

항공분야 온실가스 감축을 위한 바이오항공유 제조기술

김재곤[†] · 박조용 · 임의순 · 민경일 · 박천규 · 하종한
한국석유관리원 석유기술연구소

Bio-Jet Fuel Production Technologies for GHG Reduction in Aviation Sector

JAE-KON KIM[†], JO YONG PARK, EUI SOON YIM, KONG-IL MIN,
CHEON-KYU PARK, JONG-HAN HA

Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
Chungcheongbuk-do, 28115, Korea

Abstract >> This study presents the biomass-derived jet (bio-jet) fuel production technologies for greenhouse gas (GHG) reduction in aviation sector. The aviation sector is responsible for the 2% of the world anthropogenic CO₂ emissions and the 10% of the fuel consumption: airlines' costs for fuel reach 30% of operating costs. In addition, the aviation traffic is expected to double within 15 years from 2012, while fuel consumption and CO₂ emissions should double in 25 years. Biojet fuels have been claimed to be one of the most promising and strategic solutions to mitigate aviation emissions. This jet fuel, additionally, must meet ASTM International specifications and potentially be a 100% drop-in replacement for current petroleum jet fuel. In this study, the current technologies for producing renewable jet fuels, categorized by alcohols-to-jet, oil-to-jet, syngas-to-jet, and sugar-to-jet pathways are reviewed for process, economic analysis and life cycle assessment (LCA) on conversion pathways to bio-jet fuel.

Key words : Biofuels(바이오연료), Aviation(항공유), Bioenergy(바이오에너지), LCA(전주기분석)

1. 서 론

전 세계적으로 화석연료의 고갈에 따른 에너지원 다양화와 기후변화에 따른 온실가스 감축의 한 수단으로 바이오 연료를 개발하여 사용을 확대하는 추세이다¹⁻⁵⁾. 한편, 기후변화 문제 해결을 위해 항공 부문에서의 온실가스 감축 필요성이 대두함에 따라 국제 사회의 규제 및 대응 움직임이 활발하다. 전 세계 항

공분야에서 항공승객은 30억 이상으로 매년 약 5% 증가하고 있으며, 이로 인해 석유제품 기반 항공유가 연간 약 15억~17억 배럴을 사용되고 있다⁶⁾. 이러한 항공량 급증에 따라 국제적 항공기 및 공항 주변 배출가스 및 온실가스 관리에 관심이 증대되고 있다. 특히, 세계 항공산업은 전체 CO₂ 배출량의 2%를 차지하고 있어 온실가스 배출량에 대한 감축 방안을 검토하고 있다^{7,8)}. 따라서 세계 항공업계에서는 온실가스 감축을 위하여 바이오연료에의 대처 강화가 진행되고 있으며, 실제로 2020~2030년경부터 많은 항공사에서 바이오항공유(Bio-jet fuel)의 사용이 될 것

[†] Corresponding author : jkkim@kpetro.or.kr

Received : 2015.11.27 in revised form : 2015.12.7 Accepted : 2015.12.30

Copyright © 2015 KHNES

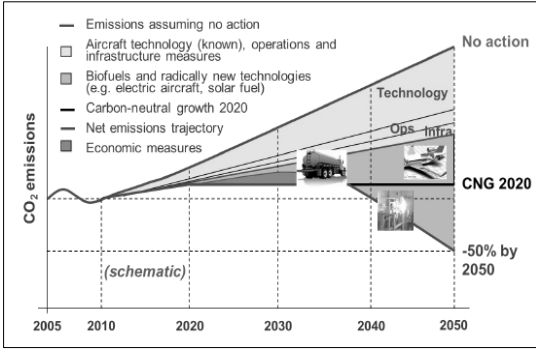


Fig. 1 Contributions to the aviation industry's high-level emissions reduction goals

으로 예상된다(Fig. 1). 실제로 국제 민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization) 및 국제항공 운송협회(IATA, International Air Transport Association)가 2020년 이후 항공 온실가스 감축대책의 하나로 대체 항공기 연료 활용을 촉진하는 것을 표명하고 있다⁹⁾. ICAO가 2020년에 CO₂배출량을 정점으로 하는 목표를 책정했고, IATA는 이를 바탕으로 매년 평균 1.5%의 지속적인 연료 효율을 개선하고, 2050년까지 2005년 대비 CO₂ 배출량 50% 감축이라는 목표를 제시하였다. 따라서 이 목표 달성을 위해서는 절대적으로 바이오항공유가 도입되지 않으면 불가능 것으로 분석되고 있다¹⁰⁾.

그러나 세계 항공업계는 석유자원의 고갈, 에너지 안보, 온실가스 감축 그리고 지속성(sustainability)에 대한 도전을 위하여 막대한 예산을 투자하여 중장기 계획을 수립하여 이행하는 것이 상당한 부담으로 작용하고 있는 것이 현실이다. 이런 측면에서 지속가능한 바이오항공유는 기술적 완성도와 원료수급에 대한 문제는 가지고 있으나, 미국, 유럽 등 세계 각국에서 기술개발이 이루어지고 있으며, 기존 석유계 항공유를 어느 정도는 대체할 수 있을 것으로 평가받고 있다. 바이오 매스 기반 원료를 사용하여 바이오항공유로 전환하여 기술적으로 상업화 규모와 상업화 전 단계에 진입한 상태에 있다⁶⁾. 한편, 국제항공운송협회(IATA)는 바이오항공유의 사용이 항공분야 온실

가스 감축목표를 달성할 수 있는 가장 신뢰할 방안을 검토하였다. 지속가능한 바이오항공유 연료 개발에 대한 로드맵을 설정하였다¹⁰⁾.

본 연구는 항공분야의 온실가스 감축을 위한 항공업계의 바이오매스 기반의 바이오항공유 제조기술을 분석하였고, 개발 중인 바이오항공유의 제조기술에 따른 전환공정, 경제성분석 및 전 주기분석(life cycle assessment (LCA))을 분석하였다.

2. 바이오항공유 제조기술

2.1 바이오항공유의 규격

오일 기반 원료를 사용한 바이오항공유는 수소첨가반응(hydro-treating), 탈산소 반응(deoxygenation) 그리고 이성질화 반응(iso-merization)/크래킹(hydro-cracking) 반응을 통하여 전환된다. 촉매 hydrothermolysis 반응은 트라이글리세라이드(triglyceride)을 가지고 전환된다. 바이오매스 고체 원료는 가스화 반응(gasification)을 통한 중간물질 전환, 생화학적 또는 열화학적 공정을 통한 알코올 전환, 생화학적 공정을 통한 당(sugar) 전환, 급속 열분해 공정을 통한 바이오오일(bio-oil)로 전환된다. 이러한, 합성가스(syngas), 알코올, 당 그리고 바이오 오일은 합성, 발효 또는 촉매 공정을 거쳐 바이오 항공유로 업그레이딩 되어 제조된다.

또한, Fischer-Trosch (F-T) 합성과 오일 hydro-processing 공정을 통해 제조된 바이오항공유는 항공유에 50% 이상 혼합할 수 있도록 ASTM에서 승인되어 규격(D7566)이 있는 상태이다¹⁵⁾. 항공유의 규격에서 요구되는 항목은 1) 최소 에너지 밀도, 2) 최대 허용 빙점 온도(freeze point temperature), 3) 최대 허용 침적(deposit), 4) 최대허용 동점도, 5) 최대허용 황과 방향족 함량, 6) 최대허용 윤활성, 7) 최대 산도, 8) 최소 연료 전기 전도성, 9) 최소허용 인화점 등이다. Table 1은 항공유의 2개의 규격인 민간용과 군용에 대한 기준을 보여 주고 있다¹¹⁾.

항공유는 화재 위험성을 고려하여 높은 인화점을 요구하고 있으며, 또한, 높은 고도에서 유동해야 하므로 보다는 낮은 어는점을 갖는 저온 유동성이 요구되고 있다. 여기서 ASTM D1655는 등유형(kerosene) 항공유 연료를 말하여, 국제항공운송협회(IATA)와 영국 국방성(United Kingdom Ministry of Defense, Defence stadard) 군용으로 인증되어 Table 1과 같은 연료 규격으로 사용되고 있다. 한편, ASTM D 7566은 합성 탄화수소 성분을 함유한 항공 터빈 연료의

규격으로 사용되고 있는데, ASTM D1655 규격¹²⁾을 확장한 규격이다. 이는 기존 등유형 항공유인 ASTM D1655에 혼합하여 안전하게 사용할 수 있도록 항공 대체연료의 생산과 품질조절을 해야 하기 때문이다.

