

인도네시아 바이오매스 반탄화를 통해 제조된 고품위 고형연료의 활용

유지호*

한국에너지기술연구원
34129 대전시 유성구 가정로 152

(2020년 10월 6일 접수; 2020년 10월 30일 수정본 접수; 2020년 10월 30일 채택)

Utilization of Upgraded Solid Fuel Made by the Torrefaction of Indonesian Biomass

Jiho Yoo*

Korea Institute of Energy Research
152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon-si, 34129, Korea

(Received for review October 6, 2020; Revision received October 30, 2020; Accepted October 30, 2020)

요 약

바이오매스는 풍부한 신재생에너지로 화석연료에 의한 온실가스 배출을 줄일 수 있는 자원으로 활용될 수 있다. 인도네시아에서는 경제성이 우수한 대량의 조림지 부산물과 팜 부산물이 발생된다. 일반적으로 바이오매스들은 낮은 열량 및 연소 효율에 의해 연료로서 사용하기 어려운 경우가 많다. 최근 이러한 바이오매스를 고품위 연료로 전환하는 반탄화 기술 개발이 활발하며, 유럽을 중심으로 다수의 생산 설비가 상용화되었다. 우리나라는 현재 ~2 million ton yr⁻¹ 이상의 혼소용 우드펠릿을 동남아시아에서 수입하고 있다. 하지만 반탄화 연료 시장은 아직 열리지 않았고, 추후 국내 기술 및 시장 환경 성숙에 따라 도입되리라 예상된다. 인도네시아 현지 혼소용 연료로서 반탄화된 조림지 부산물은 신재생에너지 확대 정책(feed-in-tariff, FIT) 하에서 경제성 확보 가능하다. 하지만 팜 부산물인 EFB (empty fruit bunch, EFB)를 혼소용 연료로 사용하기 위해서는 알카리 금속 제거에 따른 경제성 저하 극복 방안이 강구되어야 한다. ETS (emission trading system, ETS)와 CDM (clean development mechanism, CDM)제도의 지원을 받는 경우 EFB는 연료 민감성이 낮은 시멘트 소성로에서 기존 석탄을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 바이오매스, 폐바이오매스, 반탄화, 고형연료, 인도네시아

Abstract : Biomass is an abundant renewable energy resource that can replace fossil fuels for the reduction of greenhouse gas (GHG). Indonesia has a large number of cheap biomass feedstocks, such as reforestation (waste wood) and palm residues (empty fruit bunch or EFB). In general, raw biomass contains more than 20% moisture and lacks calorific value, energy density, grindability, and combustion efficiency. Those properties are not acceptable fuel attributes as the conditions currently stand. Recently, torrefaction facilities, especially in European countries, have been built to upgrade raw biomass to solid fuel with high quality. In Korea, there is no significant market for torrefied solid fuel (co-firing) made of biomass residues, and only the wood pellet market presently thrives (~2 million ton yr⁻¹). However, increasing demand for an upgraded solid fuel exists. In Indonesia, torrefied woody residues as co-firing fuel are economically feasible under the governmental promotion of renewable energy such as in feed-in-tariff (FIT). EFB, one of the chief palm residues, could replace coal in cement kiln when the emission trading system (ETS) and clean development mechanism (CDM) system are implemented. However, technical issues such as slagging (alkali metal) and corrosion (chlorine) should be addressed to utilize torrefied EFB at a pulverized coal boiler.

Keywords : Biomass, Waste biomass, Torrefaction, Solid fuel, Indonesia

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jyoo@kier.re.kr; Tel: +82-42-860-3047; Fax: +82-42-860-3529

doi: 10.7464/ksct.2020.26.4.239 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

바이오매스는 연간 ~5조 톤이 자연에서 생산되는 가장 풍부한 에너지 자원으로 지역적 편중 없이 어디서나 쉽게 얻을 수 있다. 그러므로 대부분의 나라에서 온실가스의 배출이 없는 신재생 자원으로서 에너지 생산을 위해 활용되고 있다. 다양한 종류의 바이오매스 자원이 존재하며 이들은 다음의 Table 1와 같이 분류할 수 있다[1].

