

주요 ASEAN 국가의 목질계 바이오에탄올의 활용 및 전망에 관한 연구¹

허수정² · 최준원^{2,3,†}

Study on Utilization and Prospect of Lignocellulosic Bioethanol in ASEAN Countries¹

Su Jung Heo² · Joon Weon Choi^{2,3,†}

요약

현재 수송용 연료 첨가제로 유통되고 있는 바이오에탄올은 주로 옥수수과 사탕수수과 같은 식용(1세대) 바이오매스를 활용하여 생산된 것으로 농산물 가격상승 및 윤리적인 차원에서 다양한 문제점을 유발할 수 있다. 이를 해결하기 위해 비식용 자원인 목질계 바이오매스를 활용할 수 있는데, 그 예로 짚과 Bagasse (사탕수수 찌꺼기)와 같은 농업 부산물과 목재가공 산업에서 발생하는 톱밥 등의 임업 부산물 등이 있다. 따라서 목질계 바이오에탄올 생산은 2세대 바이오매스의 효과적인 활용 경로가 될 수 있으며, 그 원료는 1세대 자원보다 풍부하며 저렴한 원료의 확보가 가능하다. 이러한 바이오연료를 사용함으로써 얻게 되는 가장 큰 장점으로는 화석연료와 달리 환경에 미치는 영향을 최소화하여 온실가스 감축에 기여하는 것을 들 수 있다. 본 연구에서는 목질계 바이오에탄올 활용을 통해 이루어질 수 있는 온실가스 감축효과와 ASEAN 국가(인도네시아, 말레이시아, 태국, 필리핀)에서 현재 시행되고 있는 재생에너지에 대한 정부 정책을 연구하였다. 이러한 네 국가에서는 바이오연료에 관한 많은 정책과 인센티브 등이 발전되어 왔으며, 이산화탄소 배출 감축 목표와 바이오연료 의무 혼합률을 점차 증가시킬 것으로 조사되었다.

ABSTRACT

Currently, bioethanol, a fuel additive for transportation, is produced mainly by using biomass (first generation) such as corn and sugar canes. First generation biomass can cause various problems in terms of increase in agricultural prices and ethical reasons. To address these problems, a nonedible lignocellulosic biomass can be utilized. Agricultural byproducts such as straw, bagasse, and forest byproducts from the wood processing industry. Therefore, production of wood based bioethanol can be an effective utilization route of second generation biomass, and its raw materials are

¹ Date Received June 22, 2017, Date Accepted August 20, 2017

² 서울대학교 국제농업기술대학원. Graduate School of International Agricultural Technology, Seoul National University, Pyeongchang 25354, Republic of Korea

³ 서울대학교 그린바이오과학기술연구원. Institute of Green-Bio Science and Technology, Seoul National University, Pyeongchang 25354, Republic of Korea

† 교신저자(Corresponding author): 최준원(e-mail: cjl@snu.ac.kr)

more abundant than first generation resources. Furthermore, it is possible to secure cheap raw materials. One of the biggest advantages of using biofuels is that it contributes to the reduction of greenhouse gases by minimizing the environmental impact, unlike fossil fuels. In this study, we investigated the greenhouse gas reduction effects that can be achieved through the use of Lignocellulosic bioethanol and government policies on renewable energy currently being implemented in ASEAN countries (Indonesia, Malaysia, Thailand and the Philippines). In these four countries, policies and incentives related to biofuels have been developed. It is expected that the reduction ratio of carbon dioxide emission and the mixed biofuel will be gradually increased in the future.

Keywords : ASEAN, renewable energy policy, lignocellulosic biomass, bioethanol

1. 서 론

지난 반세기 동안 화석자원의 무분별한 활용으로 축적된 온실가스로 인해 평균 해수면이 상승하고 있다. 이를 해결하기 위해 세계적으로 온실가스 방출을 제한하기 위한 기후변화 협약 회의가 매년 열리고 있으며, 유한한 석유자원을 대체하기 위해 청정 수송 연료에 대한 관심이 집중되고 있다. 바이오연료 중에서 현재 이용되고 있는 바이오에탄올은 주로 1세대, 즉 옥수수과 사탕수수 같은 곡물자원의 변환공정을 통해 생산되는 것으로 농산물 가격상승으로 이어지게 되는 단점이 있다. 특히 미래 식량고갈의 측면에서 볼 때 곡물자원을 통해 생산된 바이오에탄올은 음식으로 생산되었을 때와 비교하여 에너지 원료로서의 그 타당성은 급격히 떨어질 수밖에 없다. 또한, 원료재배와 생산과정에서의 상당한 온실가스 배출로 기후변화를 초래하는 원인이 되기도 한다. 1세대 바이오에탄올의 생산원료를 대체할 수 있는 방안으로는 농업생산력의 향상을 통해 수요를 충당하거나 목질계 바이오매스(2세대)와 같은 비식량작물을 에너지연료로써 적극 활용하는 것이 있다. 우선, 전자의 경우는 식용 자원을 에너지연료로 사용한다는 것은 미래를 대비한 에너지 연료로는 부적절하며 본 연구의 취지에 맞지 않다고 판단되었다. 반면, 후자의 경우 목질계 바이오매스는 비식용 자원으로서 각종 곡물의 짚과 사탕수수 찌꺼기(bagasse)와 같은 농업폐기물, 톱밥, 풀, 나무 조각 등의 임업부산물을 포함한다. 따라서 이를 활용하여 생산되는 바이오에탄올은 식량자원과도 겹치지 않으며 원료의 효과적인 이용 경로가 될 수 있다.