2.2 바이오항공유의 전환 기술범위

현재 상업화된 바이오항공유는 항공기 엔진 성능에 최적화된 등유(kerosene) 기반 항공유의 엄격한

Table 1 Jet fuel specification¹¹⁻¹³⁾

	Jet A-1				JP-8
	ASTM D 1655-04a	IATA	DefStan 91-91	ASTM D7566	MIL-DTL-83,133, specification
Composition	0.1, max	0.015, max	0.012, max	0.1, max	0.015, max
Acidity, total (mg KOH/g)	25, max	25, max	25, max	25, max (8, min)	25, max
Aromatics (vol %)	0.3, max	0.3, max	0.3, max	0.3, max	0.3, max
Sulfur, total (wt %)					
Volatility					
Distillation temperature:					
10% Recovery (°C)	205, max	205, max	205, max	205, max	205, max
20% Recovery (°C)	-	-	-	-	-
50% Recovery (°C)	-	-	-	(15, min)	-
90% Recovery (°C)	-	-	-	(40, min)	-
Final BP(°C)	300, max	300, max	300, max	300, max	300, max
Flash point(°C)	38, min	38, min	38, min	38, min	38, min
Density @15°C (kg/m ³)	775-840	775-840	775-840	775-840	775-840
Fluidity					
Freezingpoint(°C), max	-47	-47	-47	-47JetA; -47JetA-1	-47
Viscosity @ -20°C (cSt)	8, max	8, max	8, max	8, max	8, max
Combustion					
Net heat of comb. (MJ/kg)	42.8, min	42.8, min	42.8, min	42.8, min	42.8, min
Smoke point (mm)	25, min	25, min	25, min	25, min	25, min
Smoke point (mm) and naphthalenes (vol%)	19(min), 3(max)	19(min), 3(max)	19(min), 3(max)	19(min), 3(max)	19(min), 3(max)
Thermal stability					
JFTOT DeltaP@260°C (mmHg)	25, max	25, max	25, max	25, max	25, max
Tube deposit Rating (Visual)	<3	<3	<3	<3	<3
Conductivity					
Conductivity (pS/m)	50-450	50-450	50-600	-	-
Lubricity					
BOCLE wear scar diameter (mm)	-	0.85, max	0.85, max	0.85, max	-

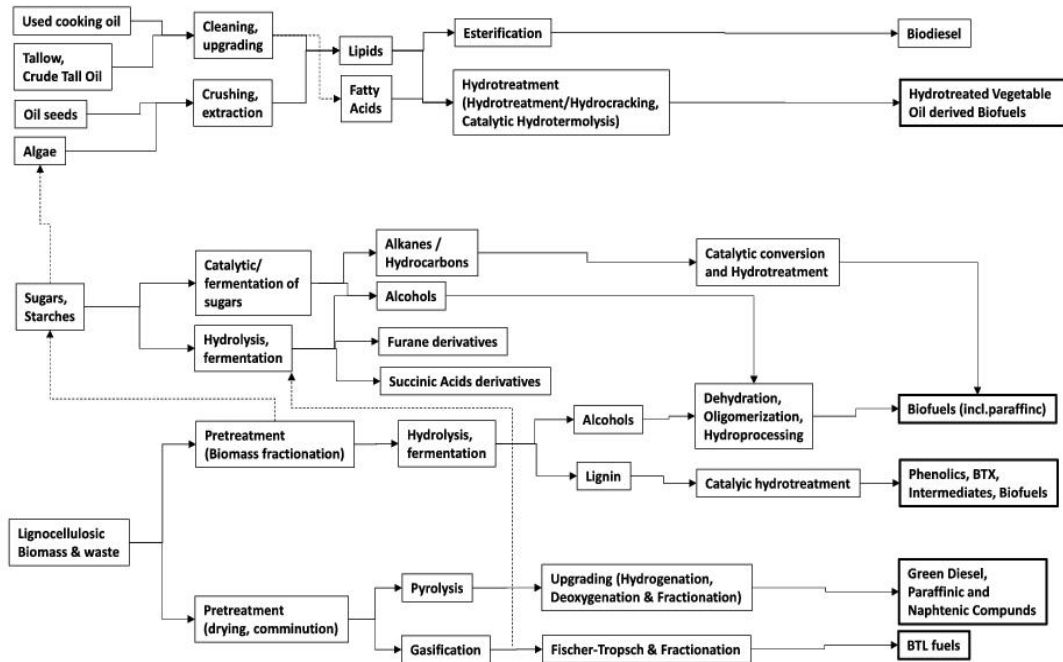


Fig. 2 Main possible pathways to biofuels for possible aviation biofuels production⁶⁾

연료 품질기준에 따라 적정량 혼합하여 사용할 수밖에 없다. 바이오매스로부터 탄화수소로 전환된 바이오 항공유는 다양한 원료에 적합한 공정에 맞게 개발되고 있다^{10,14-17)}. Fig. 2는 다양한 바이오매스 원료로부터 바이오 항공유로 전환할 수 있는 가능한 공정을 보여주고 있다⁶⁾.

첫 번째 기술범위는 전 세계적으로 현재 주로 바이오디젤 원료인 폐식용유, 우지 등의 동·식물성유와 미세조류 등을 사용하고 있다. 이러한 동·식물성유를 전이에스테르화(trans-esterification)를 통하여 제조된 지방산 메틸에스테르(Fatty acid methyl ester, FAME) 형태로 전 세계적으로 수송용 경유에 10% 이내에서 혼합하여 사용하고 있는 바이오디젤이다. 그러나 바이오디젤의 원료를 수소첨가반응(hydro-treatment)을 통하여 얻은 파라핀 구성성분을 가져 기존 FAME 바이오디젤보다 품질을 향상한 HVO (hydro-teated vegetable oil) 연료를 주로 항공유를 대체하고 있다. 이러한 공정은 이미 Neste oil, UOP/Altair, 그리고 Dynamic

fuel 등에서 상업화 중에 있다. 두 번째 기술범위는 당질계(sugar)와 전분질계(starch) 원료로부터 촉매전환 공정 등을 통하여 파라핀 연료로 전환할 수 있다. 당질계 기반 항공유는 Amyris사에서 제안되어 미세 유기체를 사용하여 당을 terpens으로 전환하여 등유와 경유형 탄화수소나 화학물질로 사용되는 공정이다. 그 기술은 종속영양(proprietary heterotrophic) 미세조류(microalgae)를 사용하여 80% 이상 오일을 회수하는 기술을 기반으로 Sozyme사에서 개발되었다. 알코올, 특히 높은 알코올도 탈수, 올리고머 및 수소화 등의 공정을 통해 바이오 연료 생산에 원료가 될 수 있다. 세 번째 기술범위는 목질계 바이오매스를 활용해서 생화학적 경로와 열화학 경로를 활용한 2가지의 가능한 공정을 이용할 수 있다. 목질계 바이오매스를 전처리하여 가수분해 공정을 통해 알코올로 전환해 파라핀 바이오연료로 전환할 수 있다. 전처리 후, 건조원료를 사용하여 급속열분해(fast pyrolysis)를 통해 바이오 오일을 얻고, 탈산소 및 수소첨가 반응

의 업그레딩 공정을 통해 그린디젤, 파라핀 및 나프텐 화합물 함유 바이오연료로 전환할 수 있다. 네 번째 기술범위는 목질계 바이오 매스를 활용하여 가스화를 통해 합성가스(syngas) CO와 H₂를 제조하여 F-T (Fischer-Tropsch) 공정을 통하여 파라핀계 BTL (Biomass-To-Liquid) 바이오연료를 합성할 수 있다¹⁸⁾.

2.3 바이오항공유의 제조기술

알코올로부터 항공유 전환기술을 ATJ (Alcohol-To-Jet)라고하며, 상업규모를 개발한 미국 공군에 의해 2012년 7월에 비행시험 되었다⁹⁾. 동·식물성 오일을 사용한 수소 처리 에스테르 및 지방산 (hydro-

treated esters and fatty acid, HEFA) 또는 수소 처리된 재생연료(hydro-processed renewable jet, HRJ)와 같은 수소화 기술로부터 생산되는 바이오 항공유 (Oil-to-jet (OTJ))는 광범위하게 연구되었다²⁰⁻²¹⁾. F-T 공정으로부터 제조된 바이오항공유(Gas-to-jet (GTJ))는 기존 항공유에 50% 이상 혼합하여 사용할 수 있도록 ASTM 규격으로 최초로 인증되었다²²⁾. STJ (Sugar-to-jet) 제조기술은 당질계로부터 탄화수소 전환으로 발효공정과 촉매적 전환공정으로 개발되었다. 최근에 항공분야에 온실가스 저감기술로 개발 중인 바이오 항공유 제조기술인 ATJ, OTJ, GTJ 및 STJ의 제조 공정을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Jet fuel production pathway in global²³⁾

Category	Pathways	Pathways Companies	U.S. or international agencies	Airline companies/manufacturers
Alcohol to Jet	Ethanol to Jet	Terrabon/MixAlco; Lanza Tech/Swedish Bio-fuels; Coskata	Defense Advanced Research Projects Agency, FAA	Boeing, Virgin Atlantic
	Butanol to Jet	Gevo; Byogy; Albemarle/Colbalt; Solazyme	Navy/NAWCWD, AFRL, DLA, USAF	Continental Airlines; United Airlines
Oil-to Jet	Hydro-processed Renewable Jet (HRJ)	UOP; SG Biofuels; AltAir Fuels; Agrisoma Biosciences; Neste Oil; PetroChina; Sapphire Energy, Syntroleum/Tyson Food; PEMEX; ASA	U.S. Navy, USAF, Netherland Air Force, NASA, Dutch Military, EADS	Boeing, Lufthansa, Virgin Atlantic, Virgin Blue, GE Aviation, Air New Zealand, Rolls-Royce, Continental, CFM, JAL, Air-bus, KLM, Interjet, Pratt & Whitney, Air China, TAM Airlines, Jet Blue Airways, IAE, United Airlines, Air France, Finnair, Air Mexico, Thomson Airways, Porter Airlines, Alaska Airlines, Horizon Air, Etihad Airways, Romanian Air, Bombardier
Gas to Jet	Catalytic Hydro-thermolysis (CH)	Applied Research Assoc., Aemetis/Chevron Lummus Global	FAA CLEEN, NRC Canada, AFRL	Rolls-Royce, Pratt & Whitney
	Hydro-treated Depolymerized Cellulosic Jet (Pyrolysis) (HDCJ)	Kior/Hunt Refining/Petrotech, Envergent, GTI, Dynamotive	FAA	N/A
	Fischer-Tropsch Synthesis	Syntroleum; SynFuels; Rentech; Shell; Solena	U.S. DOE, U.S. DOD, USAF, Ontario government	Qatar Airways, United Airlines, Airbus, British Airways
	Gas Fermentation	Coskata; IneosBio/Lanza Tech; Swedish Biofuels	N/A	Virgin Atlantic
Sugar to Jet	Catalytic Ugrading of Sugar to Jet	Virent/Shell, Virdia	AFRL, U.S. DOE	N/A
	Direct Sugar to Hydrocarbons	Amyris/Total, Solazyme, LS9	Navy, FAA	Boeing; Embraer; Azul Airlines; GE; Trip Airlines