바이오매스 자원의 중요성은 동남아시아 국가에서 더욱 두드러진다. 특히 인도네시아의 경우 그 역할이 더욱 중요한데, 열대 기후에 의해 산림 성장이 빠르고 세계에서 가장 많은 팜 농장 (palm plantation)을 보유하고 있기 때문이다[2]. 이에 따라 많은 양의 바이오매스 부산물이 발생되며, 이들의 고품위 연료화를 통해 자원의 재활용과 온실 가스 저감 효과를 얻을 수 있다[3]. 이러한 저감 효과는 신재생에너지의무공급제도(Renewable energy portfolio, RPS) 및 emission trading system (ETS) 제도 시행 중인 우리나라를 비롯한 많은 국가에서 화석 연료 대비 낮은 경제성을 보이는 바이오매스 연료의 비즈니스 모델을 제공하며, 최근 관련 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 현재 인도네시아의 미활용 바이오매스 부산물 중에 많은 발생량에 의해 큰 경제적, 사회적 파급효과가 예상되는 대상은 조림지 산림 부산물과 팜 부산물(특히 empty fruit bunch, EFB)이다. 본 논문에서는 이들을 탄화하여 고품위 고품위 연료를 제조 시 연료 특성 변화와 기술 개발 동향 및 잠재적 시장에 대해 논의하였다.

2. 고품위 연료 생산을 위한 인도네시아 바이오매스 원료

바이오매스는 목질계 또는 초본계 등의 분류와 무관하게 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 셀룰로오스(cellulose), 리그닌(lignin)으로 구성된다[4]. 종류에 따라 이들의 상대적 조성비는 다르며,

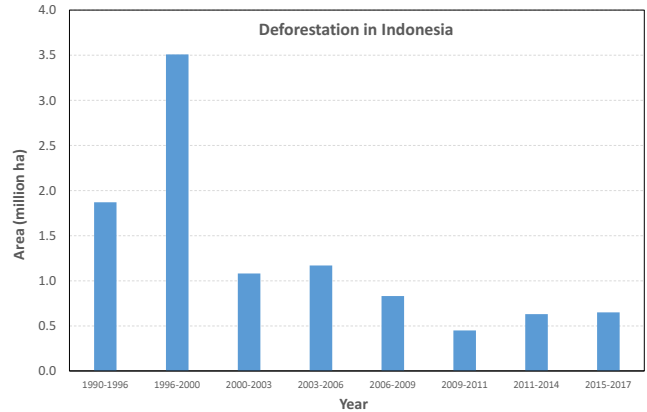


Figure 1. Deforestation area in Indonesia.

아래의 Table 2는 대표적인 인도네시아 바이오매스들의 탄수화물(carbohydrate) 조성을 보여준다[5,6].

연료화 사업을 위해 인도네시아에서 얻을 수 있는 가장 풍부한 바이오매스 원료 중의 하나는 생산 조림지(production forest)에서 발생하는 산림 부산물이다. 일반적으로 산림 부산물의 경우 수집과 이송 비용이 높아 경제성 확보가 어렵다. 하지만 목재 생산을 위한 조림지 및 주변의 목재 가공에서 발생하는 부산물은 이러한 단점을 극복할 수 있다. 우리나라 산림청 자료에 따르면 2019년 기준 국내 기업에 의한 인도네시아 조림사업 면적은 ~0.17 million ha, 인도네시아 현지 한국계 기업인 코린도(Korindo)에 의한 면적은 ~0.22 million ha이다[7]. 인도네시아의 1990-2017년 동안 벌채된 지역은 주로 숲 지역이며, 숲이 아닌 지역을 포함한 전체 벌채 면적은 ~10.2 million ha로 보고되었다(Figure 1)[8]. 이중 생산림 지역은 전체 면적의 40%로 가정 시 4.1 million ha이다. 목재 가공 부산물(가공 수율 ~50%)과 벌채 부산물이 발생되므로, 생산 가능한 목재 펠릿 양은 185 million ton로 추정된다(45 ton ha⁻¹의 목재 펠릿 생산 가정 시). 인도네시아에는 Afrika (Maesopsis eminii), Sengon (Paraserianthes

Table 1. Classification of Biomass Resources (Adapted from EUBIA (2007))

Sector	Type	Examples
Forestry	Dedicated forestry	Short rotation plantations (Willow, poplar & eucalyptus)
	Forestry residues	Wood blocks and wood chips from thinning
Agriculture	Dry lingo-cellulosic energy crops	Herbaceous crops (Miscanthus, reed canary grass & giant reed)
	Oil, sugar & starch energy crops	Oil seeds for methylesters (Rape seed & sunflowers)
		Sugar crops for ethanol (Sugarcane & sweet sorghum)
		Starch crops for ethanol (Maize & wheat)
	Agriculture residues	Straw, prunings from vineyards & fruit trees
Livestock	Wet & dry manure	
Industry	Industrial residues	Industrial waste wood, sawdust from sawmills
		Fibrous vegetable waste from paper industries
Waste	Dry lingo-cellulosic	Residues from parks and gardens (Prunings & grasses)
	Contaminated waste	Demolition wood
		Organic fraction of municipal solid waste
		Biodegradable landfill waste, landfill gas
		Sewage sludge