기후변화를 가장 현명하게 대처하는 방안으로서 각 국가 간의 협력은 배제할 수 없는 사항이며, 앞으로도 꾸준히 탄소배출권 거래제를 통하여 탄소집약적인 경제구조를 개선하고 중장기적 온실가스 감축 목표를 구축해야 한다. 이를 위해 ASEAN (Association of Southeast Asian Nations)은 재생에너지를 활용한 바이오연료 개발을 추진하고 있다. 그중 인도네시아, 말레이시아, 태국, 필리핀이 주요 바이오매스 자원 생산 국가이며 바이오연료에 관한 많은 정책과 인센티브 등이 발전되어 왔다(Anuman *et al.*, 2016).

그러나 ASEAN 국가의 바이오연료 연구에 관한 국문자료는 거의 없는 실정이다. 바이오에탄올의 기술을 연구하기 앞서 CDM¹⁾ 사업을 통해 탄소배출권을 얻을 수 있는 국가의 재생에너지 정책 연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구는 주요 ASEAN 국가에서 현재 시행 중에 있는 재생에너지 정책과 바이오연료 의무 혼합률을 조사하였으며, 각 나라의 산림면적 대비 이용되고 있는 산림 내 토지 비율 변화 양상을 살펴보았다. 바이오에탄올 생산을 통해 이루어질 수 있는 환경 파괴 감축 정도에 대해 조사하여 그 이점과 함께 국내 바이오연료 분야에 적용 가능한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

2. 목질계 바이오에탄올 생산 공정

목질계 바이오매스의 종류에는 농업부산물과 임지 잔재, 초본류, 도시고형폐기물 등이 포함된다. 이러한 목질계 바이오매스(Fig. 1)는 2세대로 분류되며,

1) The Clean Development Mechanism, 온실가스 감축사업

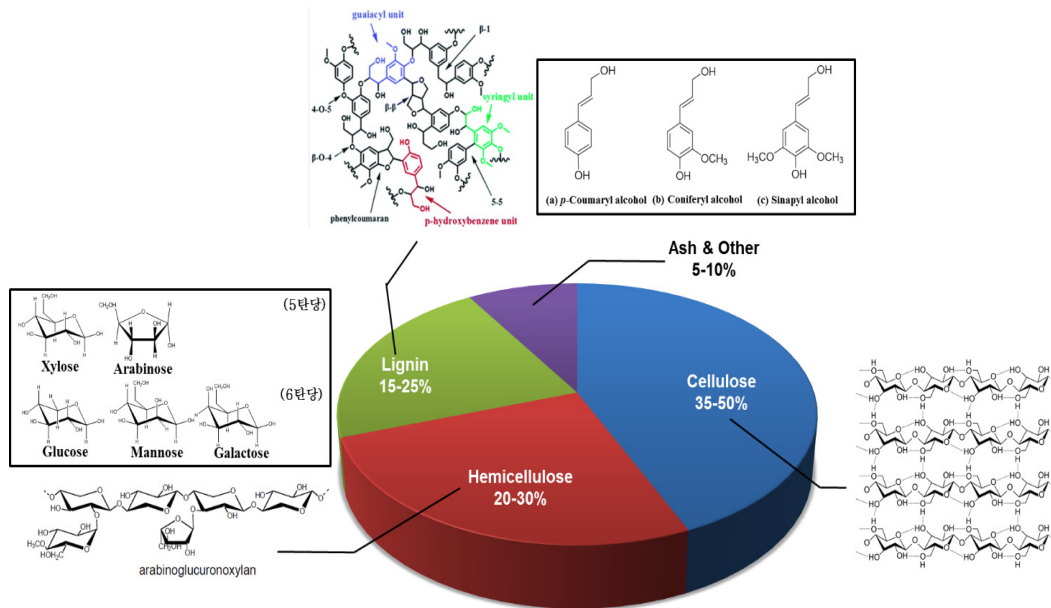


Fig. 1. Chemical composition of Lignocellulosic biomass.

1세대의 곡물계 자원과 달리 리그닌을 포함하고 있어 에탄올로 전환되기 위해서는 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스를 효과적으로 분리하기 위한 전처리 과정이 필수적이다(Amarasekara, 2012a). 전처리 과정의 종류로서는 물리적 방법, 화학적 방법, 물리화학적 방법, 생물학적 방법이 있다. 대표적인 방법은 화학적 방법으로 산 또는 알칼리를 이용해 고온에서 처리하는 것이다. 또한, 원료의 특성에 따라서도 효율적인 전처리 방법이 달라지므로 각 시료에 맞는 전처리 방법의 적용이 중요하다고 볼 수 있다(Kim *et al.*, 2011).

바이오에탄올 생산 공정에서의 당화와 발효 과정에서 가장 널리 쓰이는 것은 SSF²⁾로, 제조 비용문제를 극복할 수 있는 가능성을 제공하는 방법이라고 할 수 있다. 전체 공정에서 보았을 때 목질계 바이오매스는 전처리 후 효소 가수분해되어 SSF 또는 SSCF 공정을 거쳐 증류되어 알코올로 전환하게 된다. 이때, SSF 공정에서는 셀룰로오스 가수분해 후 분리한 Glucose를 동시에 당화와 발효를 시켜 증류하는 공정으로서 효소에 대한 최적 온도를 맞추는

것이 중요하다. SSCF³⁾공정에서는 6탄당 만을 이용하는 SSF 공정과 비교하여 비용이 줄어드는 장점이 있다. 그러나 5탄당과 6탄당 모두를 이용하는 공정으로서 상용화 하기에는 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이는 에탄올 발효에 사용되는 대부분의 효모균은 자일로스(5탄당)를 에탄올로 전환할 수 없기 때문에 향후 새로운 균주의 개발이 시급한 과제라고 볼 수 있다(Amarasekara, 2012b). 바이오리파이너리(Biorefinery, 기존 산업체계에서 석유역할을 대체하는 개념)의 측면에서 바라본 목질계 바이오에탄올 생산 공정에서는 부산물로 리그닌이 생산되는데 이를 활용하여 화학자원을 대체할 고부가가치 제품(플라스틱)의 생산 기술이 꾸준히 개발 중에 있다(Amarasekara, 2012b).