2.3.1 Alcohol-To-Jet (ATJ) 제조기술

ATJ 연료는 메탄올, 에탄올, 부탄올 등의 알코올이 중합반응을 거쳐 전환된 연료다. 전 세계에서 에탄올은 수송용 휘발유 차량에 최대 10~15%를 혼합

하여 사용하고 있다. 하지만 앞으로 휘발유에 혼합될 에탄올 시장이 확대되기는 어려울 것으로 보인다. 하지만 에탄올은 업그레이딩 기술을 통하여 항공연료를 대체할 가능성을 갖고 있다. 본 장에서는 에탄올

Table 3²³⁾

(a) Flight tests with bio-jet fuels through different conversion pathways by commercial airlines

Commercial airline	Aircraft	Partners	Year	Feedstocks	Bio-jet fuel content	Conversion pathway
Virgin Atlantic	B747-400	Boeing, GE Aviation	2008	Coconut & Babassu	20%	Oil to Jet
Air New Zealand	B747-400	Boeing Ralls-Royce, UOP	2008	Jatropha	50%	Oil to Jet
Continental airlines	B737-800	Boeing, GE Aviation, CFM, Honeywell UOP	2009	2.5% Algae & 47.5% Jatropha	50%	Oil to Jet
JAL	B747-400	Boeing, Pratt & Whitney, Honeywell UOP, Nikki Universal	2009	42% Camelina, 8%Jatropha/Algae	50%	Oil to Jet
KLM	B747-400	GE, Honeywell UOP	2009	Camelina	50%	Oil to Jet
KLM	B737-800		2011	Waste cooking oil	50%	Oil to Jet
TAM airlines	A-320	Airbus, CFM	2010	Jatropha	50%	Oil to Jet
Jet blue airways	A-320	Airbus, IAE, Honeywell UOP	2010	TBC		Oil to Jet
Boeing	B747-8F		2011	Camelina	15%	Oil to Jet
Interjet	A-320	CFM, Safran, EADS, Airbus, Honeywell UOP	2011	Jatropha, Halophyte	30%	Oil to Jet
Air France	A-321		2011	Waste cooking oil	50%	Oil to Jet
Honeywell	Gulfstream G450		2011	Camelina	50%	Oil to Jet
Finnair	A-319		2011	Waste cooking oil	50%	Oil to Jet
Air Mexico	B777-200		2011	Jatropha		Oil to Jet
Thomson airways	B757-200	SkyNRG	2011	Waste cooking oil		Oil to Jet
Porter airlines	Bombardier Q400		2012	Camelina		Oil to Jet
Air China	B747-400	Boeing, PetroChina	2012	Jatropha	50%	Oil to Jet
NRC Canada	Falcon 20, T-33	Aemetis, AFRL, Rolls-Royce, FAA-CLEEN, Agri soma Biosciences, Applied Research Assoc., Chevron Lummus Global	2012	Carinata	100%	Oil to Jet (CH)
Lufthansa	A-321	Neste Oil	2011	Jatropha, camelina & animal fats	50%	Oil to Jet
Azul airlines	E195 Jet	Amyris, Embraer, GE	2012	Sugarcane		Sugar to Jet
Continental airlines	B737-800	Solazyme, United Airlines	2011	Algae		Alcohol to Jet
Alaska airlines	B737, Bombardier	Dynamic Fuels, Horizon Air	2011	Algae & waste cook-ing oil	20%	Oil to Jet
Virgin Atlantic		Lanza Tech, Swedish Biofuels	2011	Industrial waste gas		Gas to Jet (gas fermentation)
Etihad airways	B777-300ER		2012	vegetable oil		Oil to Jet
British airways	TBD	Solena	TBD	Factory waste	TBD	Gas to Jet(F-T)
Paramus flying club	Cessna 182		2013	Waste cooking oil	50%	Oil to Jet

(b) Flight tests with bio-jet fuels through different conversion pathways by military Aircrafts types

Military Aircraft	Aircraft	Partners	Year	Feedstocks	Bio-jet fuel content	Conversion pathway
U.S. Navy	F/A-18	Honeywell UOP	2010	Camelina	50%	Oil to Jet
U.S. Air Force	A-10C	Honeywell UOP	2010	Camelina, waste cooking oil	50%	Oil to Jet
U.S. Air Force	F-22	Honeywell UOP	2011	Camelina	50%	Oil to Jet
U.S. Navy	MH60S Seahawk		2010	Camelina	50%	Oil to Jet
	Helicopter					
U.S. Navy	MH60S Seahawk	Solazyme	2011	Algae	50%	Oil to Jet
	Helicopter					
U.S. Navy	T-45		2011	Camelina	50%	Oil to Jet
U.S. Navy	AV-8B		2011	Camelina		Oil to Jet
Netherland Air Force	AH-64D Apache Helicopter	Honeywell UOP	2010	Waste cooking oil	50%	Oil to Jet
U.S. Air Force	A-10C	Gevo	2012	cellulose-derived alcohol		Alcohol to Jet
U.S. Air Force	B-52	Syntroleum	2006	natural gas	50%	GastoJet(F-T)
U.S. Air Force	TBD	Swedish Biofuels	TBD	Biomass-derived sugar	100%	Alcohol to Jet
NASA	DC-8		2011	Chicken and beef tallow		Oil to Jet
Dutch Military	Ah-64 Apache helicopter		2010	Waste cooking oil		Oil to Jet
EADs	Diamond D42		2010	Algae		Oil to Jet

과 부탄올을 이용하여 항공연료로 전환하는 기술에 대해 알아보겠다.

2.3.1.1 전환 공정

알코올로부터 바이오항공 연료를 만들기 위해서는 알코올과 기존 항공연료가 물리화학적 특성이 비슷해야한다. 미국에서는 기존 연료와 상 분리되는 것을 피하고자 99.5~99.9%의 무수에탄올을 휘발유와 혼합하고 있다. 또한, 항공연료로 업그레이딩을 위해서도 여전히 고순도의 에탄올이 필요하다. 알코올로부터 항공연료로 전환하는 ATJ 공정은 알코올의 탈수반응, 중합반응, 수소화 반응의 3단계로 이루어져 있고 에탄올로부터 항공연료를 생산하는 공정을 Fig. 3에 나타내었다²⁴⁾.

알코올을 탄화수소로 업그레이딩을 하기 위해서

는 촉매가 가장 중요하다. 탈수반응에 사용되는 촉매를 처음에는 알루미늄과 전이금속 산화물을 사용하다가 현재에는 SAPO, H-ZSM-5 등의 제올라이트 또는 불균일계 산촉매를 사용하고 있으며 0.5% La-2% P/H-ZSM-5 촉매가 가장 좋은 것으로 알려졌다²⁵⁾. 250°C 반응온도에서 거의 100% 전환율을 나타내고 에틸렌 선택도가 99.9%에 달한다²⁶⁾. 탈수반응을 거친 에틸렌은 촉매 하에서 중합반응을 통해 알파올레핀으로 중합된다. 알파올레핀을 만드는 일반적인 공정은 균일계와 불균일계 촉매에 초점이 맞추어져 있으며 Ziegler Natta계 촉매, chromium diphosphine 촉매, 제올라이트와 같은 촉매들이 주로 연구되어져 왔다. 에틸렌의 중합반응은 90~110°C, 89 bar의 조건에서 Ziegler Natta 촉매의 경우에 C₄-C₂₀의 알파올레핀이 생성되며 수율은 96~97%를 나타낸다.

