

목질계 바이오연료 생산을 위한 산업화 기술 및 전망¹

김 영 숙^{2,†}

Current Status and Prospects on Biofuel Conversion Technologies and Facilities, Using Lignocellulosic Biomass¹

Yeong-Suk Kim^{2,†}

요 약

본 논문에서는 최근 목질계바이오매스를 원료로 한 수송용(transportation) 바이오연료의 국제적 상용화 기술의 흐름과 산업체 동향에 대하여 조사하였다. IEA, Bioenergy Task 39에서 집계한 수송용 바이오연료 관련 산업체에서 목질계 원료를 사용하는 산업체는 93개 업체였고, 그중에서 Commercial type의 산업체를 기준으로 생화학적 전환기술을 채택한 업체는 전체의 84%로 나타나 생화학적 전환공정이 목질계 바이오연료 분야의 주류 기술인 것으로 밝혀졌다. 생화학적 전환공정을 채택한 Commercial type 산업체의 주요 생산품은 바이오에탄올로서 연간 약 115만 5천 톤, 바이오오일은 약 12만 톤으로 전 세계의 수송용 연료에 혼입목표량을 대체하기에 매우 부족한 상황인 것으로 밝혀져 수송용 바이오연료 시장은 기술과 규모 면에서 기술개발과 상용화 노력이 더욱 요구됨이 시사되었다. 또한 pilot type의 산업체에서 생화학공정 및 열화학공정기술을 활용한 실험적 생산이 다수 진행되고 있어, 향후 목질계 원료에 의한 액체 바이오연료 기술이 다양하게 실용화될 가능성이 큰 것으로 시사되었다.

ABSTRACT

This study investigated to understand the trend of international commercializing technologies and industrial status of the transportation biofuel based on lignocellulosic biomass. Two major commercializing technologies for the lignocellulosic biofuel are biochemical conversion technology and thermochemical conversion technology. It was reported that a total of 93 industrial companies were using lignocellulosic biomass of all facilities related to advanced biofuel. On the basis of commercial type, the biochemical conversion technology was identified to be the major technology in the lignocellulosic biofuel industries, showing 84% of all. Also the main products of commercial type industrial companies are bioethanol (1,155,000 tons/yr) and bio-oil (120,000 tons/yr), which are in a remarkably inadequate amount to substitute for the transportation biofuel worldwide. It was suggested that the transportation biofuel market was currently in need of further development in both technology and scale, and was in high demands of technological development and commercializing exertion.

¹ Date Received January 19, 2016, Date Accepted September 13, 2016

² 국민대학교 임산생명공학과, Department of Forest Products and Biotechnology, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 김영숙(e-mail: yskim@kookmin.ac.kr)

Keywords : bioenergy, lignocellulosic biomass, lignocellulosic biofuel industries, biochemical conversion, thermochemical conversion

1. 서 언

IEA (International Energy Agency)는 이미 2009년 “World Energy Outlook”을 통해 세계적으로 오일 사용량 증가분의 97%가 수송용 연료로서 화석자원에 유래하며, 이로 인한 온실가스 발생은 점차 증가하여 1990년 대비 2030년에는 50% 이상이 증가될 것으로 예측하면서 이에 대한 대책이 시급함을 시사한 바 있다(IEA, 2009). 이와 같은 상황에서 세계 바이오에탄올 시장 규모는 2017년 972억 달러 수준으로 예측되고 있고, 바이오에탄올은 전 세계 여러 나라에서 RFS (Renewable Fuel Standard, 신재생에너지연료 혼합의무제도)가 실시되면서 휘발유에 혼합하도록 되어 있다(Alternative fuels data center, 2016). 미국은 최대 E10 (바이오에탄올 10% 혼합), 브라질의 경우에는 E25 (바이오에탄올 10% 혼합) 수준으로 높은 의무혼합제도를 유지하고 있다. 중국, 독일, 프랑스 등 여러 국가에서 이미 바이오에탄올을 수송용 연료로 혼합 사용하고 있다(Lim, 2013). 특히 IEA는 “Drop in fuel”로서 차량이나 선박 등 운송기나 연료 공급인프라의 변경 없이 휘발유나 경유에 바이오연료 혼합을 증가시킴으로서 온실가스 감축을 강력하게 주도하고 있다. 미국 환경청에서 제시한 RFS 프로그램의 연차별 혼합율 목표는 수송용 연료로서 2022년에는 1억 3627만 kℓ (360억 갤런) 공급을 목표로 하고 있는데, 이 중에서 당, 전분, 식물성오일 유래는 2015년 공급량을 그대로 유지하고, 목질계 바이오연료를 지속적으로 증가시켜 신재생연료 공급의 44%를 대체목표로 제시하였다(US EPA, 2016). IEA에서는 바이오매스원료의 액체 바이오연료의 산업화에 대한 데이터를 지속적으로 수집하면서 모니터링하고 있다(Bracmorton, *et al.*, 2011).