3. ASEAN 국가의 재생에너지 수급 현황

Table 1은 주요 ASEAN 국가의 산림면적과 그중 이용되고 있는 토지면적 비율을 나타낸 것이다. 인도네시아는 가장 넓은 산림 면적과 바이오매스 축적량

2) Simultaneous Saccharification and Fermentation.

3) Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation.

Table 1. Total forest area as well as its ratio as a percentage of land area in the selected ASEAN countries

Country	Total Forest Area (000 Ha)			Forest Areas as a percentage of Land Areas (%)			Annual Change 1990-2012
	1990	2000	2012	1990	2000	2012	
Indonesia	118,545	99,409	93,062	65.4	54.9	51.4	-1.3
Malaysia	22,376	21,591	20,282	68.1	65.7	61.7	-0.5
Thailand	19,549	19,004	19,002	38.3	37.2	37.2	-0.2
Philippines	6,570	7,117	7,775	22.0	23.9	26.1	0.9
Total	167,040	147,121	140,121				

(Source: FAO⁴⁾ Statistics Division 2016; <http://faostat.fao.org>)

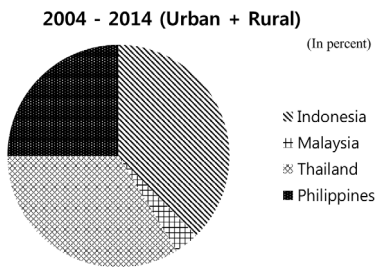


Fig. 2. Population below the national poverty line (ASEAN Statistical Yearbook, 2016, modified).
source : ASEAN Secretariat,

을 가지고 있으나 1990년 이후 불법 벌채와 산불의 증가로 인해 그 양이 꾸준히 감소한 반면(ITTO⁵⁾) 다른 나라는 비슷한 수준을 유지했다. 이때 Annual Change가 의미하는 바는 국토 면적 대비 산림비율 변화 양상으로서 필리핀을 제외한 나머지 국가의 총 헥타르(Ha) 비율이 감소하였다는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 2004년부터 2014년에 걸친 주요 ASEAN 국가에서의 빈곤율을 나타낸 것으로 인도네시아가 상대적으로 높은 수치를 나타내었고 말레이시아와 태국, 필리핀 순으로 뒤를 이었다. 각 국가는 바이오 연료를 통해 추가적인 고용 창출과 현재의 빈곤 수준을 감축하는 것을 목표로 하고 있다(Slette *et al.*, 2012).

세계적으로 화석연료의 의존성 증가가 문제되고 있으며 WEO (World Energy Outlook)는 말레이시아

의 경우에 다음과 같이 예측하였다; 1차 에너지 수요는 2013년에서 2040년 사이에 160 Mtoe⁶⁾로 거의 두 배가 될 것이며 그중 석유 수요는 2014년 670 kb/d⁷⁾에서 2040년에는 약 1 mb/d⁸⁾로 증가할 것이다(IEA⁹⁾, 2015). ASEAN 전체에서 봤을 때 2040년에는 석유 수입 의존도가 40% 이상으로 높아짐으로 인해 그 수입에 대한 지출은 연간 약 190억 달러(USD)에 달할 것으로 예측된다(IEA, 2015). Fig. 3은 ASEAN 국가에서의 원유와 석유 수출입에 관한 변화 양상을 나타내고 있으며 과거에 비해 수입량이 크게 증가했다는 것을 알 수 있다.

2011년 ASEAN 전체 에너지 소비량은 일본과 거의 비슷한 수준으로 약 444 Mtoe였으며, 2040년에는 1186 Mtoe로 연 이율 3.1% 상승할 것으로 예측된다(Mofijur *et al.*, 2015). 그중에서도 인도네시아는 2035년에 일본의 에너지 소비를 넘어설 것이고, 세계에서 5번째로 큰 에너지 소비국이 될 것으로 예상된다. ASEAN Secretariat은 인도네시아는 물론 생산량이 제한되어있는 태국과 필리핀은 2014년에 48%에서 2040년에 78%로 화석연료 의존도가 급격히 상승할 것이라 판단하였다. 또한, 말레이시아의 경우에는 현재 석유 수입에 거의 의존하지 않으나 향후 수요량이 생산량을 앞지르면서 그 의존도가 증가할 것으로 예상된다(IEA, 2015). 이러한 화석연료의 의존

6) Million tonnes of oil equivalent.
7) Kilo barrels per day.
8) Million barrels per day.
9) International Energy Agency.

4) Food and Agricultural Organization, United Nations.
5) International Tropical Timber Organization.

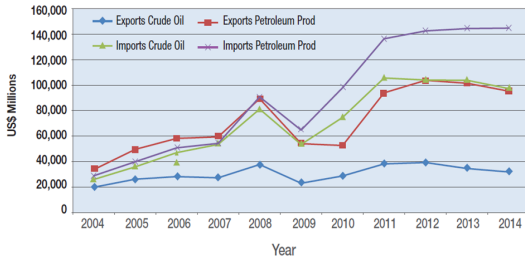


Fig. 3. Trend of ASEAN exports and imports of crude oil and petroleum products (ASEAN Statistical Yearbook, 2016).