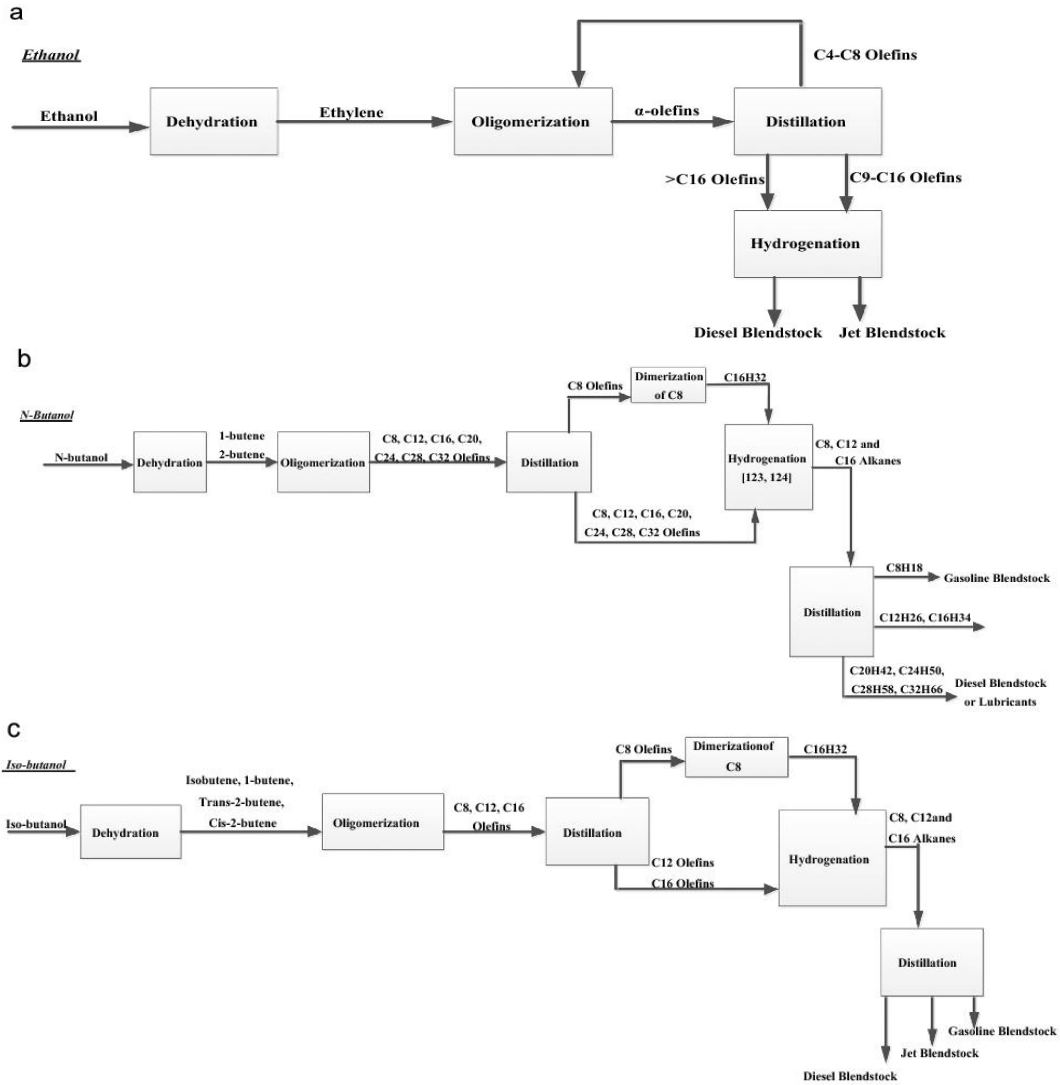


Fig. 3 Alcohol to jet processes: (2a) ethanol to jet; (2b) n-butanol to jet; (3c) iso-butanol to jet

상용으로 이용되는 중합공정은 반응온도 200°C, 압력 250 bar의 조건에서 5% C₄, 50% C₆-C₁₀, 30% C₁₂-C₁₄, 12% C₁₆-C₁₈와 같이 탄소수가 넓은 분포를 나타낸다²⁷⁾. 이렇게 합성된 올레핀은 증류공정을 통해 경유유분, 항공유분 등으로 나누어진다. 증류공정을 통해 분리된 C₄-C₈의 저비점 올레핀은 다시 중합공정으로 보내져 고비점 올레핀으로 전환된다(Fig. 2 2a). C₆-C₁₆의 항공유분은 5% Pd/C 또는 5% Pt/C 촉매 하에서 반응온도 370°C, 공간속도(WHSV) 3 h⁻¹,

수소분위기에서 수소화반응이 이루어진다. 수소화반응을 통해 생성된 C₆-C₁₆의 알칸들이 바이오항공연료이다. 부탄올을 항공연료로 업그레이딩하는 공정은 반응온도 380°C, 압력 2.1 bar의 알루미늄 촉매 하에서 n-부탄올은 1-부텐으로 전환되고 98%의 높은 전환율과 95%의 부텐 선택도를 나타낸다. 1-부텐은 다시 중합공정을 통해 C₈-C₃₂ 범위의 올레핀으로 전환되고 전환율은 97%를 나타낸다. 생성된 올레핀은 26.46% C₈, 25.48% C₁₂, 17.64% C₁₆, 11.76% C₂₀,

7.84% C₂₄, 4.9% C₂₈, 3.92% C₃₂의 분포를 나타낸다. 이 공정은 상온으로 Cp₂ZrCl₂/MAO 촉매 하에서 16 시간동안 반응을 한다. 1-부텐에서 생성된 C₁₂-C₃₂ 범위의 올레핀은 다시 0.08% PtO 촉매에서 수소화반응을 거치게 되면 최종적으로 C₁₂-C₁₆의 파라핀은 항공연료로, C₂₀-C₃₂의 알칸들은 윤활유로 판매가 된다²⁸⁻²⁹⁾.

2.3.1.2 경제성 분석

알코올로부터 전환된 바이오항공 연료에 대한 생산단가를 계산하기 위해서는 알코올 생산단가가 필요하다. 생화학 공정 또는 열화학 공정을 통해 생산되는 에탄올에 대한 경제성 분석은 활발히 이루어져 왔다³⁰⁻³¹⁾. 바이오매스를 원료로 하여 생화학적 반응에 의해 생산된 에탄올의 판매단가는 2011년 기준으로 \$4.18/GGE (gal for gasoline equivalent)로 보고되고 있다. 열화학 공정을 통해 생산된 에탄올의 최소 판매단가는 \$3.8GGE로 보고되고 있다. \$79.23/ton의 옥수수를 원료로 하여 ABE 발효공정을 통해 생산된 부탄올의 판매단가는 \$0.34/kg로 보고하고 있고 셀룰로스를 원료로 하는 경우에는 4.1/GGE에 해당한다. 지금은 시장 수요와 농산물 가격 변동 등의 변수로 인해 농산 폐기물, 조류와 같은 값싼 원료를 이용하여 생산하려고 노력 하고 있다. ATJ 전환 공정의 경제성을 평가하기 위해서는 상용 설비, 업그레이딩 공정, 생성물 분포가 가장 중요한 고려 사항이며 여전히 공정 개선을 위한 연구가 진행되고 있고 이를 위해 많은 노력이 필요하다.

2.3.1.3 LCA 분석

ATJ 연료의 LCA 분석은 주로 에탄올, 부탄올 등의 알코올 생산에 중점이 맞춰져 있다³²⁻³³⁾. 연료 알코올 생산에 대한 LCA 분석은 (1) 원료, (2) 효소, (3) 바이오리파이너리, (4) 부산물의 4개의 카테고리 나눌 수 있다. 생화학 공정은 온실가스 배출, 화석 연료 및 물 소비 등에 있어 열화학 공정과는 약간의 차

이가 있을 수 있다. n-부탄올 생산 공정은 주로 배출 가스, 물 소비, 온실효과, 화석 에너지 소비 등에 초점을 맞추어 연구되고 있다. 부탄올 생산 공정은 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물 등을 배출한다. 이산화탄소는 셀룰로스를 생산하는 과정에서 나오고 질소산화물은 고온에서 공기와의 연소로 생성이 된다. 황산화물은 전처리공정에서 사용되는 황산의 양에 의해 발생한다. ATL 연료에 대한 LCA 분석은 정확히 알려진 바가 없으며 앞으로 더 많은 연구가 필요하다.

2.3.2 Oil-to-jet (OTJ) 제조기술

OTJ 연료 생산 공정은 HEFA (hydro-processed esters and fatty acids)로 알려진 HRJ (hydro-processed renewable jet), 촉매 수소화열분해 CH (catalytic hydro-thermolysis), 급속 열분해를 통한 HDCJ (hydro-treated depolymerized cellulosic jet)의 세 가지로 나눌 수 있다. 최근에는 HRJ에 의해 생산된 연료만이 ASTM 기준에 명시되어 있고 혼합 연료로 사용할 수 있다.

2.3.2.1 전환 공정

HRJ와 수소화열분해 공정은 트리글리세라이드를 원료로 하고 있다. HRJ 공정에서 생산된 자유지방산 (FFA)은 트리글리세라이드에서 프로판이 분해되면서 생성이 되지만 촉매 수소화열분해 CH 공정에서는 열분해에 의해 생성이 된다. HDCJ 공정의 바이오오일은 바이오매스를 열분해하여 생성된다. 수소화처리 공정은 세 공정에서 비슷하다.

2.3.2.1.1 HRJ 공정

HRJ 전환 기술은 상대적으로 매우 완성된 기술이며 상용화되어 있으며 최근에는 군용기 연료를 생산하는데 이용되고 있다³⁴⁾. HRJ 연료는 일반적인 석유 제품과 유사한 특성을 나타내지만, 세탄가가 높고 방향족 함량, 황 함량 및 온실가스 배출이 낮은 장점을

가지고 있다³⁵⁾.

지난 60년 동안 촉매 수소화 반응, 탈산소 반응, 수소이성화 반응, 수소화 분해반응 공정들은 성공적으로 개발되어 상용화가 되었다(Fig. 4). 불포화 지방이나 오일들은 수소화 반응을 통해 이중결합을 포화상태로 만들어야 한다. 촉매 수소화 반응을 통해 액상의 불포화 지방산 또는 글리세라이드는 포화상태로 전환되고 프로판올을 분리하면 3분자의 FFA가 생성된다³⁴⁾. 트리글리세라이드의 글리세롤 부분은 수소로 인해 프로판올로 바뀌게 된다. 글리세라이드는 열분해에 의해 FFA로 전환된다. 대부분이 트리글리세라이드로 이루어진 오일이나 지방은 3분자의 물과 반응하여 세분자의 FFA와 한분자의 글리세롤로 전환된다. 물에 포함된 수소이온은 글리세롤 구조를 공격하여 한분자의 글리세롤을 형성하고 수산화이온은 에스테르와 반응하여 세분자의 FFA를 형성한다. 이 공정은 250~260°C의 고온과 액상의 반응물들이 존재하기 위해서는 고압이 필요하다. 부산물인 글리세롤은 약학, 의학, 접착제 등에 활용이 될 수 있다.

바이오항공 연료가 기존의 항공연료 기준을 충족

하기 위해서는 높은 인화점과 저온 유동성이 좋아야 한다. 그러므로 산소를 제거하기 위해 수소화분해반응과 수소이성화반응을 통해 C₉-C₁₅의 합성 파라핀 유분으로 전환하는 공정이 필요하다. 또한, 항공연료 기준을 만족하기 위해서는 어는점을 낮춰야 한다. 수소화분해반응은 발열반응으로 저분자의 액상과 기상상이 생성될 수 있다. 이 반응은 매우 느린 반응으로 주로 반응기 후단에서 일어난다. 수소화분해반응은 주로 파라핀을 분해하거나 포화상태로 만드는 것이다. 따라서 항공연료 유분 범위보다는 저비점 유분의 수율이 더 높을 수 있다. 이성화반응에는 수소화반응과 탈수반응을 일으키는 금속 촉매와 이성화반응 일으키는 산촉매의 두 가지 기능을 갖는 복합촉매가 사용된다. 이성화 반응은 n-파라핀이 촉매의 금속 성분에서 탈수반응을 일으키고 산점에서 알킬카베늄 이온을 형성하면서 올레핀이 생성이 된다. 알킬카베늄은 산점에서 다시 단일, 이중, 삼중결합된 카베늄으로 재정립된다. 알킬카베늄은 수소화 반응을 통해 파라핀으로 전환되며 SPK (paraffinci kerosene), 파라핀 디젤, 나프타로 분류하는 공정이 필요하다³⁶⁾.

