het 'syngas' wordt omgezet in een mengsel van voornamelijk rechte koolwaterstofketens van zeer uiteenlopende lengte (gassen, vloeistoffen en wassen).
4. Verdere processen (inclusief kraken en raffineren) en upgrading naar vloeibare brandstoffen.

De aldus gevormde brandstof heeft een aantal aantrekkelijke eigenschappen als vliegtuigbrandstof (Liu et al., 2013):

1. Een hogere specifieke energie, hetgeen een hogere 'payload' (betaalde lading plus passagiers) capaciteit oplevert.
2. Schonere verbranding zonder SO₂ en H₂SO₄ aerosol emissies, en gunstig voor de levensduur van de motor.
3. Verbeterde thermische stabiliteit, met als gevolg minder afzettingen in de motor en brandstofleidingen. (De van steenkool afgeleide vloeistoffen hebben als uniek voordeel een hoge thermische stabiliteit boven 400°C, wat ze geschikt maakt voor toekomstige 'high performance' luchtvaart).
4. Aromaarm (CTL) of -vrij (GTL), met als gevolg minder deeltjesemissie. (Er zitten echter ook nadelen aan een gebrek aan aromaten, zie §3.5.1).

GTL-brandstof wordt gezien als een kleurloos, reukloos, niet-toxisch, biodegradeerbaar product met minder uitstoot en tegelijkertijd een betere verbranding dan vergelijkbare conventionele brandstof. In moderne GTL-plants bestaan de productieranges uit diesel (C14-C20), kerosine (C10-C13), nafta (C5-C10), lubricants en een beetje LPG (C3-C4) (alle synthetisch). *Figuur 1* geeft een typische productieverhouding weer van verschillende synthetische GTL-producten (Sajjad et al., 2014). Het kerosine-aandeel (typisch 20%) kan in de praktijk technisch maximaal 75% bedragen via een laagtemperatuur FT-synthese met ijzer-katalyse, gevolgd door standaardfractionering van de koolwaterstoffracties (Baliban, Elia, & Floudas, 2013).



Figuur 1 Typische productieverhouding van een GTL-plant (naar Sajjad et al., 2014)

Het vloeibaar maken van steenkool via een synthetisch gas en het daaropvolgende FT-proces wordt ook wel 'indirect coal liquefaction' (ICL) genoemd. De gasreinigingsprocedure in stap 2 van de synthese is hierbij cruciaal omdat zowel SO₂ als CO₂ een optimale uitvoering van het daaropvolgende FT-proces belemmeren. Een andere CTL-technologie is gebaseerd op de directe omzetting van steenkool in een synthetische ruwe olie, waarna verdere behandeling en raffinage nodig is. Dit wordt 'direct coal liquefaction' (DCL) genoemd en wordt nu commercieel toegepast in o.a. China. (Liu et al., 2013).

De eerste voor commerciële luchtvaart goedgekeurde alternatieve kerosine was een CTL, ontwikkeld door Sasol; eerst werd in 1998 een semi-synthetische vliegtuigbrandstof (SSJF) goedgekeurd, gevolgd door een volledig synthetische CTL-kerosine (FSJF) in 2008. De eerste commerciële vluchten met CTL-kerosine werden uitgevoerd in 1998.

Daarna werd in 2009 de algemene goedkeuring en ASTM-certificering van FT-(SPK) brandstoffen opgezet, die tot de ontwikkeling van een GTL-brandstof leidde. Deze werd, samen met een biobased alternatieve brandstof (HEFA; Hydroprocessed Esters and Fatty Acids), gecertificeerd als vliegtuigbrandstof tot een hoeveelheid van 50% in mengsels met conventionele kerosine. De eerste commerciële vluchten met GTL-kerosine werden uitgevoerd in 2009 (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015).

3.2 Gevolgen voor milieu: emissie van toxische stoffen

Voor een overzicht van de toxische stoffen die worden uitgestoten of gevormd bij de verbranding van conventionele kerosine, zij verwezen naar de deelonderzoeksrapportage 'conventionele kerosine'.

Volgens Braun-Unkhoff, Riedel, and Wahl (2017) bevat SPK (waaronder GTL- en CTL-kerosine) vrijwel geen aromaten, zwavel en gebonden stikstof. Een zuivere synthetische brandstof produceert, bij gebrek aan aromaten, minder contrails en roet (Black Carbon, BC) dan conventionele kerosine. GTL-kerosine bevat zelfs helemaal geen aromaten, waardoor bij verbranding minder deeltjes (roet en fijnstof) geproduceerd worden dan bij conventionele Jet A-1 kerosine. Hun belangrijkste bevindingen zijn dat de emissies van CO, (CO₂) en onverbrande koolwaterstoffen (Unburned Hydrocarbons, UHC) iets lager zijn, die van NO_x meestal ook en die van fijnstof flink lager in vergelijking met conventionele kerosine. Bovendien leidt bijmengen van GTL-kerosine tot een kleinere deeltjesmassa, -aantal en -diameter; volgens Beyersdorf et al. (2014) is de volume-gemiddelde roetdiameter 51 nm voor GTL- en 78 nm voor conventionele kerosine (JP-8) bij 85% van het maximale motorvermogen.

Ook volgens diverse andere bronnen ontbreken zwavel en aromaten in GTL-brandstoffen of zijn deze te verwaarlozen (Al-Nuaimi et al., 2016; Janic, 2018; Liu et al., 2013; Sajjad et al., 2014).

CTL-kerosine bevat wél enige aromatische verbindingen (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Kick et al., 2012; Richter et al., 2018).

Volgens Braun-Unkhoff and Riedel (2015) zijn de (CO₂- en) NO_x-emissies van FT-brandstoffen (waaronder GTL- en CTL-kerosine) vergelijkbaar met die van conventionele brandstoffen en volgens Badami, Nuccio, Pastrone, and Signoretto (2014) zijn de CO- en (ook de) NO_x-emissies van GTL-kerosine vergelijkbaar met die van conventionele kerosine.

Bovenstaande beweringen over CO, NO_x en UHC worden bevestigd in Tabel 1, waarin de relatieve verandering ten opzichte van conventionele kerosine is weergegeven van de emissies van deze verbindingen voor respectievelijk GTL-, CTL- en 50/50 GTL/Jet A-1 conventionele kerosine voor een Auxiliary Power Unit (APU) vliegtuigmotor (Blakey, Rye, & Wilson, 2011). Een APU is een hulp-aandrijfmotor die in een vliegtuig de energie levert voor functies anders dan voortstuwing van het vliegtuig, met name het starten van de hoofdmotoren. Het emissiespectrum is afhankelijk van het APU motorvermogen, reden waarom onderscheid wordt gemaakt tussen stationair en vol vermogen.

Ook volgens Zhang, Hui, Lin, and Sung (2016) is de uitstoot van NO_x en CO door FT-brandstoffen in het algemeen vergelijkbaar met die van conventionele kerosine, terwijl de uitstoot van fijnstof zelfs 50-90% minder is. Het grootste verschil zit in de roetemissie. Volgens Beyersdorf et al. (2014) is de roetemissie van FT-brandstof 86% (66% voor een 50/50 mengsel) minder dan van conventionele kerosine (JP-8), en volgens Zhang et al. (2016) genereert GTL-kerosine 83% (65% voor een 50/50 mengsel) minder rook en 95% (64%) minder verbrandingsafzettingen dan conventionele Jet A-1.