도를 감소하기 위해 일부 ASEAN 국가에서는 농산물 공급 원료 이용을 통한 바이오연료 생산을 촉진하는 정책을 시행하고 있다. 다음 파트에서 주요 ASEAN 국가에서의 각 정부의 정책과 지원 방안을 살펴보고자 하겠다.

3.1. 인도네시아

인도네시아는 팜유 분야에서 세계 생산량의 44.5%, 수출량의 45.3%를 차지한다. 이와 같이 팜유 생산 분야에서 높은 비율을 차지하고 있는 국가 특성상 바이오디젤의 활용도가 바이오에탄올보다 높다(GAIN¹⁰ reports Indonesia, 2016). GAIN reports에 의하면 인도네시아에는 에탄올 공급 원료에 대한 당밀 공급을 할 수 있는 50개 이상의 사탕수수 공장이 운영되고 있다. 에탄올을 생산함에 있어 카사바에서 소량을 정제하는 경우도 있지만 주로 사탕수수를 통해 만들어지는 당밀을 이용하고 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 당밀 생산 추정치와 공장 시설을 바탕으로 인도네시아의 에탄올 생산량은 2015년 2억 500만 리터에서 2016년에는 2억 700만 리터로 증가할 것으로 예상된다(GAIN reports Indonesia, 2016). 정부는 대통령령 제5 (2006 제정) 이후, 2025년까지 국내 에너지 수요의 5% 이상의 바이오연료 사용을 목표로 설정하여(Slette *et al.*, 2012), 재생에너지 사용을 증대시키고, 관련 산업체가 경제 발전 단계에 도달할 때까지 보조금을 지원하는 등의 인센티브 제공을 원칙으로

10) Global Agricultural Information.

하고 있다(Mofijur *et al.*, 2015). 현재 정부는 2025년까지 매년 1%의 에너지 집약도 감소와 23%의 재생에너지 점유율 증가(2050년 31% 증가)를 목표로 설정하였고(IEA, 2015), 이 외에도 1) 석유에 대한 의존도를 줄이기 위해 바이오연료의 이용을 확대함으로써 에너지의 다양화 추진 2) 불필요한 보조금을 제거함으로써 합리적인 에너지원료의 가격 책정 3) 에너지 분야에 더 많은 개입과 자본 투자를 유치하는 것을 포함시켰다(Kim과 Gorman, 2007). 전반적으로 인도네시아의 바이오 연료 제조업체를 위한 세금 면제 혜택이 없지만 연료 보조금 및 혼합 의무와 같은 규정은 바이오에탄올 생산에 중요한 역할을 하고 있다(IEA, 2015).

3.2. 말레이시아

말레이시아는 세계적인 팜 오일 생산국가로서 그 특성상 바이오디젤을 주로 활용하고 있다. USDA (2016)는 2017년 말레이시아에서의 바이오디젤의 평균 혼합률은 10%로, 소비량은 약 7억 7천만 리터로 예측하였다(GAIN reports Malaysia, 2016). GAIN Reports에 의하면 말레이시아 내 팜유 공장 폐수(POME¹¹)를 이용해 바이오에탄올의 생산 계획이 있었으나 선진 기술의 부재와 높은 투자 자본으로 인해 실행이 불가능하다고 판단되어 현재 생산되지 않고 있다. 또한, 지속적인 원료 공급에 어려움이 있어 에탄올은 연료나 다른 산업 화학 물질 및 심지어 음료의 원료로도 사용되지 않고 있다. 그러나 정부는 2021년까지 카사바와 사탕수수 생산량의 증대를 통해 바이오에탄올 생산을 활성화하고 2030년까지 경유의 5%를 바이오디젤로 대체하는 것을 목표로 하였다(IEA, 2015). 말레이시아에서는 대략 362개의 팜유 공장에서 연간 약 8200만 톤의 FFB (Fresh Fruit Bunches)를 생산하고 있는데 이 과정에서 3300만 톤의 농업 폐기물이 EFB (Empty Fruit Bunches)형태로 생산되고 있다(Balat, 2011). 이러한 팜유 부산물인 EFB를 이용하여 바이오에탄올 생산 시, 석유는 물론

11) Palm oil mill effluent.

팜유를 통하여 생산되는 바이오디젤과 달리 지속 가능한 발전을 실현할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 태국

동남아시아 국가 중 바이오에탄올의 가장 높은 성장률을 보이고 있는 태국은 세계에서 두 번째로 큰 사탕수수과 카사바 수출국으로 바이오에탄올 산업이 바이오디젤 산업보다 먼저 성장하였다(GAIN reports Thailand, 2016). GAIN reports에 따르면 태국의 바이오에탄올 현황은 다음과 같다; 태국 정부는 가격 인센티브를 통해 가솔린 사용을 지속적으로 홍보하고 있으며, 국가 석유 기금(State Oil Fund)이 지불하는 가격 보조금(54 USD/gal¹²⁾을 통해 일반 가솔린에 비해 가솔린이 20~40% 정도 저렴한 값을 유지하고 있다. 또한, 정부는 각 주유소에 대해 E85¹³⁾ 가솔린 판매 확장을 위해 위의 보조금 정책을 시행 및 홍보하였으며, FFV¹⁴⁾ 제조를 지원하여 소비세의 3%를 감면 받을 수 있는 혜택을 제공하고 있다. 이와 같은 노력으로 인해 정부는 2015년 총 에탄올 생산량의 약 70%를 차지하는 당밀을 기반으로 한 바이오에탄올 생산을 2026년까지 18억 리터에 달할 것으로 기대하고 있다. 또한 바이오에탄올 소비 측면에서는 2015년 12억 리터에서 2021년 33억 리터로, 2036년까지 41억 리터로 늘릴 계획을 갖고 있다. 태국 정부는 AEDP¹⁵⁾ (2012-2021) 목표에 따라 다음과 같이 조치를 취했는데(Kumar와 Salam, 2013) 첫 번째로, 사탕수수와 카사바의 전국 평균 생산량을 증가시켰으며, 두 번째로, E20¹⁶⁾를 저렴하게 공급하고 전용 주유소의 수를 단계적으로 늘렸다. 사례로, 가솔린을 사용하는 주유소의 수는 전국적으로 계속 증가하여, 2015년 5월에 측정된 E20의 경우 2,836개, E85의 경우 678개에 비하여 2016년 5월에는 각 3,105개, 867