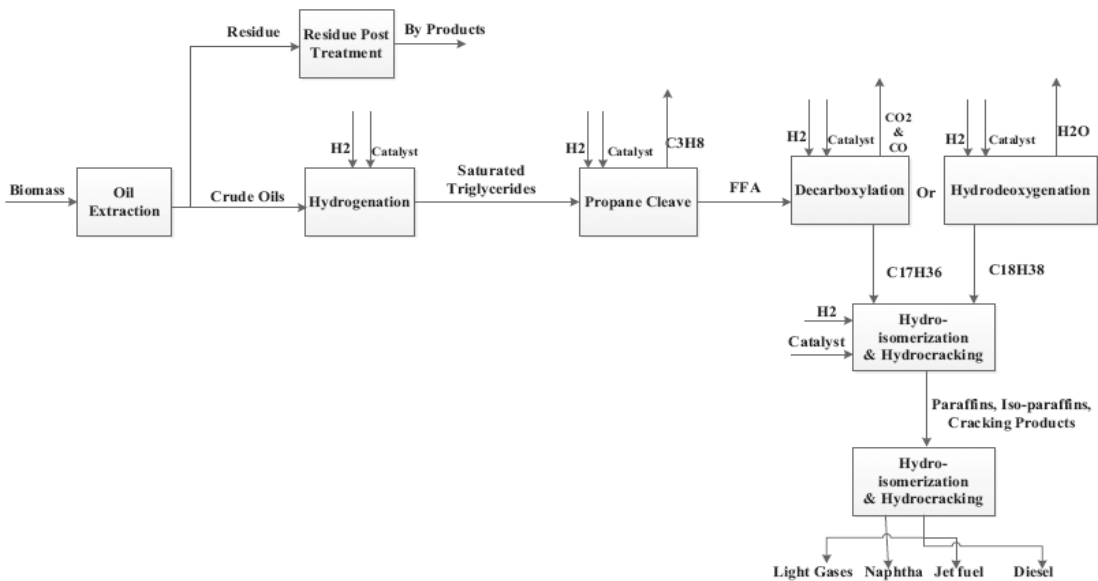


Fig. 4 Hydro-processed renewable jet (HRJ) process

2.3.2.1.2 촉매 수소화열분해 CH 공정

수소화열분해 공정을 통해 Applied Research Associates Inc.는 식물 또는 조류 오일에서 ReadiJet 또는 Readdiesel로 불리는 연료를 개발하였다. Fig. 5의 수열합성 공정은 크래킹, 가수분해, 탈카르복실반응, 이성화반응, 고리화반응을 포함하고 있으며 트리글

리세라이드는 직쇄, 측쇄, 고리화 탄화수소 화합물로 전환된다³⁷⁾. CH 반응은 온도 450~475°C, 압력 210 bar에서 물과 촉매(또는 무촉매) 조건에서 진행이 되고 생성물은 카르복실산, 유기산화물, 불포화 분자들이 생성이 된다. 이러한 생성물은 다시 산소를 제거 하기 위해 탈카르복실 공정과 수소화반응 공정을 거

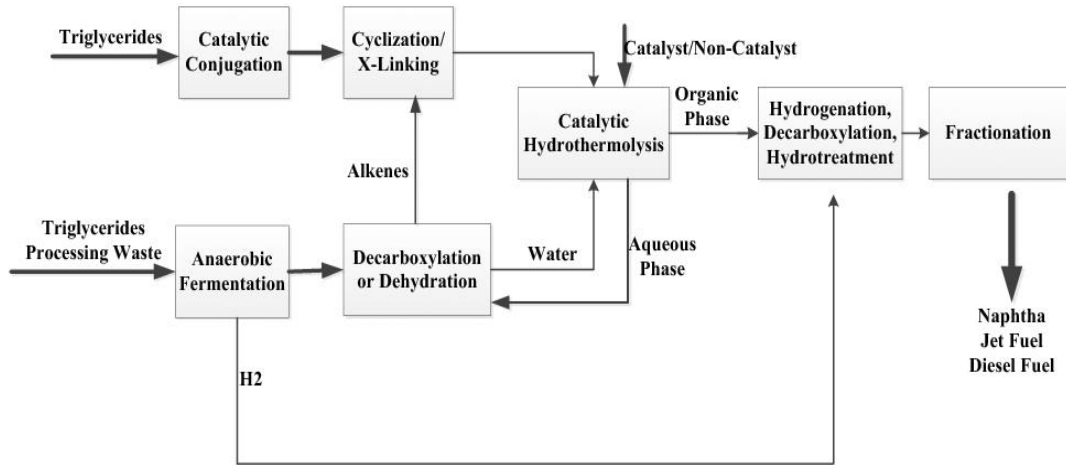


Fig. 5 Catalytic hydro-thermolysis to jet fuel

Table 4 Biojet fuels from th CH process³⁷⁾

	JP-8	From Soybean	From Jatropha	From Tung	From Camelina	From Carinata	MIL-DTL-83133H spec requirement
Aromatics	18.8 (vol%)	2.6 (wt %)	10.8 (wt%)	61.7 (wt%)	24.2 (vol%)	16.8 (vol%)	≤25.0
Paraffins (normal/iso)	N/A	40.0 (vol%)	32.8 (wt%)	16.2 (wt%)	N/A	N/A	N/A
Olefins	0.8 (vol%)	N/A	N/A	N/A	1.3 (vol%)	1.8 (vol%)	≤5.0 (vol%)
Cycloparaffins	N/A	52.0 (vol%)	39.2 (wt%)	16.7 (wt%)	N/A	N/A	N/A
Dicycloparaffins, vol%	N/A	5.9 (vol%)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Combustion, MJ/kg	43.3	43.4	43.4	42.3	42.9	43.2	≥42.3
Smoke Point, mm	22	>30	28	N/A	22	26	≥19
Freeze Point, C	-51	<-47	-39	<-66	-54	-57	≤-47
Flash Point, C	51	>38	45	39	48	46	≥38
Distillation (D2887, D86)	N/A	pass	195-229	187-252	N/A	N/A	N/A
Density, kg/L	0.804	>0.775	0.804	0.818	0.818	0.802	0.775-0.840
Acid Number, mg of KOH/g	0.003	<0.010	<0.010	0.011	0.011	0.012	≤0.015
Hydrogen, wt%	13.8	N/A	14	13.8	13.8		≥13.4
Viscosity at 40C, cSt	9.9	N/A	N/A	N/A	7.4	6.5	≤12.0
Cetane Index	N/A	N/A	43.9	34.2	N/A	N/A	N/A

치게 된다. 이렇게 처리된 생성물은 C₆-C₂₈의 범위의 n-알칸, iso-알칸, cyclo-알칸 및 방향족들로서 나프타, 항공연료 유분, 디젤 유분으로 분리하는 공정을 거친다. CH 공정에서 생산된 항공연료는 ASTM과 군의 품질 기준을 만족하기 위해서 연소 특성과 저온특성, 연료 안정성이 우수해야 한다. 많은 연구를 통해 CH 공정에서 생산된 바이오항공연료가 다양한 원료로부터 생산 가능하다는 것을 Table 4에서 보여 주고 있다.

2.3.2.1.3 HDCJ

Kior는 HDCJ 공정을 통해 셀룰로스 바이오매스로부터 휘발유, 경유, 항공연료로 전환하는 기술을 개발되었다. HDCJ 항공연료는 아직까지 ASTM의 승인을 받지 못하고 있다¹⁰⁾. Fig. 6에서 보듯이 급속 열분해로부터 생산된 바이오오일을 항공연료로 사용하기 위해서는 수소화처리 공정이 필요하다. UOP, LLC, PNNL, Ensyn, Tesoro 사들은 열분해 오일을 항공연료로 업그레이딩 하는 공정을 개발 중이다. HDCJ 공정은 약 42.4~44.2%의 항공연료를 생산할 수 있다⁹⁻¹⁰⁾.

2.3.2.2 경제성 분석

HEFA 연료 가격은 2011년 기준으로 98.28 MM gal/yr 공정 규모에서 \$3.6/GGE, 30.16 MMgal/yr 공정 규모에서 \$4.2/GGE로 알려져 있다³⁸⁾. 수소 사용량 증가와 연료 수율이 감소할 경우에는 추가적으로

\$0.27~0.31/gal의 비용이 더 들 수 있다. 미세조류와 양치식물 유래 오일로부터 생산된 바이오항공 연료에 대한 경제성 분석도 연구되었다. 미세조류와 양치식물 유래 오일로부터 생산된 바이오항공 연료의 최소 판매단가는 2011년 기준으로 각각 \$28.3/GGE, \$7.9/GGE 정도이다. 시장과 기술의 발전으로 생산단가는 각각 \$8.1/GGE, \$5.4/GGE로 감소할 것이다. 전이에스테르화반응을 통한 바이오 디젤 생산과는 달리 HRJ 바이오 연료는 수소화 처리 공정이 필요하다. 수소처리 공정에 의해 HRJ 생산단가는 바이오디젤 생산 공정보다 20% 높다고 할 수 있다. 하지만, 부산물인 나프타, 가스, 프로판, 디젤 등은 전이에스테르화 공정의 글리세롤보다 더 가치가 있다. 바이오디젤의 총생산 비용은 원료가 차지하는 비율이 70~80%로 원료비용이 큰 부분을 차지하고 있다. 식용 또는 비식용 오일은 환경친화적이고 지속 가능하기 때문에 바이오연료의 원료로 사용되고 있다. HRJ 공정의 부산물은 고부가가치로 업그레이딩 하여 판매가 가능하다.