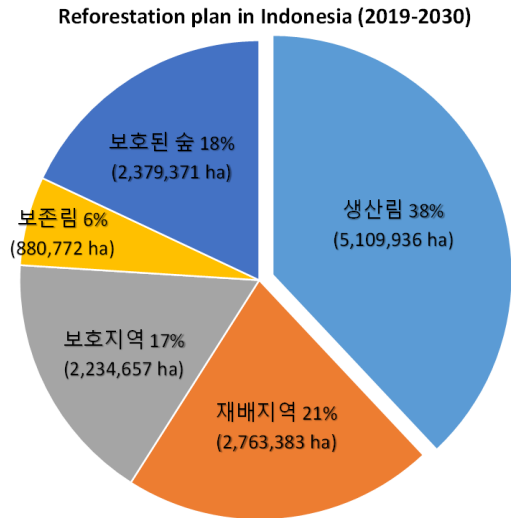


Figure 2. Reforestation plan in Indonesia (2019-2030).

falcataria), Gmelina (Gmelina arborea), Mindi (Melia azedarach), Akasia (Acacia mangium), Red Jabon (Anthocephalus macrophylla), White Jabon (Anthocephalus cadamba), Rubberwood (Hevea brasiliensis) 등의 속성수 재배가 진행되고 있고, 이들은 5년 주기로 벌목할 수 있다. 속성수를 벌채 지역에 도입 시 지속적이고 안정적인 원료 공급이 가능해진다.

Figure 2에 보이듯이 2018년에 작성된 인도네시아의 조림지 조성 계획(2019~2030년)은 생산림 조림지 면적 ~5.1 million ha 증가를 포함한다[8]. 5년마다 벌목 가능한 속성수의 조림을 가정하면, 생산 가능한 목재 펄트 양은 매년 3.8 million ton yr⁻¹ 씩 증가할 수 있다. 또한 인도네시아는 생산림 외에도 생산림으로 전환 가능한 지역이 많이 존재하므로 경제성 갖춘 산림 부산물의 안정적 공급에 매우 유리하다.

Table 2. Carbohydrate composition of biomass (wt.%)

Feedstock	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
Empty fruit bunch	38	35	24
Palm kernel shell	21	22	51
Oil palm trunk	31	33	28
Oil palm frond	40	30	23
Mesocarp fiber	40	10	33
Rice husk	29-36	12-29	15-20
Wheat straw	35-39	22-30	> 16
Sugarcane bagasse	42	25	20
Sengon (Paraserianthes falcataria)	34	16	27
Afrika	47	17	27
Gmelina (Gmelina arborea)	30	17	30
Mindi (Melia azedarach)	33	18	30
Akasia (Acacia mangium)	26	18	25
White Jabon (Anthocephalus cadamba)	36	16	25
Eucalyptus	45-51	11-18	29
Pine	42-49	13-25	23-29
Poplar wood	45-51	25-28	10-21

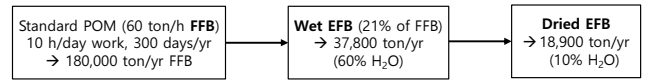


Figure 3. Estimation of dried EFB amount from a standard POM.

2018년 기준 인도네시아의 팜 농장(palm plantation) 면적은 ~13 million ha이고 1,000개 이상의 팜 오일 추출 공장(palm oil mill, POM)이 있다. 전형적인 팜유 산업(POM)에서 처리되는 모든 fresh fruit bunch (FFB)는 20~22% crude palm oil (CPO), 5~6% palm kernel oil (PKO), 20~25% EFB, 13~15% fiber, 6~6.5% palm kernel shell (PKS), 그리고 15~25% 수분으로 전환된다[9]. Standard POM은 60 ton h⁻¹ (fresh fruit bunch (FFB) 기준) 규모이다. 이를 기준으로 계산된 하나의 POM에서 발생하는 연료물질로서의 EFB 발생량은 18,900 ton yr⁻¹이다 (Figure 3). 이때 POM은 하루에 10시간, 일년에 300일 운전됨을 기준으로 하였다.