개로 증가하였다(GAIN reports Thailand, 2016). 세 번째로는, E85 전용 자동차를 생산하는 제조사에 대해 각 대 당 약 1,000 USD의 세금 감면 제도를 이행하였으며, 마지막으로, 에탄올 자유 무역을 위해 에탄올 소비세 개정 관련 법률을 규정하였다. 또한, 화석연료 보조금의 제거와 에너지 효율의 향상을 통해 2036년까지 2010년 대비 30%의 에너지 집약도를 줄이는 것을 목표로 설정하였다(IEA, 2015). 이에 따른 재생에너지의 활용 분야에서는 2036년까지 운송 연료 사용의 20%에 도달하는 바이오연료의 발전량을 달성하는 데에 초점을 두고 있다(IEA, 2015).

3.4. 필리핀

필리핀은 평균 연간 생산량이 2백만 톤 이상인 주요작물인 사탕수수와 팜 오일, 코코넛 오일의 생산 국가로서 그 특성상 바이오에탄올과 바이오디젤 모두 연료로 사용하고 있다(Zhou, 2009). ASEAN 국가 중 태국 다음으로 야심 찬 중장기적 재생에너지 목표를 갖고 있으며, 2006년 필리핀 Arroyo 대통령은 ‘바이오연료 법(Biofuels Act of 2006)’으로 알려진 RA (Republic Act) 9367에 서명했다(Zhou *et al.*, 2009). 이는 주로 재생에너지 원료를 개발 및 활용하는 법안으로서, 화석연료를 대체할 가솔린의 부과의무를 통한 유독성 및 온실가스 배출을 완화시키는 내용 등을 포함하고 있다. 구체적으로, 2년 이내에 판매되고 분배되는 가솔린에서 바이오에탄올이 최소 5% 이상, 4년 이내에는 10% 이상이 혼합되어야 함을 명시하고 있다. 이때 수입에 관련해서는 현지에서 생산된 바이오에탄올이 부족한 경우에만 허용된다(Zhou *et al.*, 2009). 국립 재생에너지 프로그램(National Renewable Energy Program)에 따르면 필리핀에서는 의무 혼합률을 2020년까지 E20, 2025년까지 E85로 비율을 인상하는 것을 목표로 하고 있다(GAIN reports Philippines, 2016). 정부는 이러한 법안들을 통해서 재생에너지에 대한 연구와 개발을 하고 관련 기술 생산의 품질 보증을 해주는 등 투자와 인센티브 및 프로모션을 펼쳐왔다. 주 내용으로는 DOE (Department Of Energy)로부터 인증받거나 관련 지분 최소 60% 이상을 소유

12) 1 gallon (갤런) = 3.785411784 l(리터).

13) 바이오에탄올 85%와 가솔린 15%의 혼합물.

14) Flexible-fuel Vehicle, 가솔린과 가솔린 주유가 호환 가능한 자동차.

15) Alternative Energy Development Plan.

16) 바이오에탄올 20%와 가솔린 80%의 혼합물.

한 필리핀 시민 또는 단체가 보유하고 있는 바이오연료 활동에 관해서는 별개로 재정적인 지원을 하는 것이 있다(Zhou *et al.*, 2009). 또한, 수입된 바이오연료에 사용되는 원료(옥수수, 사탕수수, 카사바, 코코넛, 자트로파)산업체에 관해서는 세금을 부과하지 않는다는 내용도 포함되어 있다. 또한, 은행 및 기타 금융 기관은 바이오연료의 생산, 저장, 취급, 혼합 및 운송과 원료 공급에 종사하는 필리핀 국민에게 최소 자본금의 60%를 융자하는 것을 최우선으로 하고 있다(Kumar와 Salam, 2013). 그러나 최근 급격한 기후변화로 인해 바이오에탄올의 원료인 사탕수수 생산량이 저해될 가능성이 제기되었다. 그 사례로 2015년부터 계속된 엘니뇨(El Nino) 현상으로 인해 작물(사탕수수)생산 감소는 2016/17년 이후에도 지속될 예정이며, 2016년 말에는 라니냐(La Nina)로 인해 과도한 강수량으로 그 피해가 커질 것으로 예상되었다(GAIN reports Philippines, 2016). 이에 대한 해결책으로 목질계 바이오매스를 원료로 사용하기 위해 연구 중에 있으나 상업용 규모의 개발은 2030년에 도달할 정도로 긴 시간을 필요로 할 것으로 판단되었다(GAIN reports Philippines, 2016). 이러한 기후변화 문제점의 대책에 앞서 필리핀 정부는 2020년까지 BAU¹⁷⁾ 대비 연간 최종 수요의 15%에 해당하는 에너지 절감을 달성하는 것을 목표로 두고 있다. 또한, 재생에너지 분야에서는 2030년까지 그 발전량을 15 GW로 이전과 비교했을 때 세 배로 증가시킬 것을 염두에 두고 있다(IEA, 2015).