2.3.2.3 LCA 분석

LCA를 통한 온실가스 배출 분석에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 대두유 유래 바이오연료의 온실가스 배출은 기존 항공연료의 온실가스 배출 대비 40~80% (889 gCO₂e/MJ)에 해당한다³⁴⁾. 팜유의 경우에는 기존 항공연료에 비해 30~40%에 해당한다고 알려져 있다. 온실가스 배출은 원료 재배를 어떻게 하는지에 따라 40~800%까지 영향을 받는다. 면실유

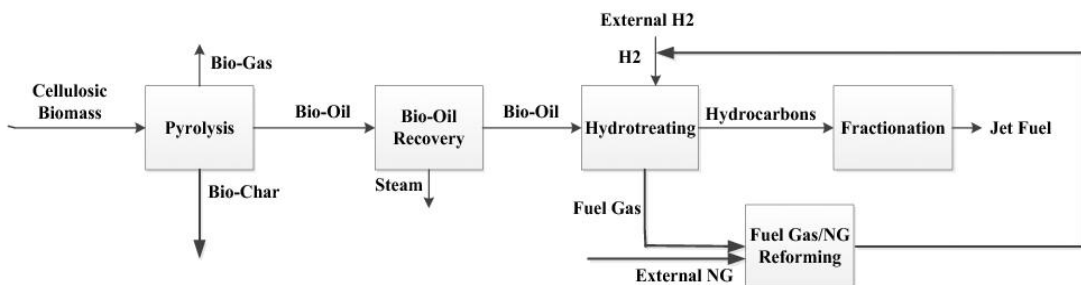


Fig. 6 Pyrolysis-to-jet process

를 사용하는 경우에는 45~87%, 자트롤로파를 사용하면 36~52%에 해당한다고 알려져 있다. 또한, 미세 조류를 이용하면 16~220%까지 기존 항공연료 대비 배출된다고 알려져 있다. 열분해로부터 액체연료를 생산하는 공정에서 수소를 천연가스에서 생산하고 바이오매를 공정의 에너지로 재이용할 경우에는 기존 연료 대비 45% 배출 가스를 줄일 수 있다.

2.3.3 Gas-to-jet (GTJ) 제조기술

GTJ 공정은 바이오 가스, 천연가스 또는 합성가스를 바이오 항공연료로 전환하는 기술이다. GTJ 제조 기술 공정은 크게 F-T 공정과 가스 발효 공정으로 나눌 수 있다⁸⁾.

2.3.3.1 전환 공정

2.3.3.1.1 F-T BTL 공정

F-T 공정은 합성가스에서 액체 탄화수소 연료를 생산하는 공정으로 F-T 연료는 황분이 없고 휘발유

나 경우보다 방향족 성분이 없으므로 배출가스가 낮다. 최근 FT 연료는 기존의 경우, 등유, 휘발유를 대체할 수 있는 연료로 연구되고 있다. F-T BTL 공정(Fig. 7)은 원료물질을 건조하는 단계를 거쳐 다양한 가스화 기술들과 수성가스전환반응을 통해 합성가스를 만든다. NREL은 간접 가스화와 타르 개질 공정을 개발하였다⁴⁰⁾. 이 공정은 흡열 가스화 공정으로 간접 가열 방식으로 상압, 880°C에서 일어난다. 그리고 수성가스전환반응은 개질 반응기에서 일어나 합성가스를 생산한다. 고온 가스화 반응과 비교하여 에너지 효율이 높고, 소형화가 가능한 장점이 있다. 합성가스는 25 bar의 압력에서 F-T 반응을 통해 액체 연료로 전환된다. 일반적으로 F-T 공정은 고온, 저온 공정으로 나눌 수 있다. 고온 공정은 300~350°C에서 철계 촉매를 사용하여 반응하며 이때 생성물은 휘발유와 저분자 올레핀이 생성이 된다. 저온 공정은 220~240°C에서 철계 또는 코발트계 촉매를 이용하며 메탄에서부터 고비점 탄화수소까지 생성된다. F-T 공

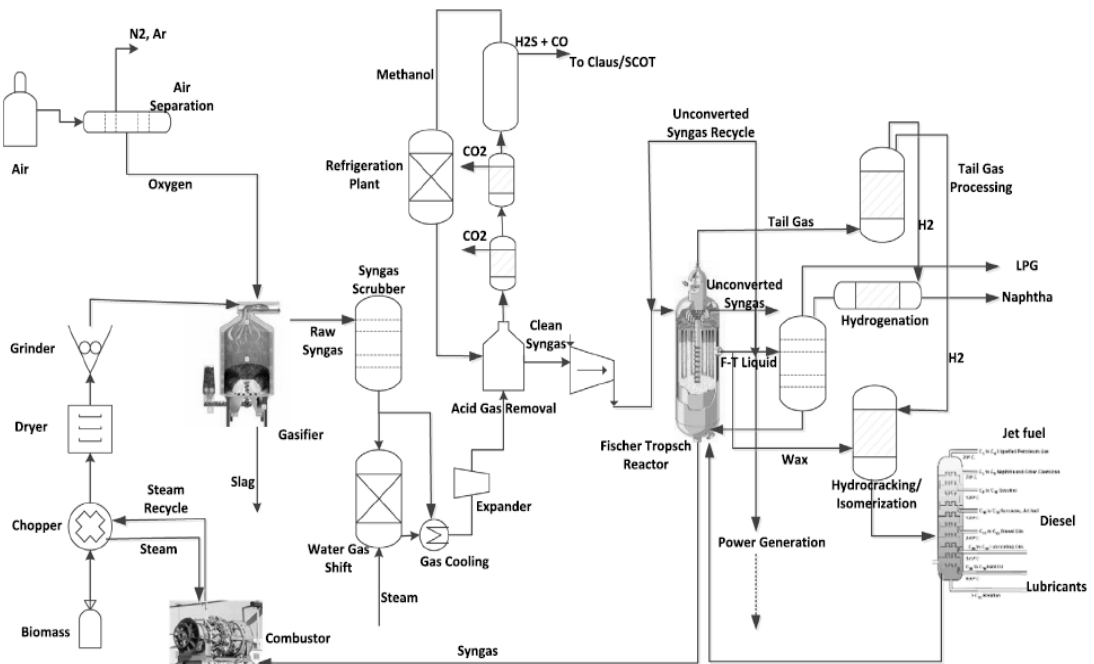


Fig. 7 FT-BTL process

정은 심한 발연반응으로 반응열을 빨리 제거하여 과열, 메탄 생성, 촉매 활성 저하를 피해야 하며 생성물은 반응온도, 압력에 의해 결정된다. F-T 합성 후, 반응하지 않은 합성가스는 다시 F-T 공정으로 보내지고 생성된 액체연료는 일반적인 정제 공정을 거쳐 고품질의 연료로 업그레이딩 된다. 수소화분해반응이나 이성화 반응은 고비점 왁스 성분을 저비점의 생성물로 전환하는 데 이용된다. 업그레이딩 공정을 거친 F-T 연료는 항공연료, 디젤, 윤활유 등으로 분리된다. 수소화분해반응은 F-T 연료를 나프타로 전환하는 데 이용된다. F-T 반응 후 생성되는 수소, 물, 메탄, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소, 아르곤 등의 가스는 합성가스 전환 장치로 보내진다. 수소는 흡착제를 통해 정제하여 수소화분해반응 등에 사용할 수 있다⁴¹⁻⁴⁵).

2.3.3.1.2 가스 발효 공정

F-T 합성가스는 촉매를 이용하여 바이오항공 연료로 업그레이딩 되는 반면에 발효공정으로도 합성가스를 액체 바이오 연료로 전환이 가능하다(Fig. 8)⁸. 이 공정은 바이오 매스를 가스화 공정을 통해 합성가스로 생산하고 합성가스는 다시 초산성세균을 이용한 발효 공정을 통해 에탄올 또는 부탄올로 전환한다⁴⁶. 초산성 세균인 clostridium은 일산화탄소와

수소를 에탄올과 2,3-부탄디올로 전환하는데 사용된다. 아세테이트, 아세톤, 부탄올, 프로판올 등이 부산물로 생성될 수 있다. 이렇게 생성된 혼합 알코올은 ATJ 공정을 통해 항공연료로 업그레이딩될 수 있다. 가스 발효 공정은 잠재적인 이점이 많이 있다. 이 공정의 에너지 효율은 약 57%에 달하고 F-T 공정은 45%의 에너지 효율을 나타낸다. 이 공정은 또한 낮은 온도와 압력이 필요하지만 효소의 가격을 낮춰야 하는 문제를 가지고 있다. 가스 발효 공정은 농업폐기물뿐만 아니라 산업 및 하수 폐기물까지 다양한 원료를 사용할 수 있다.