우리나라의 경우에도 2015년 7월 31일부터 정부는 개정된 제2차 국가에너지기본계획에 따라 경유에 바이오디젤을 혼합 의무화하는 RFS를 시행하고 있

다(Korea Energy Agency, 2015). RFS제도가 2017년부터 휘발유에 적용되기 시작하면 바이오에탄올 시장이 본격적으로 형성될 것으로 전망되며 이때 초기 시장 규모는 30만 kℓ로 예상되어 바이오에탄올의 상용화가 시급히 필요한 과제로 판단된다(Lim, 2013). 특히, EU는 곡물계의 혼합을 5% 한도로 혼합을 허용하고, 국내의 경우에도 목질계바이오매스 유래 바이오알코올에 대해서만 RFS 적용이 가능하도록 정할 것으로 예고되고 있다. 미국 에너지성에서는 옥수수전분을 원료로 한 바이오에탄올의 온실가스 감축 효과는 휘발유 대비 20%, 목질계바이오매스를 원료로 한 바이오에탄올은 60% 이상의 감축효과를 인정하고 있다. 즉, 목질계바이오에탄올이 상용되는 경우에는 옥수수전분유래의 바이오에탄올에 비해 3배의 감축효과를 가진다고 볼 수 있다(U.S.EPA, 2016; U.S. DOE, 2016). 이와 같은 상황에서 수송용 연료 시장에서 목질계 바이오연료의 상용 기술과 산업화 상황은 국내 RFS시행을 앞두고 매우 중요한 과제로 판단된다. 따라서 본 총설에서는 최근 세계적으로 진행되고 있는 목질계바이오매스를 원료로 한 바이오연료의 상용화 기술과 생산 시설 등 산업체 동향에 대해 조사하여 국내 정유업계에서의 목질계 바이오연료 혼합 전략 수립 및 목질계바이오매스를 원료로 한 바이오연료의 생산기술 개발 연구 등에 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 목질계 원료의 주요 에너지 기술

목질계 바이오매스를 원료로 한 상용 에너지 전환 기술에 대해서, IEA (International Energy Agency)는 생화학적전환기술(Biochemical conversion technology)과 열화학적전환기술(Thermochemical conversion technology), 화학적 전환기술(Chemical conversion technology)로 구분하여 산업화기술을 소개하고 있다. 주요 에너지 전환기술은 다음과 같다(Bacovsky *et al.*,

2013; Bozell *et al.*, 2007; kim, 2010).

2.1. 목질계 바이오매스의 생화학적 전환기술

2.1.1. 효모 발효에 의한 에탄올 생산

목질계 바이오매스에서 얻어진 C5 또는 C6 형태의 당당류에 대해 효모의 무기호흡에 의한 발효 공정을 통해 에너지를 생산하는 기술이다. 산업체에서 도입된 전형적인 생산 공정은, SHF (Separate Hydrolysis and Fermentation), SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation), SSCF (Simultaneous Saccharification and Co-Current Fermentation) 및 CBP (Consolidated BioProcessing) 등이다(Sun & Cheng, 2002; Sims *et al.*, 2009; Bacovsky *et al.*, 2013).

2.1.2. 미생물 발효에 의한 acetic acid와 에탄올 생산

acetogenic pathway를 통해 CO₂ 생성 없이 아세트산을 생산하는 미생물을 이용하여 목질계 바이오매스에서 얻어진 당당류로부터 아세트산을 중간생성물로 하여 에탄올을 생산하는 공정이다. 아세트산에서 에탄올 생산에 필요한 수소공급은 리그닌잔유물의 가스화를 통해 얻어진다. ZeaChem이라는 산업체에서 이 공정을 도입하였다.