Withers et al. (2014) rapporteren de emissie-afwijkingen van een (gecertificeerd) 50% mengsel van GTL- en conventionele kerosine ten opzichte van conventionele kerosine voor CO, NO_x, roet, SO_x en koolwaterstoffen (HC) (Tabel 1). De waarden van een 50% mengsel zijn voor de praktijk interessanter omdat GTL-kerosine alleen in deze vorm gecertificeerd is als vliegtuigbrandstof (zie §3.1 en §3.5.1).

Tabel 1 Relatieve emissiewaarden van GTL-, CTL- en 50/50 GTL/conventionele kerosine t.o.v. conventionele kerosine

Kerosinesoort	NO _x (% tov conv.)	HC (% tov conv.)	CO (% tov conv.)	SO _x (% tov conv.)	Roet (BC) (% tov conv.)
GTL (idle/full power) (Blakey et al., 2011) ^a	0/0	-35/-40 (UHC)	-10/0		
CTL (idle/fp) (Blakey et al., 2011) ^a	-5/-5	-20/-25 (UHC)	-5/-5		
50/50 GTL/Jet A-1 (idle/fp) (Blakey et al., 2011) ^a	0/0	-30/-30 (UHC)	-5/0		
50/50 GTL/conv. (Jet A) (Withers et al., 2014)	-7	0 (HC)	-2	-49	-13

^aafgelezen uit Fig. 22 en 23 (op 5% nauwkeurigheid)

Absolute emissiewaarden (in g/kg brandstof) van synthetische kerosine worden zeer spaarzaam gerapporteerd in de literatuur. Als beste benadering voor de absolute emissies van GTL-en CTL-kerosine zijn de waarden voor SPK (FT (feedstock onbekend) & HRJ (Hydroprocessed Renewable Jet fuel)) gebruikt zoals opgegeven door Janic (2018). Beyersdorf et al. (2014) vergelijken nog wel de absolute roetemissie van GTL- en conventionele kerosine bij 7% en vol motorvermogen.

Deze waarden zijn in Tabel 2 weergegeven en wijzen op (aanzienlijk) lagere emissies van NO_x (ca. 11-22%), niet-methaan koolwaterstoffen (NMHC) (ca. 18-25%), SO_x, roet (ca. 77-88%) en fijnstof (ca. 97.5-99.9%) ten opzichte van conventionele kerosine.

Tabel 2 Absolute emissiewaarden van conventionele kerosine en SPK (FT&HRJ), resp. GTL-kerosine

Kerosinesoort	NO _x 45%/fp ¹ (g/kg)	NMHC (g/kg)	SO _x (g/kg)	Roet (BC) 7%/fp ¹ (mg/kg)	Fijnstof (#/kg)
Conventioneel (Jet A1/8) (Janic, 2018)	9/18	18	0.084	-	3 ^E 15-6 ^E 15
Conventioneel (JP-8) (Beyersdorf et al., 2014)	-	-	-	8/103	-
SPK (FT&HRJ) (Janic, 2018)	8/14	13.5-14.7	0.00	-	1.5 ^E 12-1.5 ^E 14
GTL (Beyersdorf et al., 2014)	-	-	-	1/24	-

¹ %vermogen/full power

3.3 Gevolgen voor klimaat: CO_{2,eq}-emissie

3.3.1 Lifecycle broeikasgasemissie

Tabel 3 geeft een indicatie van de lifecycle (Well To Wing, WTW) broeikasgasemissies, uitgedrukt in CO₂-equivalenten (CO_{2,eq}) per GJ brandstof, van conventionele, GTL- en CTL-kerosine, gebaseerd op data uit een figuur van PARTNER (Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reductions) (Zhang et al., 2016). Hieruit blijkt dat de WTW-broeikasgasemissie van GTL-kerosine 15% hoger is dan van conventionele kerosine, van CTL-kerosine zonder CO₂-afvang en -opslag (carbon capture and storage, CCS) 123% hoger en van CTL mét CCS 11% hoger. Deze emissiewaarden komen goed overeen met die afgelezen uit een vergelijkbare figuur van Blakey et al. (2011) (

Tabel 3).

Tabel 3 'Well to wing' broeikasgasemissie (in kg CO_{2,eq}/GJ) van conventionele, GTL- en CTL-kerosine

Bron	Conventioneel (kg CO _{2,eq} /GJ)	GTL-kerosine (kg CO _{2,eq} /GJ)	CTL-kerosine -CCS (kg CO _{2,eq} /GJ)	CTL-kerosine +CCS (kg CO _{2,eq} /GJ)
Zhang et al. (2016) ^a	87	101	194	96
Withers et al. (2014)	87.5			
Blakey et al. (2011) ^b	85	100	195	95

^aafgelezen uit Fig. 1

^bafgelezen uit Fig. 12 (op 5 kg CO_{2,eq}/GJ nauwkeurig)

De WTW-broeikasgasemissies van GTL- en CTL-kerosine zijn dus ongunstiger dan die van conventionele kerosine, die van CTL zonder CCS zelfs ruim 2 x zo ongunstig. Ook Beyersdorf et al. (2014) suggereren dat de WTW-broeikasgasemissie van FT-brandstoffen ongunstiger is dan van conventionele brandstof.

Met behulp van de specifieke energie van de brandstoffen (Tabel 5) en de gemiddelde waarden uit

Tabel 3 kunnen de WTW-broeikasgasemissies berekend worden in kg CO_{2,eq}/kg brandstof (Tabel 4).

Tabel 4 'Well to wing' broeikasgasemissie (in kg CO_{2,eq}/kg) van conventionele, GTL- en CTL-kerosine

Conventioneel (kg CO _{2,eq} /kg)	GTL-kerosine (kg CO _{2,eq} /kg)	CTL-kerosine -CCS (kg CO _{2,eq} /kg)	CTL-kerosine +CCS (kg CO _{2,eq} /kg)
3.7	4.4	8.6	4.2

3.3.2 'Well to tank' emissie

Veruit de grootste bijdrage in het WTW-emissieverschil tussen GTL/CTL- en conventionele kerosine zit in de 'well to tank' (WTT) emissie. Volgens Blakey et al. (2011) genereert de raffinage van de feedstock, in dit geval dus de fossiele brandstof aardgas voor GTL, respectievelijk steenkool voor CTL, vergelijkbare of iets hogere WTT-broeikasgasemissies dan de raffinage van ruwe olie.

De extra WTT-emissies worden bij GTL-kerosine vooral toegeschreven aan de winning en het transport van aardgas en aan de lekkage van methaan tijdens de gaswinning (dat laatste gemiddeld 2.5% van de WTW-emissie volgens Withers et al. (2014)). Case studies geven echter aan dat de WTW-emissies van GTL-processen ook 13-15% lager kunnen zijn dan van conventionele fossiele brandstof-processen (Baliban et al., 2013), onder andere door het gebruik van bepaalde aardgas feedstock die anders zou worden afgefakkeld, waarbij deze "emissiewinst" aan het GTL-proces wordt gealloceerd (Baliban et al., 2013).