2.3.3.2 경제성 분석

BTL 항공연료 공정의 비용은 가스화기 등의 장치 비율(captical cost)와 BTL 연료의 생산 비용과 연관되어 있는데, 이러한 장치비용과 원료가격이 가장 큰 영향을 준다고 발표되고 있다. 에너지작물은 산림자원이나 폐기물보다 연료 가격에서 차지하는 비용이 70%를 차지한다. 생산단가는 에너지작물의 수확이 증대되거나 전환 비용이 감소한다면 줄어들 수 있으며 2012년부터 2026년까지 약 26%가 감소할 것으로 보고 있다. BTL 생산단가는 낮은 에너지 효율로 인해 CTL 공정에 비해 높을 것으로 보고 있다. CTL 공정에 의한 항공연료 생산단가는 \$1.70/gal에서 \$2.04/gal

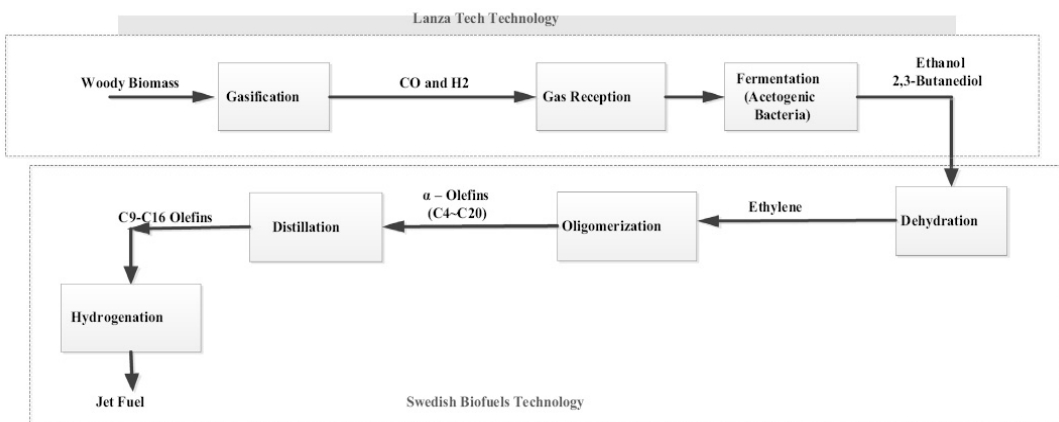


Fig. 8 Gas fermentation to bio-jet fuel

의해 C₅-C₆의 당으로 전환되고 수소화 반응을 통해 다가알코올로 전환되거나 수소화분해반응 때문에 저분자의 유기산화물로 전환된다. Virent 사의 핵심 기술은 APR (aqueous phase reforming)에 있다. APR 공정은 압력 10~90 bar, 450~575K 온도에서 불균일 계 촉매를 통해 수소화 처리가 이루어지고 수소, 이산화탄소, 알코올, 케톤, 알칸, 유기산, 퓨란 등이 생성이 된다⁴⁸⁾. APR로 생성된 수소는 APR 전단에서 수소화처리에 이용될 수도 있으며 APR 후단의 정제 공정에 이용될 수 있다. 이 때 C₁-C₄ 알칸은 열원으로 사용할 수 있다. APR 공정에서 생성된 유기산화물은 항공연료 범위의 탄화수소로 전환할 수 있고, Fig. 9에 제올라이트 ZSM-5 촉매를 이용하여 알칸, iso-알칸, 방향족으로 전환하는 방법을 나타내었다.

2.3.4.1.2 DSH 공정

당이 효소에 의해 직접 탄화수소로 전환되는 공정에서 고형분은 제거되고 액상의 당은 수분을 50% 제거하여 농축시킨다. 탄화수소 중간체는 효소 당화를 시켜 생성되고 상 분리 공정을 거쳐 탄화수소 연료를 얻을 수 있다. Amyris와 LS9은 성공적으로 탄화수소 연료로 전환하는 공정을 개발하였다. Fig. 10은 당화 발효 공정을 통해 항공연료를 생산하는 공정을 나타내고 있다. 발효 공정을 통해 artemisinic acid, isopentenyl

pyrphosphate 등이 생성된다. 이중에서 artemisinic acid는 향말라리아 약품과isopentenyl pyrphosphate은 C₁₅ isoprenoid로 전환될 수 있다. E. Coli는 당으로부터 fatty ester, fatty alcohol, 왁스를 생산하는 공정을 개발하였다. LS9 사에 의해 개발된 이 기술은 증류, 수소화 반응과 같은 화학 공정이 필요 없이 항공연료를 생산할 수 있는 기술이다⁴⁸⁾. Berkley에서 ABE 발효공정으로 항공연료, 경유, 휘발유를 만드는 촉매 공정이 개발되었다. Glyceryl tributryrate는 가장 효과적으로 에탄올로부터 아세톤과 n-부탄올을 분리할 수 있고 발효를 방해하는 요소를 제거하는 데 사용된다. 아세톤과 n-부탄올은 K₃PO₄와 파라듐 촉매 하에서 응축반응을 통해 케톤으로 전환된다. 생성된 C₁₁의 케톤은 정제공정을 통해 바이오항공연료가 된다.

2.3.4.2 경제성 분석

STJ의 경제성 분석은 당을 분리하는 공정을 주의해서 볼 필요가 있다. 분해된 바이오매스 슬러리를 분리하는 공정은 정제공정 비용의 50~70%를 차지한다⁴⁸⁾. 점도 감소, 유동성 증가, 침전 형성을 피하는 것 등은 분리 공정의 효율을 증가시키는 방법이다. NREL과 Vrient에서 경제성 분석을 연구하고 있으며 네 개의 주요 요소로 (1) 전처리/분리공정, (2) 수소화 반응, (3) APR, (4) 탈수공정/응축 반응에서 생산

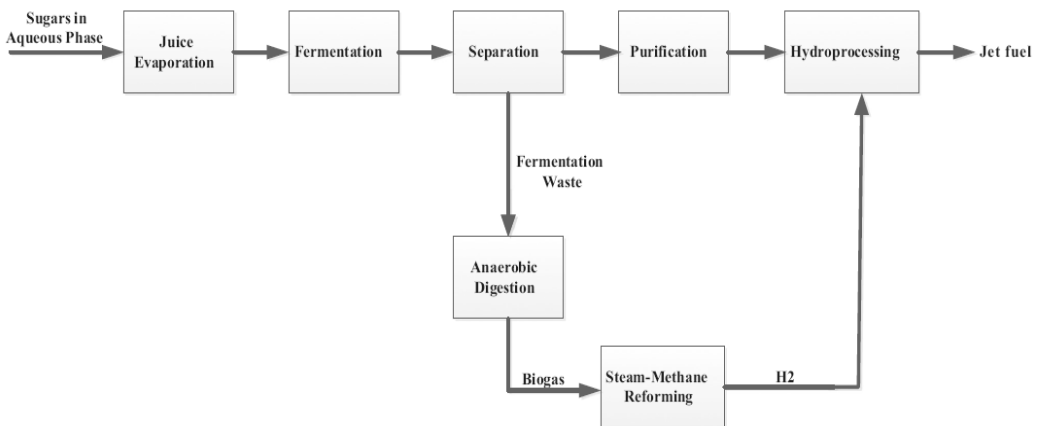


Fig. 10 Direct sugar-to-jet fuel

비용에 대한 영향을 고려하였다. 아이오와주립대와 위스콘신대는 DMF와 HMF 생산에 대한 연구를 진행하였다. 과당을 300 metric ton/day를 처리하는 공정에서 20년 동안 운전할 때, HMF, DMF의 최소 판매단가는 각각 \$4.8/GGE \$9.9/GGE으로 계산되었다. 다른 연구에서는 바이오매스로부터 레블린산을 생산하는 공정비용은 약 \$3.5/GGE로 분석되었다.

2.3.4.3 LCA

Amyris 공정을 통한 사탕수수 당화로부터 생산된 바이오항공연료에 대한 온실가스 배출 특성에 대해 연구를 진행한 결과, 온실가스 배출은 15 g CO₂e/MJ 이었다. 이는 기존 항공연료 A/A-1 연료와 비교하여 82% 감소한 양이다. 그러나 사탕수수 생산과 운송과 관련된 온실가스 배출은 원료 경작과 토양에서 나오는 N₂O가 대부분을 차지한다.

3. 결 론

세계 항공산업은 전체 CO₂ 배출량의 2%를 차지하고 있어 온실가스 배출량에 대한 감축 방안을 검토하고 있다. 따라서 세계 항공업계에서는 온실가스 감축을 위하여 바이오연료에의 대처 강화가 진행되고 있으며, 실제로 2020~2030년경부터 많은 항공사에서 바이오항공유의 사용이 될 것으로 예상된다. 최근에 항공분야에 온실가스 저감기술로 개발 중인 바이오매스 기반의 바이오항공유 제조기술인 Alcohol-to-jet (ATJ), Oil-to-jet (OTJ), Gas-to-jet (GTJ), Sugar-

to-jet (STJ)의 제조기술에 대한 전환공정, 경제성 및 LCA를 비교하였다. Fig. 11에서 보듯이 바이오매스 기반 바이오 항공유는 LCA 분석을 통해 기존 석유계 항공유와 비교할 때 기술별 다소 차이는 있지만 높은 온실가스를 줄이는 효과를 보여주고 있다. 상에서 살펴본 개발 중인 바이오항공유의 제조기술이 상업화되기 위해서는 무엇보다도 공정 간소화를 통한 저에너지화에 따른 고효율 공정개선을 통해 생산단가를 낮추는 노력이 절실히 필요한 실정이다. 또한, 바이오연료가 주로 수송용 연료로 널리 보급되어 사용되고 있는 것을 고려하면 기존 수송용 바이오연료와의 원료수급 측면에서 경쟁이 있을 수밖에 없는 데 이러한 바이오 항공유에 최적화된 원료개발도 시급한 실정이다. 이러한 세계 바이오항공유 제조기술을 분석해 볼 때, 국내에서 개발 중인 바이오 항공유가 상업화되기 위해서는 국내 바이오매스 원료수급 현실을 반영한 공정 개발과 온실가스를 줄이는 효과가 높은 고효율 공정개발을 통해 한국형 바이오항공유 제조공정 표준 모델개발이 필요한 실정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 연구비 지원(No.20143010091790)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다(‘농업/임목부산물 열분해오일 활용 안정화 및 수침탈산소반응 업그레이딩을 통한 수송연료화 기술개발’).