2.1.3. 미생물 발효에 의한 Farnesene 생산

형질전환된 효모를 이용하여 목질계 바이오매스로부터 얻어진 당당류를 제약, 건강보조식품, 향료, 산업용화학원료 및 연료 등으로 전환가능한 일종의 Isoprenoids를 생산하는 기술이다. Amyris라는 산업체에서 본 공정을 도입하였다.

2.1.4. 효모발효에 의한 부탄올 생산

유전적으로 형질 전환된 효모를 이용하여 목질계 바이오매스로부터 얻어진 당당류를 부탄올로 발효하는 공정이다. 국내 GSCaltex사에서 목재칩으로부터 부탄올을 생산하는 Demo형의 공장이 설치 중에 있다 (Insight of GSCaltex, 2014).

2.1.5. 미생물 발효기술을 이용한 Gas로부터 에탄올 생산

열화학 및 생화학 기술을 융합하여 만들어진 공정으로서 목질계바이오매스의 가스화 공정에 얻어진 일산화탄소, 이산화탄소, 수소 등의 가스를 발효공정을 통해 다양한 알콜류의 연료와 유기산과 메탄같은 화학물질을 생산할 수 있는 공정이다. 미생물을 사용함으로써 공정이 마일드하고 미생물의 유황에 대한 저 민감성으로 가스클리닝 비용이 절감되는 특징이 있다. 그러나 가스에서 액화에너지 전환율이 낮아서 특별한 반응기 디자인이 요구되는 단점이 있는 것으로 소개되고 있다. Coskata, INEOS 및 Lanza Tech. 등의 산업체에서 도입하고 있는 기술이다.

2.2. 열화학적 전환기술에 의한 바이오연료 생산

열화학적 전환기술에는 보통 gasification, pyrolysis 그리고 torrefaction 등이 포함되나 IEA에서 소개하는 산업체는 최근 가장 기술이 진보되어 있는 gasification을 통한 바이오연료 생산 기술을 소개한다 (Bacovsky *et al.*, 2013; Cheung & Anderson, 1997).

2.2.1. Syngas 생산과 정제

목질계 원료를 열분해시켜 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 물, 메탄 등의 물질을 얻고, 이들 가스상의 물질을 촉매 등을 이용하여 BiL 연료로 재합성된다. 또는 1차적 열분해 가스산물을 메탄화하여 천연가스에 대체할 수 있는 Bio-SNG (Synthetic Natural Gas)를 생산하는 기술이다.

2.2.2. 연료의 합성

- Fischer-Tropsch Liquids: Fischer-Tropsch 공정을 통해서 코발트나 철 등의 촉매로 alkanes을 생산하는 것이다. 300~350℃, 20~40 bar조건인 고온 Fischer-Tropsch 공정에서 석유화학물질과 가스, 200~220℃, 20 bar조건에서 디젤유 생산의 원료가 생산된다.
- Synthetic Natural Gas : SNG의 업그레이드, 즉,

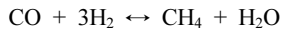
Table 1. Applied technologies for advanced biofuels facilities (2016.1)

Technology	Facility		Main products	Production type
	Lignocellulosic	Non-Lignocellulosic		
Biochemical	66	21 ^{*1)}	Ethanol Butanol Various chemicals	Including Commercial, Demonstration, Pylot
Thermochemical	27	21 ^{*2)}	Diesel (HVO) FT Liquid SNG Bio-oil	Including Commercial, Demonstration, Pylot

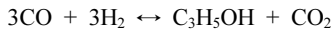
*1) Sugar, Starch etc.

*2) Oil crops, oils and fats, MSW etc.

메탄화, 탈황, 건조, 탈이산화탄소 과정을 통해 합성천연가스를 생산하는 기술로 다음과 같은 반응을 나타낼 수 있다.



- **Mixed alcohols:** 목질계 원료로부터 얻어진 업그레이드된 가스화물질을 출발물질로 하여 촉매를 이용한 전환과정을 통해 다양한 종류의 알코올류를 합성하는 기술로서 다음과 같은 주요 반응을 이용한다.