De extra WTT-emissie van CTL-kerosine is toe te schrijven aan de FT-processtap in de synthese, waarbij CCS betrekking heeft op de hierbij geproduceerde CO₂ (Blakey et al., 2011; Vallentin, 2008).

3.3.3 'Tank to wing' emissie

Synthetische kerosine verbrandt iets zuiniger dan conventionele kerosine (diverse bronnen). Volgens Zhang et al. (2016) is de CO₂-uitstoot van FT-vliegtuigbrandstoffen (waaronder GTL- en CTL-kerosine) 2.4 % lager.

Met behulp van de specifieke TTW CO₂-emissie (in kg/GJ) van SPK (FT (feedstock onbekend) &HRJ) en van conventionele kerosine, en de specifieke energie van beide brandstoffen, is de TTW CO₂-emissie in kg/kg brandstof berekend (Tabel 5). Het verschil tussen beide soorten brandstoffen is slechts 1.6%.

Tabel 5 'Tank to wing' CO₂-emissies en specifieke energie van conventionele kerosine en SPK (FT&HRJ)

Kerosinesoort	TTW-emissie (kg CO ₂ /GJ)	Specifieke energie (MJ/kg)	TTW-emissie (kg CO ₂ /kg)
Conventioneel (Jet A) (Janic, 2018; Withers et al., 2014)	72.8-73.2	43.2	3.15
SPK (FT&HRJ) (Janic, 2018)	70.4	44.1	3.10

3.4 Brandstofprijs

3.4.1 GTL-kerosine

De daling van de gasprijs (ca. 2008-2013) en fluctuerende prijsstijgingen van ruwe olie hebben tijdelijk in het voordeel gewerkt van GTL-brandstoffen. Een lage olieprijs is één van de grootste obstakels voor wijdverbreide commercialisering van GTL-producten.

Withers et al. (2014) hebben waarschijnlijkheidsberekeningen uitgevoerd bij verschillende olieprijs scenario's voor de minimale kerosineprijs met behulp van simulaties op basis van Shells Pearl GTL fabriek (

Tabel 6).

Tabel 6 Minimale brandstofprijs van GTL- en conventionele kerosine volgens Withers et al. (2014)

Olieprijs scenario	GTL-kerosine		Conv. kerosine	
	(\$/l)	(\$/kg) [(€/kg)] ¹	(\$/l)	(\$/kg) [(€/kg)] ¹
Laag	0.94	1.18 [0.86]	0.56	0.70 [0.51]
Modaal	0.99	1.23 [0.90]	0.79	0.99 [0.72]
Hoog	1.17	1.46 [1.07]	1.16	1.45 [1.06]

¹Omgerekend met de wisselkoers van 1-7-2014

Terwijl GTL- en conventionele kerosine in het hoge olieprijs scenario dus ongeveer even duur zijn, is GTL-kerosine in het modale scenario 25% duurder en in het lage scenario zelfs 67%.

In het lage en modale scenario escaleert de GTL-kerosineprijs vanwege de hoge rentebetalingen die nodig zijn om de vaste kapitaalinvestering voor een GTL-faciliteit te bekostigen. Deze extra conversietoeslag resulteert in 17% hogere exploitatiekosten voor GTL en dat is te veel om de GTL-kerosineprijs concurrerend te maken met conventionele kerosine (Withers et al., 2014).

De totale productiekosten van vloeibare GTL-brandstof lopen uiteen van \$101-\$122/bbl (bbl=barrel=159 liter), ofwel \$0.64-\$0.77/l (\$0.80-\$0.96/kg) voor een 1kBD (kilobarrel per dag) plant tot \$52-\$64/bbl of \$0.33-\$0.40/l (\$0.41-\$0.50/kg) voor een 200kBD plant (Baliban et al., 2013) (omrekening naar kg prijs op basis van een gemiddelde kerosinedichtheid van 800 kg/m³).

Door de installatie van verschillende grootschalige GTL plants (o.a. Shell, Sasol) en efficiëntieverbeteringen in de productietechnologie zullen de hoge kapitaalkosten zeker verminderen en zal GTL-brandstof nog rendabeler worden in de toekomst. Ook het gebruik van grote hoeveelheden affakkelgas en de vooruitzichten voor de productie van schaliegas verhogen de economische rendabiliteit van GTL-brandstof (Sajjad et al., 2014).

Volgens een model van Jovanović, Klimek, and Quintero (2015) kan GTL-kerosine kostenconcurrerend worden met conventionele kerosine bij voldoende marktbeschikbaarheid (Jovanović et al., 2015).

3.4.2 CTL-kerosine

CTL-kerosine kan hetzelfde kostenprofiel krijgen als GTL, maar alleen in combinatie met CCS om de CO₂-emissies te beheersen. De productiekosten van CTL zijn daarentegen veel minder gevoelig voor grondstofkosten dan GTL. Uit oogpunt van productiekosten en duurzaamheid, onder de noodzakelijke voorwaarde van CCS-technologie, kan CTL een rendabel alternatief vormen voor GTL-brandstoffen (Jovanović et al., 2015).

Volgens Floudas, Elia, and Baliban (2012) zijn de productiekosten van CTL vergelijkbaar met die van GTL (geschat op \$40-70/bbl). Weliswaar kent het CTL-proces nog hogere kapitaalkosten dan het GTL-proces, maar GTL heeft een duurdere feedstock.

3.5 Gevolgen voor vliegtuigen en infrastructuur

3.5.1 Vliegtuigen

Volledig vliegen op GTL/CTL-kerosine is nog niet mogelijk omdat er dan risico bestaat op lekkende pakkingen in het brandstofsysteem door een gebrek aan aromaten in deze vliegtuigbrandstof.

Om de huidige vliegtuigen niet te hoeven aanpassen, behoren volledig synthetische vliegtuigbrandstoffen (FSJF) een minimum hoeveelheid aromaten te bevatten. Volgens vele bronnen (onder andere Al-Nuaimi et al. (2016), Liu et al. (2013) en (Zhang et al., 2016)) zijn aromaten nodig voor het zwelgedrag van pakkingen in het brandstofsysteem. Synthetische paraffine kerosine, waaronder GTL en CTL, bevat echter geen of weinig aromaten (zie §.3.2).

Zhang et al. (2016) noemen verder nog de compatibiliteit (oplosbaarheid) van additieven, en Al-Nuaimi et al. (2016) de smeringseigenschappen als mogelijke problemen bij een gebrek aan aromaten.

Een ander probleem is de iets lagere dichtheid van FT-brandstoffen, waardoor afwijkingen kunnen ontstaan in de bepaling van de tankinhoud (Al-Nuaimi et al., 2016; Liu et al., 2013; Zhang et al., 2016).

Een minimum benodigd aromaatgehalte kan worden bereikt door FT-SPK bij te mengen met conventionele kerosine (Jet A), die maximaal 25 vol% aromaten mag bevatten volgens ASTM D1655 (Liu et al., 2013). De kerosine wordt dus aangepast aan het vliegtuig.