3.5. 온실가스 감축 목표와 바이오에탄올의 환경 영향 분석

WEO (IEA, 2015)는 2040년 동남아시아의 에너지 분야에서 CO₂ 배출량이 두 배로 증가하여 2.4 Gt (기가톤)에 도달한다고 예측하고 있다(IEA, 2015). 이 중 ASEAN에서는 2011년 1.2 Gt에서 2035년에 2.3 Gt으로 증가할 것이라 예측되었는데 이는 전 세계 배출량의 6.1%로, 주요 원인은 화석연료 사용의 급속한

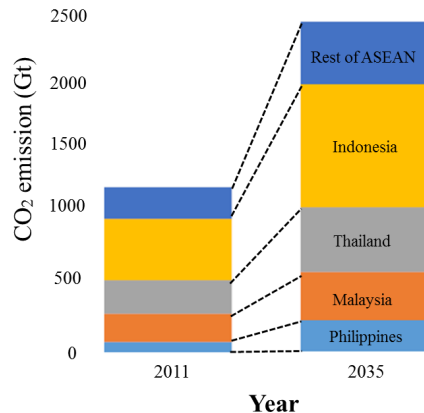


Fig. 4. Expectation of future CO₂ emission through energy consumption in ASEAN countries (Mofijur *et al.*, 2015).

증가라고 볼 수 있다(Mofijur *et al.*, 2015). 이에 따른 환경파괴를 줄이기 위해 인도네시아는 2020년까지 온실가스 배출량을 BAU 수준 26%로, 말레이시아는 GDP의 탄소 집약도를 2005년 기준 2020년까지 40% 감축시키는 것을 목표로 설정하였다(IEA, 2015).

Fig. 4에서는 ASEAN의 에너지 관련(액체 연료, 천연 가스 및 석탄의 연소) 이산화탄소 배출량을 예측하고 있다. 주요 국가 중 인도네시아가 가장 높은 수치를 나타내었고 다음으로 태국, 말레이시아, 필리핀 순으로 뒤를 이었다. 온실가스 배출량 감축을 위해 바이오연료를 고려할 수 있는데 이는 탄소중립성인 식물을 이용해 전환되어 연료 생산 시 발생한 이산화탄소의 배출량만큼 흡수를 할 수 있다. 결국 연료 소비 시 실질적인 배출량을 0으로 만들어 환경에 끼치는 영향을 최소화하게 된다. 이러한 특성 덕분에 실제로 태국에서 10% 당밀에 기초한 에탄올(E10¹⁸⁾)을 연소시켜 CO₂ 및 NO_x 배출량을 조사한 결과, 가솔린 연소에 비해 각각 4.3% 및 3.1%의 감소가 있었음을 확인할 수 있었다(Kumar and Salam, 2013). 또한 Kim (2007)의 연구결과에 의하면 바이오에탄올 혼합률이 10% 정도만 되어도 미세분진(Particulate

17) Business as usual, 2030년 온실가스 배출전망치.

18) 바이오에탄올 10% 혼합.

Table 2. Summary of the biofuel policies in the ASEAN countries

Countries	Policy/Policy target	Current blending Mandate
Indonesia	MEMR Regulation No. 25 (2013) - Reduce GHG emissions 26% from BAU level by 2020, increased to 41% reduction with enhanced international assistance - Displace 5% of gasoline with bioethanol and reduce energy intensity by 1% per year to 2025 - Increase share of “new and renewable energy” in primary energy supply to reach 23% by 2025 and 31% by 2050	E3 B5
Malaysia	- Increase capacity of renewables to 2080 MW by 2020 and 4000MW by 2030 - Reduce carbon intensity of GDP by 40% by 2020 from 2005 levels - Increase production of cassava and sugarcane for bioethanol production by 2021 - Displace 5% of diesel in road transport by 2030	B5
Thailand	AEDP (2012-2021) - Target for biofuels 44%, replacing oil consumption Ethanol 9 ml/day by 2021 - Government policy to waive gasohol product (gasohol 91 and gasohol 95) to state oil fund around 6 baht per liter, subsidy E20 10 baht per liter and 20 baht per liter in case of E85 - Renewables to reach 20% of power generation by; biofuels to reach 20% of transport fuel use by 2036 - Reduce energy intensity by 30% compared with 2010 by 2036 through the removal of fossil-fuel subsidies and accelerated energy efficiency improvements	E3 B5
Philippines	- Renewable Energy Plan and Programs (2011-2030) - Improvements in the yields of all feedstock will be necessary to support future targets - Displace 15% of diesel and 20% of gasoline with biofuels by 2030 - Attain energy savings equivalent to 15% of annual final demand relative to BAU by 2020 - Triple the installed capacity of renewables power generation to 15GW by 2030	E10 B5

Source: ASEAN secretariat; (IEA, 2015; Slette *et al.*, 2012; Chanthawong *et al.*, 2016; Anuman *et al.*, 2016)
Notes: MW =megawatts; GW = gigawatts

matter)이 50% 감소되고 가솔린 방향족물질을 희석하여 2차 미세분진 형성을 감소시키는 효과가 있음이 확인되었다(Kim and Gorman, 2007). 기존의 가솔린에 대한 온실가스 감축 비율은 1세대 바이오에탄올의 경우 약 30%, 목질계 바이오매스 기반의 경우는 약 90%인 것으로 밝혀졌다(Fig. 5). 따라서, 바이오에탄올이 가솔린의 일부 비율에 대체되는 만큼 환경에 대한 부정적인 영향은 크게 줄어들 것이라 판단된다.