3. 목질계 원료를 이용한 수송용 바이오연료의 기술 및 산업 동향

목재, 농업 및 임업활동에서 발생하는 부산물 등에서 얻어지는 목질계 원료, 비식용작물 및 산업용폐기물 등을 원료로 생산되는 수송용 생산업체와 생산 활동에 대해 조사한 내용을 Table 1~2 및 Fig. 1에 나타내었다(IEA Bioenergy Task 39, 2016).

Table 1에 제시된 바와 같이, IEA, Bioenergy Task 39에서 집계한 수송용 바이오연료 관련 산업체는 목질계 원료를 사용하는 경우 생화학적 전환 기술을 채택한 기업이 열화학적 전환 기술을 채택한 기업에 비해 현저히 많은 것으로 보고되었다. 그러나 비목질계 원료를 사용하는 산업체의 경우에는 생화학적 전환공정과 열화학적 전환공정을 채택한 기업의 수가 동일한 것으로 나타났다. 대부분의 생화학공정을 도

입한 산업체는 에탄올을 주류로 하여 부탄올, 리그닌, 전기 등을 생산하고, 열화학적 공정 기술에서는 주로 디젤유, SNG 및 FT liquid 등의 에너지를 생산하는 것으로 나타났다. 비목질계 원료를 사용하는 산업체에서 생화학 공정을 채택하는 경우, 주원료가 당이나 전분을 원료로 하고 있고, 열화학 공정을 채택하는 기업에서는 식물성 기름이나 작물, 동물성 지방 및 MSW (Multi solid Wastes) 등의 원료가 주류였다. 이와 같은 분석결과로 볼 때 수송용 바이오연료 산업체에서는 주원료로서 목질계 원료를 사용하며, 주요 기술은 생화학적 전환공정으로 에탄올이 주산물인 것으로 밝혀졌다.

목질계 원료를 사용하는 바이오연료 산업체의 생산형태와 규모는 Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 산업체 형태에 따라 관련 산업체 수와 생산규모가 다양한 것으로 조사되었다. IEA에서 정의하는 세 가지 형태의 생산시설은 다음과 같다. 우선 **Commercial type**은 완전하게 검증된 생산시스템으로서 경제적 목적으로 운영되고 생산품이 시장에 유통되는 생산 시설이고, **Demonstration type**은 연속적 생산 기술 실증, 또는 전 생산공정이나 전 물류체인을 모두 커버할 수 시스템, 또는 생산품이 유통되거나 경제적인 이익 창출이 목적인 생산시스템으로 정의된다. **Pilot type**은 연속적으로 가동되지 않고, 전체 물류체인에 관련되어 있지 않으면서 단지 선택된 기술단계의 실용가능성이 실증되는 단계의 시설, 또는 생산 제품이 시장에 유통되지 않을 수 있는 실험적 생산시설을

Table 2. Lignocellulosic biofuel plant type

Production type	Technology	Facilities	Production (t/y)	Production status
Commercial	Biochemical	21	Ethanol 1,155,359 Bio-oil 120,000	Including Operational, Under -construction, Planned
	Thermochemical	4	Diesel 130,000 Gasoline 30,000 Deisel type hydrocarbon 12,000	
	Sum	25		
Demonstration	Biochemical	25	Ethanol 1,155,359 Butanol 60,125	Including Operational, Under -construction, Planned
	Thermochemical	12	Deisel (HVO) 100,000 Bio-oil 50,350 SNG 11,776 Ethanol 100,511	
	Sum	37		
Pilot	Biochemical	20	Ethanol 5,495	Including Operational, Under -construction, Planned
	Thermochemical	11	FT Liquid 1,216 SNG 7 Gasoline 104 Ethanol 30 Bio-oil 30	
	Sum	31		

- 1) Commercial:
 - facility operated under economical objectives
 - the product is being marketed
- 2) Demmonstration type:
 - facility demonstrating the capability of the technology for continuous production (operated mainly continuously)
 - the facility is covering the entire production process or embedded into an entire material logistic chain
 - the product is being marketed
 - facility may not be operated under economical objectives
- 3) Pylot type:
 - facility, which does not operate continuously
 - facility not embedded into an entire material logistic chain; only the feasibility of selected technological steps is demonstrated
 - the product might not be marketed