Tot nog toe zijn 5 verschillende alternatieve kerosinesoorten (waaronder FT-SPK) gecertificeerd door de ASTM en gedefinieerd als zogenaamde 'drop-in' vliegtuigbrandstof, die zonder enige gevolgen voor bestaande vliegtuigen en infrastructuur kan worden gebruikt in een mengsel met conventionele kerosine (o.a. Richter et al. (2018)). ASTM D7566 voor semi-synthetische mengsels schrijft voor dat hierin het percentage FT-SPK maximaal 50 vol% mag bedragen en het aromaatgehalte minimaal 8.0 vol% moet zijn (Kick et al., 2012; Zhang et al., 2016).

Een andere, nog niet gecertificeerde, methode is het toevoegen van specifieke aromaten als additief (zogenaamde 'one-percenters' zoals benzylalcohol, benzaldehyde, methylbenzonaat en acetofenon). (Al-Nuaimi et al., 2016).

Beide methoden (bijmengen met conventionele kerosine en toevoegen van specifieke aromaten) zijn onderzocht door Al-Nuaimi et al. (2016) voor GTL-kerosine. Daarbij vonden ze onder andere dat mengsels met Jet A-1 pas in alle eigenschappen (inclusief dichtheid) voldoen aan ASTM D1655 bij een Jet A-1 percentage tussen 75 en bijna 100%, waarbij het aromaatgehalte tussen 16% en 18% ligt.

Synthetische FT-kerosine kan overigens ook geproduceerd worden mét aromaten (FT-SKA); deze brandstof is inmiddels ook gecertificeerd tot maximaal 50% in conventionele kerosine (Richter et al., 2018).

Volgens Kick et al. (2012) hebben genoemde kerosinemengsels mogelijk wel invloed op de laminaire vlamsnelheid, die weer enige gevolgen zou kunnen hebben voor het straalturbinebrander design en de verbrander. De gegevens hierover zijn vooralsnog echter zeer beperkt. Volgens Richter et al. (2018) vertonen CTL- en GTL-kerosine echter een vergelijkbaar verbrandingsgedrag als conventionele kerosine (Jet A-1), met name wat betreft verbrandingssnelheid en ontstekingsvertraging.

Volgens Janic (2018) zijn voor het commerciële gebruik van SPK in de huidige mengsels vooralsnog geen aanpassingen nodig geweest van conventionele vliegtuigmotoren. Dat impliceert volgens Janic dat bij een toenemend aandeel van alternatieve brandstoffen zulke veranderingen efficiënt en effectief opgevangen kunnen worden door de huidige en toekomstige vliegtuigen.

3.5.2 Infrastructuur op vliegvelden

Volgens Janic (2018) hebben FT-brandstoffen een aantoonbaar vergelijkbaar gedrag als conventionele kerosine voor wat betreft [compatibiliteit met vliegtuigapparatuur en] de bestaande brandstof-infrastructuur op de grond. Als de synthetische kerosine bijgemengd wordt voor deze het vliegveld bereikt, zijn er dus geen gevolgen.

3.6 Gevolgen voor landgebruik en voedselproductie

Omdat bij de productie van GTL- en CTL-brandstoffen fossiele bronnen (aardgas en steenkool) worden gebruikt als feedstock, leggen alleen de productieplants en de benodigde infrastructuur voor de winning van grondstoffen en het transport van grondstoffen en eindproducten potentieel beslag op land dat anders eventueel voor voedselproductie ingezet had kunnen worden. Er zijn uit de geraadpleegde literatuur echter geen gevolgen hiervoor bekend.

3.7 Beschikbaarheid naar volume en tijd

3.7.1 CTL-kerosine

Kolenvergassing is al 100 jaar commercieel en sinds 4 decennia in gebruik voor stroomopwekking. In Zuid-Afrika draait een fabriek van Sasol op commerciële schaal voor de productie van CTL-brandstof. Als alternatief voor de vergassingsroute ('indirect coal liquefaction') van Sasol, heeft de Shenhua groep in China een commerciële CTL-fabriek gebouwd die gebaseerd is op 'direct coal liquefaction' technologie (Floudas et al., 2012).

Sasol maakte in 2012 160 kBD (kilobarrel per dag) uit CTL, maar vooral voor auto's. China hoopt binnen een jaar of 5 á 10 (na 2013) rond de 400 kBD uit CTL te maken, goed voor een vermindering van de olie-import van 5 à 10% (Liu et al., 2013).

Voor specifiek vliegtuigbrandstof wordt binnen niet al te lange tijd een mondiale productie van ca. 75 kBD uit CTL verwacht (Liu et al., 2013), ofwel 3.55 Tg of 156 PJ per jaar (op basis van een dichtheid van CTL-kerosine van 816 kg/m³ (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Kick et al., 2012) en een specifieke energie van 44 MJ/kg). Dit zou op jaarbasis neerkomen op 1.3% van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (90 miljard gallon (Statista, 2018), ofwel ca. 273 Tg (op basis van een gemiddelde dichtheid van conventionele kerosine van 800 kg/m³)) of op ongeveer de totale jaarlijkse afzet van kerosine op Schiphol over 2014 (3.525 Tg (CBS, 2018)). Prognoses voor de toekomstige productie zijn in de geraadpleegde literatuur niet gevonden.

3.7.2 GTL-kerosine

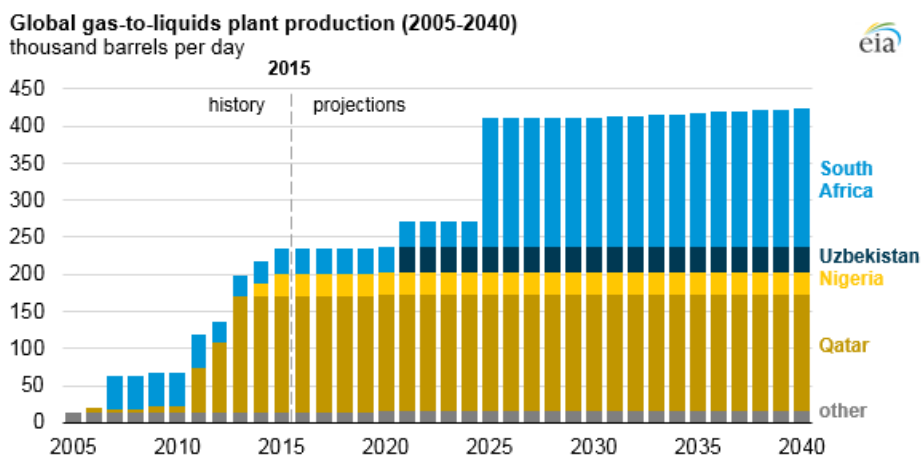
GTL is de meest vercommercialiseerde FT-technologie, hoofdzakelijk door de behoefte aan het benutten van zogenaamde 'stranded' (ongebruikt om fysische of economische redenen) aardgas-reserves wereldwijd. Sasol heeft sinds juni 2006 de ORYX GTL fabriek in Qatar operationeel met een productie van 34 kBD aan diesel, nafta en LPG-producten. Sindsdien heeft Sasol gekeken naar zowel uitbreiding van het ORYX project tot een productie van 100 kBD als naar de ontwikkeling van een nieuwe fabriek in Nigeria. 'Recent' (2011) heeft Shell het Pearl GTL-project gelanceerd in Qatar, met een capaciteit van in totaal 260 kBD aan lichte olieproducten en olie-equivalente brandstoffen. Een grote zorg bij de productie van GTL is echter de onzekerheid over de kapitaalkosten van de fabriek (zie ook §3.4) (Floudas et al., 2012).