References

1. J.-K. Kim, E.-S. Yim, and C. Jung, "Study on comparison of global biofuels mandates policy in transport Sector", *New & Renewable Energy*, 7, 2011, p. 18.
2. J.-K. Kim, E.-S. Yim, and C. Jung, "Study on review sustainability criteria and key approaches

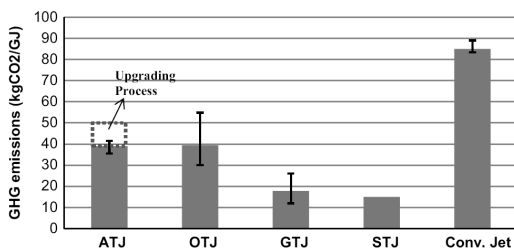


Fig. 11 GHG emissions of jetfuel from various pathways^{23,49-50)}

- for biofuel”, *New & Renewable Energy*, 3, 2013, p. 1.
3. Y. Su, P. Zhang, and Y. Su, “An Overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 2015, p. 991.
 4. S. N. Naik, V.G. Vaibhav, K.R. Prasant, and K.D. Ajay, “Production of first and second generation biofuels : A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2010, p. 578.
 5. IEA. The potential of biofuels in commercial air transport-biojet Fuel. In: 40 IBT, editor, 2012.
 6. C. David, P. Matteo, B. Marco, and T. Daniela, “Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels”, *Applied Energy*, 139, 2014, pp. 767-774.
 7. Leuphana. Bio-aviation fuel feedstock supply challenges, strategies and recent developments, In: Proceedings of the ICAO aviation and sustainable alternative fuels workshop. Montreal, 2011.
 8. A. Bauen, J. Howes, L. Bertuccioli, and C. Chudziak. “Review of the potential for biofuels in aviation”, E4tech, 2009.
 9. Report on IATA alternative fuels, International Air Transport Association, <https://www.iata.org/publications/Pages/alternative-fuels.aspx>.
 10. Report on IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap International Air Transport Association IATA (<https://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/safr-1-2015.pdf>).
 11. U.S. Department of Defense. Detail specification: turbine fuel, aviation, kerosene typ, JP-8 (NATO F-34), NATO F-35, and JP-8+100 (NATO F-37), 2011.
 12. American Society for Testing and Materials. ASTM 1655-08a: standard specification for aviation turbine fuels, 2013.
 13. American Society for Testing and Materials. ASTM D7566-12a standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons, 2013.
 14. A. Llamas, M.J. Garcia-Martinez, A.M. Al-Lal, L. Canoira, and M. Lapuerta, “Bio-kerosene from coconut and palm kernel oils: production and properties of their blends with fossil kerosene”, *Fuel*, 2012, 102, pp. 483-490.
 15. C. J. Chuck, and J. Donnelly, “The compatibility of potential bio-derived fuels with Jet A-1 aviation kerosene”, *Appl. Energy*, 118, 2013, pp. 83-91.
 16. T. D. Hong, T. Soerawidjaj, I.K. Reksowardoj, O. Fujitac, Z. Duniani, and M.X. Pham, “A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process-experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene”, *Chem. Eng. Process*, 74, 2013, pp. 124-130.
 17. A. Llamas, A.M. Al-Lal, M. Hernandez, M. Lapuerta, and L. Canoira, “Biokerosene from Babassu and Camelina oils: production and properties of their blends with fossil kerosene”, *Energy Fuels* 26, 2013, pp. 5968-5976.
 18. A. Demirbas, “Progress and recent trends in biofuel”, *Prog. Energy. Combust.Sci* 33, 2007, pp. 1-18.
 19. S. Blakey, L. Rye, and C.W. Wilson, “Aviation gas turbine alternative fuels: a review”, *Proc. Combust. Inst*, 33, 2011, pp. 2863-2885.
 20. T. N. Kalnes, M.M. McCall M, and D.R. Shonnard, Renewable diesel and jetfuel production from fats and oils. In: Crocker M, editor. Thermochemical-conversion of biomass to liquid fuels and chemicals. Royal Society of Chemistry, 2010.
 21. D. R. Shonnard, L. Williams, and T.N. Kalnes, “Camelina-derived jetfuel and diesel: Sustainable advanced biofuels”, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 29, 2010, pp. 382-92.
 22. G. R. Wilson, T. Edwards, E. Corporan, and R.L. Freerks, “Certification of alternative aviation fuels and blend components”, *Energy Fuels* 27, 2013, pp. 962-966.
 23. W. Wang, and Tag. L, “Bio-jet fuel conversion technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 2016, pp. 801-822
 24. BYOGY Renewables. Alcohol To Jet (ATJ) emerging through ASTM. ICAO aviation and sustainable alternative fuels workshop. Montreal Canada, 2011.

25. B. W. HowkBW, and W.A. Lazier, Thehydration, dehydration and hydrolysis of Organic Compounds. In: national research council, editor. John Wiley & Sons, Inc: New York, NY, 1940, pp. 28-69.
26. N. Zhan ,Y. Hu, H. Li, D. Yu, Y. Han, and H. Huang. "Lanthanum-phosphorous modified HZSM-5 catalysts in dehydration of ethanol to ethylene: acomparative analysis", Catal. Commun, 11, 2010, pp. 633-637.
27. K. Weissermel, and H.J. Arpe. Industrial organic chemistry. 3rd ed. NewYork, NY: John Wiley & Sons, 2008.
28. B. G. Harvey, and R.L. Quintana. "Synthesis of renewable jet and diesel fuels from 2-ethyl-1-hexene", Energy. Environ. Sci, 2010, 3, pp. 352-357.
29. J. Taylor, M. Jenni, M. Peters, "Dehydration of fermented isobutanol for the production of renewable chemicals and fuels", Top Catal. 53, 2010, pp. 1224-1230.
30. F. K. Kazi, J. Fortman, R. Anex, G. Kothandaraman, D. Hsu, and A. Aden etal. Techno-economic analysis of biochemical scenarios for production of cellulosic ethanol. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2010.
31. A. Dutta, R.L. Bain, M.J. Bidddy. "Techno-economics of the production of mixed alcohols from ligno-cellulosic biomass via high-temperature gasification", Environ Prog. Sustain. Energy 29, 2010, pp. 163-174.
32. N. Kauffman, and D. Hayes, R. Brown, "A life-cycleassessmentofadvancedbiofuel production from ahectare of corn, Fuel, 90, 2011, pp. 3306-3314.
33. M. Wu, M. Wang, J. Liu, and H. Huo, "Assessment of potential life-cycle energy and greenhouse gas emission effects from using corn-based butanol as a trans- portation fuel", Biotechnol Prog, 24, 2008, pp. 1204-1214.
34. M. N. Pearson. A techno-economic and environmental assessment of hydro-processeed renewable distillate fuels [Thesis]. Cambridge, MA, USA, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
35. L. Rye, S. Blakey, C.W. Wilson, Sustainability of supply or the planet :a review of potential drop in alternative aviation fuels. Energy. Environ. Sci, 2010, pp. 17-27.
36. J. H. Gary, G.E. Handwerk, and M.J. Kaiser. Petroleumrefining, technology and economics. Boca Raton, FL, CRC Press, 2007.
37. L. Li, L.E. Coppola, J. Rine, J.L. Miller, and D. Walker, "Catalytic hydrothermal conversion of triglycerid estononester biofuels", Energy Fuel, 24, 2010, pp. 1305-3015.
38. M. Pearson, C. Wollersheim, and J. Hileman, "A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production", Bioprod. Biorefining, 7, 2013, pp. 89-96.
39. F. You, and B. Wang, "Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed-centralized processing networks, Ind. Eng. Chem. Res, 50, 2011, pp. 10102-10127.
40. J. F. Y. Hu, and Y. Lu, "Application of Fischer-Tropsch synthesis in biomass to liquid conversion", Catalysts, 2, 2012, pp. 303-326.
41. M. E. Dry, "Practical and theoretical aspects of the catalytic Fischer-Tropsch process", Appl. Catal A. Gen, 138, 1996, pp. 319-344.
42. S. T. Sie, and R. Krishna, "Fundamentals and selection of advanced Fischer-Tropsch reactors. Appl Catal A Gen, 186, 1999, pp. 55-70.
43. F. Morales, and B.M. Weckhuysen, "Promotion effects in Co-based Fischer-Tropsch catalysis. Catalysis, 19, 2006, pp. 1-40.
44. J. P. den Breejen, J.R.A. Sietsma, H. Friedrich, J.H. Bitter, and K.P. deJong, "Design of supported cobalt catalysts with maximum activity for the Fischer-Tropsch synthesis", J. Catal, 270, 2010, pp. 146-152.
45. J. P. den Breejen, P.B. Radstake, G.L. Bezemer, J.H. Bitter, V. Frøseth, and A. Holmen, "On the origin of the cobalt particle size effects in Fischer Tropsch catalysis", J. Am. Chem. Soc, 131, 2009, pp. 7197-7203.
46. J. Daniell, M. Köpke, and S. Simpson, "Commercial biomass syngas fermentation", Energies, 5, 2012,

pp. 5372-5417.

47. X. Xie, M. Wang, and J. Han, "Assessment of fuel cycle energy use and greenhouse gas emissions for Fischer Tropsch diesel from coal and cellulosic biomass, *Environ Sci Technol*, 45, 2011, pp. 3047-3053.
48. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, Biomass Technologies Office. Catalytic Conversion of Sugars to Conventional Liquid Fuels. USA, Department of Energy, 2012.
49. Talmadge M. Techno-economic analysis for the conversion of biomass-derived syngas to fuels and chemicals. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
50. J. Han, A. Elgowainy, H. Cai, M.Q. Wang. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. *Bioresour. Technol.* 150, 2013, pp. 447-456.