Table 2는 주요 ASEAN 국가의 재생에너지 관련 정책과 현재 의무 혼합률을 간략히 정리한 것이다. 네 국가 모두 바이오연료 혼합 정책을 우선순위로 두고 있으며, 특히 태국과 필리핀에서 바이오에탄올 목표 혼합률이 높은 것으로 나타났다. 이 외에도 인도네시아와 필리핀에서는 구체적인 온실가스 배출량

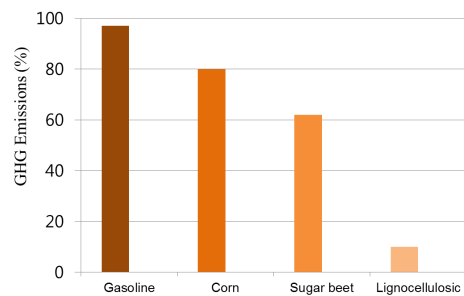


Fig. 5. Comparison of GHG emissions between gasoline and bioethanols produced from a variety of feedstocks (Balat, 2011).

감축 목표를 규정하였으며, 태국과 말레이시아의 경우는 연료 작물 생산성 향상에 관한 내용이 추가적으로 포함되어 있다.

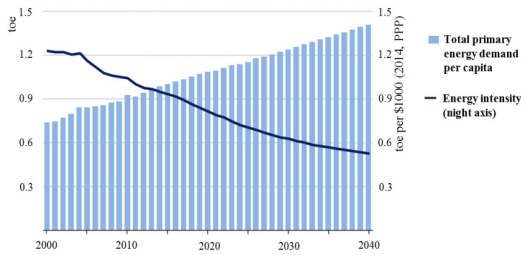


Fig. 6. Primary energy demand per capita and energy intensity in Southeast Asia.

Notes: PPP = Purchasing power parity; toe=tonne of oil equivalent.
Source: Southeast Asia Energy Outlook 2015

4. 사회경제적 시사점

ASEAN 국가에서 바이오연료를 개발하는 주요 원동력은 에너지안보와 사회경제적 관심사에 대한 우려가 대부분이고 환경에 대한 우려는 그다지 높은 편이 아니다(Kumar and Salam, 2013). 따라서 바이오연료의 보급은 경제성보다는 사회적 편익 요인으로서 접근하여야 할 것이다(Kumar and Salam, 2013). 지속가능한 경영 측면에서 ASEAN 경제공동체(ASEAN Economic Community)의 협력으로, ASEAN 각 정부는 온실가스 감축을 위한 국가 목표를 설정하여 국제 기후 협상에 적극적으로 참여해 왔다(IEA, 2015). 에너지안보를 측정하는 기준은 석유 수입의 의존도로서, 수입해야 하는 국가에서 사용되는 석유의 비율이 높을수록 취약성 또한 높아지게 되는 특성을 가지고 있다. 화석연료 의존도를 낮추게 된다면 환경에도 좋은 영향을 끼칠 수 있으며, 자국의 에너지 관련 분야의 독립성과 동시에 국가 경쟁력을 향상시킬 수 있다. Fig. 6은 1차 에너지와 같은 원유 수입 의존도로 측정 한 동남아시아 국가의 에너지 집약도의 변화 양상을 나타내었는데, 2040년으로 갈수록 1차 에너지 수요가 높아짐에 따라 에너지 집약도가 감소하는 것을 파악할 수 있다.

2007-2008년의 급격한 유가 상승으로 인해 ASEAN 국가들은 세계의 다른 국가들과 마찬가지로 바이오연료를 홍보하였고, 에너지안보 보장을 주요 목적으로 그에 따른 정책을 개발하였다(Kumar and

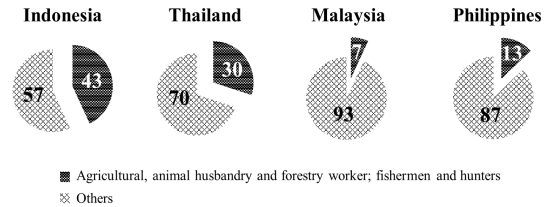


Fig. 7. Percentage of employment by occupation (ASEAN Statistical Yearbook, 2016, modified).

Salam, 2013). 바이오연료를 통해 지역경제 활성화와 동시에 대기오염 또한 개선시킬 수 있다(Fig. 5). 구체적으로는 국민들이 에너지에 대한 대략적인 지식을 갖출 수 있으며 기후변화와 에너지 고갈에 대한 경각심을 키우는 등 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

주요 ASEAN 국가에서의 저조한 농업분야의 고용률(어두운 영역이 농업뿐만 아니라 동물과 어업 등 다른 분야도 포함되어 있어 실제 농업분야의 고용률은 더 낮을 것으로 추측된다)을 Fig. 7에서 확인해 볼 수 있다. 이를 향상시키기 위해 IEA Bridge Scenario를 적극 활용할 수 있는데 다음과 같다; 1) 지역 전력 망 상호 연결을 확대, 2) 에너지 인프라 개발 투자 유치, 3) 에너지서비스 접근성 향상, 4) 화석연료 보조금 단계적 폐지에 주력하는 것이 있다. 이 외에도, 높은 바이오연료 혼합을 위해 정부의 지속적인 고품질 연료 공급과 그에 따른 소비자들을 위한 교육이 필요하다. 또한 연구의 투명성과 자동차 제조 업체, 바이오에탄올 생산 업체, 연료 유통 업체 및 관리자와의 적극적인 참여가 연료 활용의 성공을 보장하는 최선의 방법이 될 것이다(GAIN reports Malaysia, 2016). 앞에서 언급하였듯이, ASEAN 국가에서는 바이오연료의 보급에 있어 경제성보다 사회적 편익을 고려해야 할 것이다. 따라서 이러한 정책을 시행함에 있어 ASEAN 국가는 자국의 경제적 부담을 최소화하기 위한 방안을 고려해볼 수 있다. 대표적으로, 탄소배출권 거래제를 적극 활용하여 선진국의 지원을 통해 재생에너지 기술 개발이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