Een GTL-fabriek van Shell in Maleisië produceert sinds 1993 circa 15 kBD aan op kerosine gelijkende brandstof. De nieuwe GTL-fabriek van Shell in Qatar is hierop gebaseerd en produceert 140 kBD aan vloeibare brandstof (GTL), waarvan 12 kBD als synthetische kerosine. Gebaseerd op de in 2014 geplande productie in Maleisië, Qatar en Zuid-Afrika werd geschat dat de wereldwijde productie van GTL-brandstof in 2017 circa 200 á 300 kBD zal zijn, waarvan tot een kwart (50 tot 75 kBD, ofwel 2.14-3.21 Tg (94-141 PJ)) aan vliegtuigbrandstof (Liu et al., 2013) (op basis van een dichtheid van GTL-kerosine van 738 kg/m³ (Braun-Unkhoff & Riedel, 2015; Kick et al., 2012) en een specifieke energie

van 44 MJ/kg). Dit komt overeen met 0.8-1.2% van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (zie boven).

Ook methaan verkregen uit biogas (als hoofdcomponent) kan verwerkt worden tot een hernieuwbare (biogene) GTL-brandstof, maar vooralsnog bestaat er geen fabriek en staat er ook geen in de planning voor de nabije toekomst. Wat betreft beschikbaarheid (van synthetische brandstoffen), bestaat vooralsnog alleen het FT-proces met steenkool of aardgas als feedstock op industriële schaal (Richter et al., 2018).

Volgens Sajjad et al. (2014) geeft de recente opkomst van grootschalige GTL-plants aan dat er een toenemende vraag naar GTL-producten is. Figuur 2 geeft de historie en projectie weer van de wereldwijde GTL-productie vanaf 2005 tot 2040 volgens een referentiescenario van de U.S. Energy Information Administration (EIA, 2017).



Figuur 2 Historie en projectie van de mondiale GTL-productie 2005-2040 volgens referentiescenario (overgenomen van EIA (2017))

De EIA (2017) schatte de mondiale productie van GTL-faciliteiten in 2017 rond 230 kBD, ofwel circa 0.2 % van de totale vloeistoffenproductie. Begin 2017 kwam meer dan 90% van deze GTL-productie uit 4 projecten: 2 in Qatar, 1 in Zuid-Afrika en 1 in Nigeria. In Tabel 7 staan schattingen (voor 2017) van de mondiale GTL-kerosineproductie bij een kerosineproductieaandeel van 25 vol% (Liu et al., 2013) en 75 vol% (technisch maximaal haalbaar, zie §3.1) van de geschatte mondiale GTL-productie. Deze productie is ook uitgedrukt als percentage van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart in 2017 (zie boven).

Op basis van de projectie uit Figuur 2 van de mondiale GTL-productie voor 2040 (ca. 425 kBD), zijn ook schattingen gemaakt (voor 2040) van de mondiale GTL-kerosineproductie bij een kerosineproductieaandeel van 25 vol% en 75 vol% van deze projectie, en van het percentage hiervan ten opzichte van de geprojecteerde mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2040¹⁾ (Tabel 7).

Tabel 7 Schattingen en projecties van de mondiale GTL-kerosineproductie in 2017 en 2040

Jaar	Bij 25% productieaandeel GTL			Bij 75% productieaandeel GTL		
	(Tg)	(PJ)	(%)*	(Tg)	(PJ)	(%)*
2017	2.46	108	0.9	7.4	325	2.7
2040	4.55	200	0.7-1.0	13.7	600	2-3

^{*})Percentage van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2017 (ca. 273 Tg), resp. 2040 (630, resp. 440 Tg)¹⁾.

¹⁾De mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie in 2040 is, afhankelijk van het gekozen ACCRI-2050 (Aviation Climate Change Research Initiative) scenario, bepaald op ca. 630 Tg (2050-Base scenario), resp. 440 Tg (2050-S1 en 2050-S2 scenario's, beide uitgaande van 2% jaarlijkse verbetering van de brandstofefficiëntie tot 2050), op basis van interpolaties voor 2040 m.b.v. de historische waarden van 2006 (188 Tg; Brasseur et al. (2016)) en 2017 (273 Tg; Statista (2018)), en de geprojecteerde scenariowaarden voor 2050 (903 Tg, resp. 514 Tg; Brasseur et al. (2016)).

In haar International Energy Outlook 2017 (IEO2017) referentiescenario verwacht de EIA niet dat tot 2040 nog andere grootschalige GTL-fabrieken gebouwd of uitgebreid zullen worden (EIA, 2017). Veel eerder geplande uitbreidingen van bestaande faciliteiten zijn op 'hold' gezet en nieuwe uitbreidingen worden niet verwacht onder de voorziene marktcondities. De meeste nieuwe GTL-capaciteit zal afkomstig zijn van de conversie van Sasol's CTL-fabriek in Zuid-Afrika naar een GTL-faciliteit (verwacht in 2024). Ook wordt verwacht dat een eerder uitgestelde GTL-faciliteit in Oezbekistan tegen 2021 in de lucht komt.

Los van deze projecten verwacht de EIA dat de resterende groei in GTL-output afkomstig zal zijn van relatief kleine faciliteiten met een capaciteit van 5 kBD of minder. Die kleine GTL-faciliteiten kunnen modulair worden ingezet in aardgas producerende regio's met onvoldoende infrastructuur om aardgas te transporteren.

In haar hoge olieprijs-scenario verwacht de EIA een prikkelwerking van een veel hogere olieprijs om nieuwe GTL-fabrieken te bouwen of capaciteit uit te breiden van bestaande fabrieken. De mondiale GTL-productie zal dan blijven toenemen tussen 2025 en 2040. In haar lage olieprijs-scenario komt het Oezbekistan-project nog steeds online, maar zullen na 2021 geen andere projecten meer volgen.

4. Discussie en conclusies

4.1 Discussie

Het voordeel van synthetische GTL- en (in mindere mate) CTL-kerosine boven conventionele kerosine zit vooral in een schonere verbranding en een lagere uitstoot, die vooral op lokaal niveau van de leefomgeving van vliegvelden gunstig kan uitpakken. Van klimaatvoordeel voor wat betreft de emissie van broeikasgassen over de gehele levenscyclus is echter geen sprake (integendeel) en bij de productie van CTL-kerosine is bovendien CCS-technologie noodzakelijk.

De volledige inzetbaarheid van GTL- (en CTL-)kerosine wordt vooralsnog vooral beperkt door het gebrek (GTL) of tekort (CTL) aan aromaten. Om GTL- (en CTL-)kerosine ruimer (in zuivere vorm) in te kunnen zetten, zijn oplossingen nodig voor de technologische problemen die door dit gebrek ontstaan. Te denken valt onder meer aan andere materialen voor de vervaardiging van brandstofpakkingen. De status van het onderzoek hiernaar is niet meegenomen in deze studie.

Een alternatief materiaal zou dan een aanpassing vergen van de huidige vliegtuigbrandstofsysteem. De vraag of zo'n aanpassing rendabel is, gezien de hogere prijs en de beperkte beschikbaarheid van deze synthetische kerosinesoort ten opzichte van conventionele kerosine, is verder niet onderzocht.