지칭한다. 전 세계적으로 Commercial type의 목질계 바이오연료 생산업체는 생화학적 기술공정을 채택한 업체가 전체의 84%인 21업체로 등록되어 있고 이 업체들로부터 시장에 공급되는 주요 생산품인 바이오에탄올은 연간 약 115만 5천 톤, 바이오오일 약 12만 톤에 이른다. 열화학공정으로 생산하는 Commercial type의 4개 산업체에서는 연간 바이오디젤을 13만 톤, 가솔린 3만 톤을 생산한다. Demonstration type의 산업체는 총 37개 중 25개가 생화학공정기술에 의존하고 있으며, Demonstration type의 생화학공정에서 생산되는 바이오에탄올과 부탄올은 연간 약 5.1만

톤 및 6만 톤, 열화학적 공정기술로부터 생산되는 디젤유와 바이오오일은 각각 연간 약 10만 톤과 5만 톤, 에탄올과 SNG는 10.5만 톤 및 1.2만 톤 수준이다. Pilot type으로 운용되는 산업체는 생화학공정기술이 약 20개 업체, 열화학공정기술 로는 약 11업체가 실험적으로 생산하고 있는 것으로 밝혀져 향후 목질계 원료에 의한 액체바이오연료 기술이 다양하게 실용화될 가능성이 큰 것으로 시사되었다.

목질계 원료를 이용한 수송용 바이오연료 산업체는 새롭게 형성되는 신규 시장의 특성으로 인하여 각 산업체의 생산현황이 다양하다. 세계적으로 현재

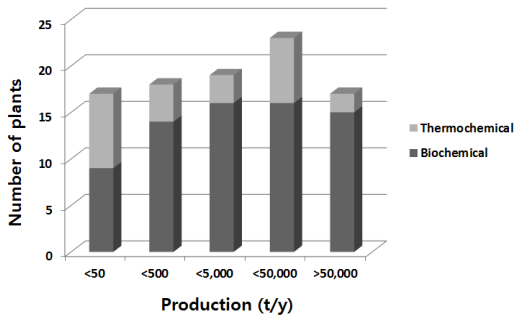


Fig. 1. Number of lignocellulosic biofuel plants in certain size ranges sorted by technology.

가동되고 있는 목질계 바이오연료 생산업체는 총 72 개로서 이 중에서 53개 업체가 생화학적인 전환기술을 도입하고 있다. 또한 현재 건설 중인 기업이 생화학 기술이 4개, 열화학기술이 2개로서 총 6개 업체, 향후 설립계획을 보고한 기업이 생화학기술과 열화학 기술을 합하여 총 15개 업체이다.

목질계 바이오연료 생산업체의 연간 생산량을 규모별로 분류한 결과는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 <50 t/y 규모에서 >100,000 t/y 규모에 이르기까지 다양한 것으로 분석되었다. 연간 5,000~50,000 t/y 규모의 생산 활동을 하는 산업체가 23개로 가장 많았고, 50,000 t/y 이상의 생산량을 나타내는 산업체도 17개 업체, 500~5,000 t/y 규모는 19개 업체 등으로 분포되어 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2에 제시된 바와 같이, 수송용 목질계 바이오연료 생산업체의 국가별 분포를 보면 미국과 유럽지역에 가장 많은 것으로 나타났다. 그러나 유럽이 이탈리아, 독일, 스웨덴, 덴마크, 네델란드, 핀란드, 스페인, 오스트리아, 터키, 프랑스 등의 국가가 포함된 것을 고려하면 한 국가로서 미국이 바이오연료 시장을 선도적으로 견인의 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 특히 미국에서 목질계 바이오연료 기술은 생화학적인 전환공정 기술이 주도적이며 유럽의 경우에는 미국보다 열화학적인 공정기술을 도입한 산업체가 많이 분포한 것으로 나타났다.

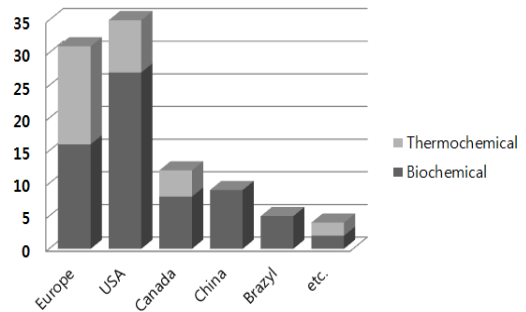


Fig. 2. Number of lignocellulosic biofuel plants in countries sorted by country.