목질계 바이오매스를 활용한 바이오에탄올은 1세대 바이오에탄올과 달리 그 원료의 획득이 용이하며 식량자원에 국한되지 않아 발전가능성이 무궁무진하다. 원료는 주로 농업부산물이나 임업 잔여물, 도시 고형폐기물 등이 대부분이며 버려질 자원을 에너지 원료로 사용한다는 것이 가장 큰 장점이다. 기존 가솔린에 대한 온실가스 감축 비율은 목질계 바이오에탄올의 경우 약 90% 감축할 수 있어 환경에 대한 부정적인 영향은 크게 줄어들게 된다. 이를 활용함에 있어 극복해야 할 관문으로는, 1세대에서는 필요하지 않았던 전처리 공정에 들어가는 비용 문제와 동시당화 효소의 문제를 해결해 Pilot plant¹⁹⁾의 한계를 극복하는 것이 있다.

ASEAN 국가에서는 바이오연료에 대한 관심이 증대되고 있으며 화석연료 의존을 줄이기 위해 바이오연료 사용을 점진적으로 증가시키기 위한 정책이 발전되어 왔다. 주요 네 국가 중 인도네시아와 필리핀 각 정부는 구체적인 이산화탄소 배출 감축 목표를 규정하였고, 말레이시아와 태국 각 정부는 연료 작물 생산성 향상을 통해 바이오에탄올(말레이시아의 경우 바이오디젤)을 더욱 효율적으로 생산하고자 하였다. 또한, 태국의 경우에는 화석연료 보조금을 폐지하고 바이오에탄올의 보조금 설정에 대한 구체적인 방안이 설정되어 왔다. 앞으로도 이러한 재생에너지 기반 발전과 추가적인 인프라를 구축하기 위한 각 정부의 꾸준한 중장기적 목표 설정이 중요하다. 이를 통해 국민들이 재생에너지에 대한 대략적인 지식 함양과 함께 기후변화와 에너지 고갈문제에 대한 경각심을 갖추는 등 긍정적인 영향을 받게 될 것이다. ASEAN 국가는 청정개발체제(CDM)시행으로 인한 탄소배출권을 획득하여 기후변화 문제에 효율적으로 대처가 가능할 것으로 판단된다. 이 후에는 선진국의 사례를 본 받아 더 많은 연구가 이루어져야 하며 2세대 바이오에탄올의 한계를 극복해서 경제적으로

도, 환경적으로도 지속 가능한 정책의 필요성이 큰 것으로 시사되었다.

사 사

본 연구는 산림청 신기후체제 대응 연구사업(과제번호 2017052A00-1720-BB02)의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Amarasekara, A.S. 2012a. Handbook of cellulosic ethanol. Department of chemistry, Chapter 1. Renewable fuels. Prairie View A&M University, Wiley-Scrivener, Beverly, MA, USA.
- Amarasekara, A.S. 2012b. Handbook of cellulosic ethanol. Department of chemistry, Chapter 5. Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Prairie View A&M University, Wiley-Scrivener, Beverly, MA, USA.
- Anuman, C., Dhakal, S. 2016. Liquid biofuels development in southeast asian countries: an analysis of market, policies and challenges. *Waste and Biomass Valorization* 7.1: 157-173.
- ASEAN Statistical Yearbook 2015. 2016. ASEAN Secretariat, Community relations division/Jakarta.
- Balat, M. 2011. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. *Energy conversion and management* 52.2: 858-875.
- GAIN (Global Agricultural Information) reports, 2016. Biofuels Annual Indonesia. USDA/Jakarta.
- GAIN (Global Agricultural Information) reports, 2016. Biofuels Annual Malaysia. USDA/Kuala Lumpur.
- GAIN (Global Agricultural Information) reports, 2016. Biofuels Annual Philippines. USDA/Manila.
- GAIN (Global Agricultural Information) reports, 2016. Biofuels Annual Thailand 2016. USDA/Bangkok.
- International Tropical Timber Organization.
- IEA, World Energy Outlook 2013 Special Report -

19) 파일럿 플랜트, 대규모 공장생산 플랜트 건설에 착수하기 전 소규모의 시험 설비.

- Southeast Asia Energy Outlook, International Energy Agency. OECD/Paris.
- IEA, World Energy Outlook 2015 Special Report - Southeast Asia Energy Outlook, International Energy Agency. OECD/Paris.
- International Energy Agency. Available from: (<http://www.iea.org/statistics/onlinedataservice/>).
- Kim, Y.S., Gorman, T. 2007. Biomass energy in the USA: a literature review (III)-bioethanol production from biomass and feedstock supply. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 35(1): 1-10.
- Kim, H.Y., Lee, J.W., Jeffries, T.W., Choi I.G. 2011. Evaluation of oxalic acid pretreatment condition using response surface method for producing bio-ethanol from yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) by simultaneous saccharification and fermentation. *Wood Science and Technology* 39(1): 75-85.
- Kumar, S., Shrestha, P., Salam, P.A. 2013. A review of biofuel policies in the major biofuel producing countries of ASEAN: Production, targets, policy drivers and impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26: 822-836.
- Mofijur, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Ashrafur Rahman, S.M., Mahmudul, H.M. 2015. Energy scenario and biofuel policies and targets in ASEAN countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46: 51-61.
- Slette, J.P., Wiyono, I.E. 2012. Biofuels annual. Global agricultural information network, Indonesia. Available from: [http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_Jakarta_Indonesia_8-14-2012.pdf]; 2012[accessed September 2012].
- Zhou, A., Thomson, E. 2009. The development of biofuels in Asia. *Applied Energy* 86: 11-20.