Een andere oplossing zou kunnen zijn om aromaten als additief toe te voegen aan GTL- (en CTL-) kerosine of door bij te mengen met synthetische kerosine met een hoger aromaatgehalte (bijvoorbeeld FT-SKA), in plaats van met conventionele kerosine. Hierdoor kan de kerosine weliswaar volledig synthetisch worden gemaakt, maar blijft het nadeel van de aanwezigheid van aromaten voor wat betreft de emissie van toxische stoffen in stand. Verder onderzoek hiernaar is in deze studie niet meegenomen.

Als enig mogelijk klimaatvoordeel van GTL- en (in mindere mate) CTL-kerosine is de verwachte afname van de vorming van contrails te noemen bij gebruik van deze synthetische kerosinesoorten, door een afname van de vorming van aerosolen. Contrails dragen bij aan de netto opwarming van het klimaat op aarde (Brasseur et al., 2016). Een verdere uitdieping van dit mogelijke voordeel valt buiten de scope van deze studie.

Omdat GTL- en CTL-kerosine (evenals conventionele kerosine) zijn gebaseerd op fossiele feedstock, dragen deze synthetische kerosinesoorten niet bij aan een vermindering van het gebruik hiervan. Vooral steenkool als grondstof komt bovendien steeds meer onder druk te staan vanwege de hoge CO₂-emissie bij het omzettingsproces.

In dit onderzoek is enkel naar separate productielijnen gekeken. Er zijn ook samengestelde productielijnen denkbaar die hybride vliegtuigbrandstofcombinaties opleveren met synergetische eigenschappen. Volgens Floudas et al. (2012) kunnen op die manier de voordelen van GTL- en CTL-brandstoffen (hogere energiedichtheid) en van Biomass-to-Liquid (BTL) brandstoffen (lagere broeikasgasemissies) ten opzichte van conventionele brandstoffen benut worden. Met name CBTL (Coal-and-Biomass-to-Liquid) en CBGTL (Coal-Biomass-and-Gas-to-Liquid) systemen worden onderzocht. Ook Baliban et al. (2013) noemen naast CGTL, BGTL en CBGTL als voorbeelden van hybride systemen.

De toekomstperspectieven voor GTL- en CTL-kerosine zijn nogal onzeker in verband met de (sterke) afhankelijkheid van de olieprijs (GTL) en de ontwikkeling van meer 'duurzame' synthetische kerosine-soorten (met name Power-to-Liquid) en van alternatieve meer 'duurzame' vormen van voortstuwing (met name elektrisch en waterstof). Gezien deze onzekere toekomstperspectieven is het onzeker of GTL- en (zeker) CTL-kerosine geschikte alternatieven kunnen zijn op de langere termijn (na ca. 2050).

4.2 Conclusies

De milieuwetenschappelijke hoofdvraag ("Wat zijn de milieu-, klimaat-, financiële, infrastructurele en technologische gevolgen van productie en gebruik van synthetische GTL- (en CTL-)kerosine") kan als volgt beantwoord worden, opgesplitst naar deelvraag.

- 1) *Welke stoffen die tot toxische emissies aanleiding geven, bevat deze brandstof en tot welke toxische emissies leidt dat?*
Deze brandstof bevat in zuivere vorm weinig (CTL) of een te verwaarlozen (GTL) hoeveelheid aromaten en zwavel. Dit leidt tot een schonere verbranding dan conventionele kerosine met minder uitstoot van met name fijnstof, roet, koolwaterstoffen en aerosolen. Maar omdat FT-SPK in de praktijk bijgemengd moet worden met conventionele kerosine worden deze voordelen deels gereduceerd.
- 2) *Hoeveel CO₂-equivalenten komen er, over de gehele levensloop van deze brandstof gerekend, vrij per kg brandstof en per GJ energie-inhoud van de brandstof?*
De lifecycle broeikasgasemissie van GTL-kerosine is ca. 100 kg CO₂,eq/GJ, van CTL (zonder CCS) ca. 195 kg CO₂,eq/GJ en van CTL (met CCS) 95 kg CO₂,eq/GJ. Dit is (weinig tot veel) meer dan conventionele kerosine (ca. 87 kg CO₂,eq/GJ). Deze waarden komen overeen met respectievelijk ca. 4.4 (GTL), 8.6 (CTL zonder CCS), 4.2 (CTL met CCS) en 3.7 (conventioneel) kg CO₂,eq/kg brandstof. Van klimaatvoordeel is in dit opzicht dus geen sprake.
- 3) *Wat kost de brandstof?*
De prijs van GTL-kerosine is sterk afhankelijk van de ruwe olieprijs en de aardgasprijs. Bij een modaal olieprijsscenario is de prijs van GTL-kerosine ongeveer 25% hoger dan van conventionele kerosine; hierbij is de minimale verkoopprijs van GTL-kerosine (obv Shell Pearl/GTL) \$0.99/l (\$1.23/kg) tegen \$0.79/l (\$0.99/kg) voor conventionele kerosine (2014). CTL is minder afhankelijk van de grondstofprijs maar kan alleen hetzelfde kostenprofiel aannemen als GTL in combinatie met CCS (info uit 2014).
- 4) *Wat zijn de gevolgen bij ingebruikname?*
 - a) *Voor vliegtuigen?*
Bij volledig vliegen op GTL/CTL-kerosine bestaat risico op lekkende pakkingen in het brandstofsysteem door een gebrek aan aromaten in deze vliegtuigbrandstof. FT-SPK (waaronder GTL- en CTL-kerosine) is gecertificeerd en gedefinieerd als 'drop-in' vliegtuigbrandstof, die zonder enige wijziging aan bestaande vliegtuigen kan worden gebruikt in een mengsel met conventionele kerosine.
 - b) *Voor de infrastructuur op vliegvelden?*
Geen gevolgen voor 'drop-in' vliegtuigbrandstoffen (zie a).
 - c) *Voor landgebruik en voedselproductie?*
Eventueel benodigd land voor productieplants en benodigde infrastructuur (onbekend).
- 5) *Wat is de (realistisch) haalbare beschikbaarheid naar volume en tijd?*
GTL- en vooral CTL-brandstoffen zijn al decennia beschikbaar. Voor CTL-kerosine werd kort na 2013 een mondiale productie van ca. 3.55 Tg/yr (156 PJ/yr) verwacht. Dit komt overeen met 1.3% van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart (2017).

Er was in 2014 vooral een toenemende vraag naar GTL-producten. De geschatte wereldwijde productie van GTL-kerosine in 2017 bedroeg ca. 2.1-3.2 Tg (90-140 PJ). Dit komt overeen met 0.8-1.2% van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie door de commerciële luchtvaart maar zou bij een maximaal productieaandeel van kerosine ca. 2.7% kunnen bedragen. De projectie van de mondiale GTL-productie is sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de ruwe olieprijs. Op basis van een referentiescenario van de EIA zal het geschatte aandeel van GTL-kerosine in 2040 maximaal ca. 3% kunnen zijn van de mondiale vliegtuigbrandstofconsumptie.

5. Aanbevelingen

Voor BVM2 kan het volgende lobbyplan worden opgesteld ten aanzien van GTL- en CTL-kerosine.