4. 결 론

최근 국제적으로 상용화되는 목질계원료의 생화학적인 전환기술은 효모 발효에 의한 에탄올 생산, 미생물 발효에 의한 acetic acid와 에탄올 생산, 미생물 발효에 의한 Farnesene 생산, 효모발효에 의한 부탄올 생산 및 미생물 발효기술을 이용한 Gas로부터 에탄올 생산 기술 등이 주류인 것으로 조사되었다. 또한 열화학적인 전환기술 중에서 최근 가장 진보된 기술은 gasification인 것으로 보고되었다.

수송용 바이오연료 관련 산업체에서 목질계 원료를 사용하는 산업체는 93개 업체이었으나, Demonstration type과 Pylot type이 전체 산업체 중 약 2/3 정도를 차지하여 목질계바이오연료 산업이 기술과 규모면에서 아직 실증적 시험단계에 있는 것으로 나타났다. Commercial type의 산업체를 기준으로 생화학적인 전환기술을 채택한 업체는 전체의 84%로 생화학적인 전환공정이 목질계바이오 연료분야의 주류 기술인 것으로 밝혀졌다. 그러나 Demonstration type과 Pilot type의 다수 업체에서 열화학 공정으로 실험 생산하고 있어 향후 목질계바이오연료 기술이 다양하게 실용화될 가능성이 큰 것으로 시사되었다. 목질계 바이오연료 생산업체의 국가별 분포를 조사한 결과, 미국이 수송용바이오연료 분야의 선도적 견인(leading) 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 또한 목질계바이오연료 공급은 실제 수송용 바이오연료 수요

에 비해 아직도 현저하게 부족한 상황으로 이에 대한 지속적인 기술개발과 상용화 노력의 필요성이 큰 것으로 시사되었다.

사 사

본 연구는 국민대학교 2012년도 교내연구비지원에 의해 수행되었다.

REFERENCES

- Alternative fuels data center, 2016. <http://www.afdc.energy.gov/laws/RFS>
- Bacovsky, D., Nikolaus, L., Monica, O., Manfred, W. 2013. Status of Advanced Biofuels Demonstration Facilities in 2012, A Report to IEA Bioenergy Task 39.
- Bracmort, K., Schnepf, R., Stubbs, M., Yacobucci, B.D. 2011. Cellulosic biofuels: Analysis of policy issues for congress, In: Biofuels, Biofinery and Renewable Energy: Issues and Development, p1~23, Nova science publishers, Inc.
- Bozell, J.J., Holladay, J.E., Johnson, D., White, J.F. 2007. Top value Added Chemicals from Biomass- Volume II : Results of Screening for Potential Candidates from Bio refinery Lignin. PNNL-16983, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and the National renewable Energy Laboratory (NREL), Richland, WA.
- Cheung, S.W., Anderson, B.C. 1997. Laboratory investigation of ethanol production from municipal primary wastewater. *Bioresour. Technol.* 59: 81-96.
- IEA, World Energy Outlook, 2009. International Energy Agency. OECD/Paris.
- IEA Bioenergy Task 39, 2016. <http://demoplants.bioenergy2020.eu/explanations.html>
- Insight of GSCaltex, 2014. Energy production with waste wood?-Eco friendly oil land, Biobuthanol, <http://www.insightofgscaltex.com>
- Kim, Y.S. 2010. A Research Trend on the enhancement of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass, *Journal of Forest Science*, 26(2), 137-148.
- Korea Energy Agency, 2015. Renewable Fuel Standard, <http://www.knrec.or.kr>
- Lim, D.H. 2013. Bioethanol: A requirement and prospect for expansion of market, KISTI MARKET REPORT, Vol. 3 Issue 10.
- Sims, R., Taylor, M., Saddler, J., Mabee, W. 2009. From 1st to 2nd generation biofuel technologies: An overview of current industry and RD&D activities (A joint Task 39 and IEAHQ Report).
- Sun, Y., Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production a review. *Bioresource Technology* 83(1): 1-11.
- U.S.EPA, 2016. <http://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>