- Stuur aan op het ontwikkelen van de logistiek voor (en) het gebruik van GTL-kerosine, weliswaar als 50% mengsel met conventionele kerosine, als een te verantwoorden (maar duurder), voorlopig (enkele decennia?) alternatief voor de invulling van de brandstofvoorziening van het vliegverkeer. Dit met het oog op de lagere uitstoot van toxische stoffen op lokaal niveau (omgeving vliegvelden). Lobbyen voor het gebruik van CTL-kerosine wordt vanwege de veel grotere klimaatbelasting ontraden.
- Stuur aan op onderzoek naar mogelijkheden om GTL-kerosine (en andere synthetische paraffine kerosine) ruimer (in zuivere vorm) in te kunnen zetten. Te denken valt onder andere aan onderzoek naar andere materialen voor de vervaardiging van brandstofpakkingen, die voor hun afdichting niet afhankelijk zijn van aromaten.
- Stuur aan op verder onderzoek naar synergetische, hybride vliegtuigbrandstofcombinaties waarmee de voordelen van GTL-kerosine en van bijvoorbeeld biokerosine ten opzichte van conventionele kerosine benut kunnen worden.
- Ondersteun de ontwikkeling van meer 'duurzame', nog schonere vliegtuigbrandstoffen voor de langere termijn (na ca. 2050), ook gezien de onzekere toekomstperspectieven voor GTL-kerosine.

Literatuur

- Airbus. (2018). Global market forecast 2018-2037. Retrieved from <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>
- Al-Nuaimi, I. A., Bohra, M., Selam, M., Choudhury, H. A., El-Halwagi, M. M., & Elbashir, N. O. (2016). Optimization of the Aromatic/Paraffinic Composition of Synthetic Jet Fuels. *Chemical Engineering & Technology*, 39(12), 2217-2228. doi:10.1002/ceat.201500513
- Badami, M., Nuccio, P., Pastrone, D., & Signoretto, A. (2014). Performance of a small-scale turbojet engine fed with traditional and alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 82, 219-228. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.026
- Baliban, R. C., Elia, J. A., & Floudas, C. A. (2013). Novel Natural Gas to Liquids Processes: Process Synthesis and Global Optimization Strategies. *AIChE Journal*, 59(2), 505-531. doi:10.1002/aic.13996
- Beyersdorf, A. J., Timko, M. T., Ziemba, L. D., Bulzan, D., Corporan, E., Herndon, S. C., . . . Anderson, B. E. (2014). Reductions in aircraft particulate emissions due to the use of Fischer-Tropsch fuels. *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS*, 14(1), 11-23. doi:10.5194/acp-14-11-2014
- Blakey, S., Rye, L., & Wilson, C. W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 2863-2885. doi:10.1016/j.proci.2010.09.011
- 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
- Braun-Unkhoff, M., & Riedel, U. (2015). Alternative fuels in aviation. *CEAS Aeronautical Journal*, 6(1), 83-93. doi:10.1007/s13272-014-0131-2
- Braun-Unkhoff, M., Riedel, U., & Wahl, C. (2017). About the emissions of alternative jet fuels. *CEAS Aeronautical Journal*, 8(1), 167-180. doi:10.1007/s13272-016-0230-3
- CBS. (2018). Brandstofverbruik lucht- en scheepvaart. Retrieved from <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatschappij/verkeer-en-vervoer/transport-en-mobiliteit/energie-milieu/energieverbruik-van-vervoermiddelen/categorie-energieverbruik/brandstofverbruik-lucht-en-scheepvaart>
- EIA. (2017). Global gas-to-liquids growth is dominated by two projects in South Africa and Uzbekistan. *International Energy Outlook 2017*. Retrieved from <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33192>
- FAA. (2018). FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2018-2038. Retrieved from https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/
- Floudas, C. A., Elia, J. A., & Baliban, R. C. (2012). Hybrid and single feedstock energy processes for liquid transportation fuels: A critical review. *Computers and Chemical Engineering*, 41, 24-51. doi:10.1016/j.compchemeng.2012.02.008
- Janic, M. (2018). An assessment of the potential of alternative fuels for "greening" commercial air transportation. *JOURNAL OF AIR TRANSPORT MANAGEMENT*, 69, 235-247. doi:10.1016/j.jairtraman.2017.09.002
- Jovanović, A. S., Klimek, P., & Quintero, F. A. (2015). Forecast for the use of alternative fuels in aviation under environmental constraints and volatile market conditions. *Environment Systems and Decisions*, 35(4), 521-531. doi:10.1007/s10669-015-9573-2
- Kick, T., Herbst, J., Kathrotia, T., Marquetand, J., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., & Riedel, U. (2012). An experimental and modeling study of burning velocities of possible future synthetic jet fuels. *Energy*, 43(1), 111-123. doi:10.1016/j.energy.2012.01.035
- Liu, G., Yan, B., & Chen, G. (2013). Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 59-70. doi:10.1016/j.rser.2013.03.025

- Luchtvaarttafel. (2014). *Deelrapport brandstofvisie duurzame luchtvaart; Reductie van emissies en kosten door daadwerkelijke groene groei*. Retrieved from <https://www.energieakkoordser.nl/~media/files/energieakkoord/nieuwsberichten/2014/brandstofvisie/deelrapport-brandstofvisie-duurzame-luchtvaart.ashx>
- Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., & Riedel, U. (2018). Paths to alternative fuels for aviation. *CEAS Aeronautical Journal*, 9(3), 389-403. doi:10.1007/s13272-018-0296-1
- Sajjad, H., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Arbab, M. I., Imtenan, S., & Rahman, S. M. A. (2014). Engine combustion, performance and emission characteristics of gas to liquid (GTL) fuels and its blends with diesel and bio-diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 961-986. doi:10.1016/j.rser.2013.11.039
- Statista. (2018). Total fuel consumption of commercial airlines worldwide between 2005 and 2018. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>
- Vallentin, D. (2008). Policy drivers and barriers for coal-to-liquids (CtL) technologies in the United States. *Energy Policy*, 36(8), 3198-3211. doi:10.1016/j.enpol.2008.04.032
- Withers, M. R., Malina, R., Gilmore, C. K., Gibbs, J. M., Trigg, C., Wolfe, P. J., . . . Barrett, S. R. H. (2014). Economic and environmental assessment of liquefied natural gas as a supplemental aircraft fuel. *Progress in Aerospace Sciences*, 66, 17-36. doi:10.1016/j.paerosci.2013.12.002
- 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

Bijlage A: Literatuuronderzoek (A)

Zoektermen, aantal 'hits' en aantal relevante artikelen (tussen haakjes excl. 'bio bijvangst')

zoekterm	#hits	#relevant (excl. Bio)
1 "gas to liquid" AND kerosene	3908	15 (11)
2 GTL AND kerosene	351	21 (17)
3 CTL AND kerosene	162	20 (16)
4 GTL AND CTL AND kerosene	103	23 (19)
5 GTL AND kerosene AND GHG	58	20 (15)
6 GTL AND kerosene AND emissions	231	34 (25)
7 GTL AND kerosene AND LCA	21	3 (2)
8 GTL AND kerosene AND lifecycle	20	8 (4)
9 GTL AND kerosene AND "well to tank"	10	5 (3)
10 "gas to liquid" AND kerosene AND LCA	56	6 (3)
11 GTL AND kerosene AND "well to wake"	4	4 (3)
12 GTL AND kerosene AND "well to wing"	11	2 (1)
13 GTL AND kerosene AND "tank to wing"	3	1 (0)
14 GTL AND kerosene AND "tank to wake"	4	4 (3)
15 CTL AND kerosene AND LCA	9	6 (4)

Bijlage B: Literatuuronderzoek (B)

Ranking van meest gevonden artikelen naar aantal zoekterm 'hits' ('bio bijvangst' in rood, afgevalen artikelen cursief)

Auteur	Titel	Tijdschrift	jaar	Search Engine	#hits
Jovanović et al.	Forecast for the use of alternative fuel in aviation under environmental constraints and volatile market conditions	Environment Systems & Decisions	2015	SpringerLink	10
Blakley et al.	Aviation gas turbine alternative fuels-A review	Proceedings of the Combustion Institute	2011	Science Direct	9
Swain et al.	Biomass to liquid: A prospective challenge to research and development in 21st century	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2011	Science Direct	8
Wang et al.	Bio-jet fuel conversion technologies	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2016	Science Direct	8
Forman et al.	Life cycle analysis of GTL derived linear alkyl benzene	Journal of Cleaner Production	2013	Science Direct	7
Liu et al.	Technical review on jet-fuel production	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2014	Science Direct	6
Chiaramonti et al.	Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation fuels	Applied Energy	2014	Science Direct	6
Neuling et al.	Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels	Fuel Processing Technology	2018	Science Direct	6
Sajjad et al.	Engine combustion, performance and emission characteristics of GTL fuels and its blends with (bio) kerosene	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2014	Science Direct	6
Dagaouti et al.	Experimental and detailed kinetic model for the oxidation of a GTL jet fuel	Combustion and Flame	2014	Science Direct	5
Kick et al.	An experimental and modeling study of burning velocities of possible future synthetic jet fuels	Energy	2012	Science Direct	5
Braun-Unkthoff et al.	Alternative fuels in aviation	CEAS Aeronautical Journey	2015	SpringerLink	5
Zhang et al.	Recent development in studies of alternative jet fuel combustion	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2016	Science Direct	5
Braun-Unkthoff et al.	About the interaction between composition and performance of alternative jet fuels	CEAS Aeronautical Journey	2016	SpringerLink	5
Braun-Unkthoff et al.	About the emissions of alternative jet fuels	CEAS Aeronautical Journey	2017	SpringerLink	5
Yilmaz et al.	Sustainable alternative fuels in aviation	Energy	2017	Science Direct	4
Baliban et al.	Novel natural gas to liquid processes: process synthesis and global optimization strategies	AIChE Journal	2013	Wiley	4
Richter et al.	Paths to alternative fuels for aviation	CEAS Aeronautical Journey	2018	SpringerLink	4
Hui et al.	Experimental studies on the combustion characteristics of alternative jet fuels	Fuel	2012	Science Direct	4
Rojo et al.	Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols	Fuel	2015	Science Direct	4
Keramatis et al.	Performance investigation of FT kerosene blends in a laboratory-scale premixed flame burner	Experimental Thermal and Fluid Science	2012	Science Direct	4
Mahajanani et al.	A techno-economic assessment of GTL and CTL plants through the development of scale factors	Energy	2018	Science Direct	4
Withers et al.	Economic and environmental assessment of liquefied natural gas as a supplemental aircraft fuel	Progress in Aerospace Sciences	2014	Science Direct	4
Al-Nuaimi et al.	Optimization of the aromatic/paraffinic composition of synthetic jet fuels	Chemical Engineering Technology	2016	Wiley	3
Badami et al.	Performance of a small-scale turbojet engine fed with traditional and alternative fuels	Energy Conversion and Management	2014	Science Direct	3
Wang et al.	Autoignition studies of conventional and Fischer Tropsch jet fuels	Fuel	2012	Science Direct	3
Gawron et al.	Impact of a Jet A-1/HEFA blend on the performance and emission characteristics of a miniature turbojet engine	Int. Journal of Environmental Science & Technol	2018	SpringerLink	3
Janic et al.	An assessment of the potential of alternative fuels for "greening" commercial air transportation	Journal of Air Transport Management	2018	Science Direct	3
Lamas et al.	Bio-kerosene from coconut and palm kernel oils-production and properties of their blends with fossil fuels	Fuel	2012	Science Direct	3
Gaspar et al.	Impact of alternative fuels on the operational and environmental performance of a small turbofan engine	Energy Conversion and Management	2016	Science Direct	3
Hendricks et al.	Aviation biofuel from renewable resources-routes, opportunities and challenges	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2015	Science Direct	3
Kandaramath Hari et al.	Particulate emissions hazards associated with fueling heat engines	Computers & Chemical Engineering	2015	Science Direct	3
Ella et al.	Strategic planning optimization for natural gas to liquid transportation fuel (GTL) systems	Computers & Chemical Engineering	2015	Science Direct	3
Floudas et al.	Hybrid and single feedstock energy processes for liquid transportation fuels: A critical review	Computers & Chemical Engineering	2012	Science Direct	3
Neuling et al.	Conversion routes for production of bio-kerosene-status and assessment	Biomass Conversion and Biorefinery	2015	SpringerLink	2
Vouras et al.	Spray characteristics of alternative aviation fuel blends	Aerospace	2017	?	2
Zhou et al.	Scenario analysis of CO2 emissions from China's civil aviation industry through 2030	Applied Energy	2016	Science Direct	2
Da Silva Almeida et al.	Performance of thermochemical conversion of fat, oils and grease into kerosene-like hydrocarbons	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	2016	Science Direct	1
Kannaiyan et al.	Experimental investigation of spray characteristics of alternative aviation fuels	Energy Conversion and Management	2014	Science Direct	1
Gardzi et al.	Thermochemical BTL process: bench-scale experimental results and projected economics of a combined BTL and bioethanol process	Science Direct	2013	Science Direct	1
Buffi et al.	Emissions characterization tests for hydrotreated renewable jet fuel from used cooking oil and its bioproducts	Science Direct	2017	Science Direct	1
Li et al.	Quantification of aldehydes emissions from alternative and renewable aviation fuels using a gas chromatography-mass spectrometry method	Science Direct	2014	Science Direct	1
Gutiérrez-Antonio et al.	A review on the production processes of renewable jet fuel	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2017	Science Direct	0
König et al.	Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO2 and H2	Energy	2015	Science Direct	0

Bijlage C: Verkorte samenvattingen GTL/CTL uit verzamelstaat

Zie los supplement.

NB: In deze bijlage zijn 6 deelvragen beantwoord in plaats van 5 (zie §1.3); de extra deelvraag is "Welke toxische stoffen worden door de verbranding van conventionele kerosine uitgestoten of gevormd en volgens welk proces verloopt dat?", welke als deelvraag 1 is opgenomen in deze bijlage en alleen voor conventionele kerosine hoeft te worden beantwoord (zie daarvoor de betreffende deelonderzoeksrapportage). De deelvragen 2 t/m 6 in deze bijlage corresponderen daardoor met de deelvragen 1 t/m 5 in §1.3.

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
www.ou.nl/nw
www.Incompany-milieuadvies.nl