인도네시아 전체의 EFB 발생량은 2018년 기준 ~37 million ton yr⁻¹으로 추정된다. 이중 5-15%는 소각 후 얻어지는 회분(ash)를 칼륨(potassium) 비료로 판매하고(~0.1 \$ kg⁻¹의 가격), 10~20%는 팜 농장 비료로 사용하며, 남은 ~70%의 EFB는 폐기물로서 매립된다. 이러한 다량의 EFB의 에너지화는 신재생에너지 확보, 자원 재순환 및 탄소 배출 저감에 큰 기여할 수 있다.

3. 반탄화에 의한 바이오매스의 고품위 연료로의 전환

3.1. 바이오매스의 연료로서의 특징

일반적으로 바이오매스는 연소, 가스화 등의 연료로서 석탄 대비 품질이 떨어진다. 단점들은 아래와 같다.

- 높은 수분 함량은 공정 효율 낮추고 자연 분해되어 보관 시 연료 품질의 문제 발생한다. 이에 의해 물리적, 화학적

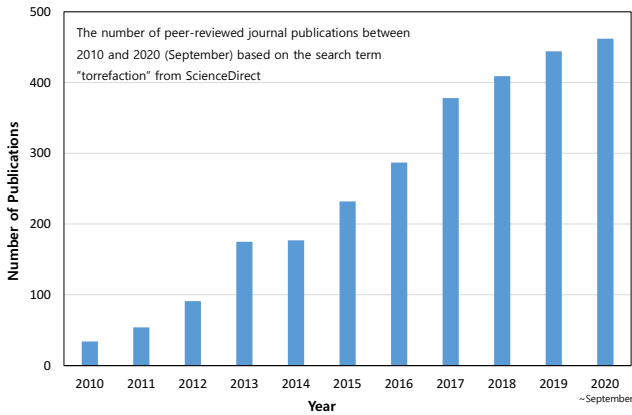


Figure 4. The number of publications with a keyword of "torrefaction".

- 및 미생물학적 특성 변화에 따른 불확실성이 존재한다.
- 일반적으로 낮은 에너지 밀도를 보이고 부피가 크므로 이송에 따른 경제성이 떨어진다.
 - 낮은 연소 효율을 보이고 연소 중 휘발분(연기) 배출이 많다. 즉 탄소와 수소 대비 산소 함량이 높으므로 열화학적 변환에 불리하고 발열량이 떨어진다.
 - 보관 중 수분을 흡수하는 흡습성에 의해 장기 보관이 어렵고 연료 품질의 저하 발생한다.
 - 석탄과 대비하여 분쇄하기 매우 어려우므로 많은 에너지 소모되고, 석탄과 혼소 시 혼소율이 5% 이내로 제한된다.
 - 바이오매스는 종류에 따라 매우 다른 물리적, 화학적 특성을 보이는 비균질성이 있다. 즉 크기, 모양 및 종류가 다양하므로 취급 및 보관 어렵고 연소 특성(고정탄/휘발분, 수분, 발열량)이 매우 다르다.
 - 불규칙한 바이오매스의 모양은 혼소 및 가스화 시스템에 공급 시 안정적 피딩(feeding)에 문제를 야기할 수 있고 추가적인 설비 보안을 필요로 한다.
 - 우드칩 등 일부 바이오매스들은 전처리 없이 연료로 적용 가능하나 많은 경우 반탄화 등의 전처리 후어야 연료로서의 특성 확보할 수 있다.

3.2. 바이오매스의 반탄화

최근 탄소 배출 저감 및 신재생에너지 보급 노력 확대에 따라 바이오매스의 고급 연료화를 위한 반탄화 기술 개발 연구가 매우 활발하다. Figure 4는 반탄화를 주제로 출판된 논문 통계로, 최근 3년여 동안 연간 400편 이상의 논문이 출판되었음을 보여준다.

바이오매스의 반탄화는 저온 열분해(200 ~ 350 °C)라고 정의할 수 있으며 제한된 산소 농도 조건에서 수행된다. 일반적으로 에너지 비용 저감을 위해 직접 가열의 경우 배기가스(flue gas, 산소 농도가 5% 내외의 고온 가스)를 이용한다. 배기가스가 포함하는 산소 가스는 반탄화 반응 시간을 줄일 수 있다[10]. 하지만 연소 증가에 의해 일부 탄소는 배기가스로 전환되며 반응기 온도 증가에 의해 안전에 위협이 될 수 있다. 안전적 운전을 위

해서는 간접 가열 또는 불활성 가스 조건이 유리하나 경제성이 낮아지는 단점이 있다. 입자 크기와 밀도는 반탄화 동역학(kinetics)에 큰 영향을 주므로 이에 따라 반응 온도와 체류시간이 결정된다. 입자가 크면 표면적이 적어 열전달 속도가 감소하고 불균일한 열 분포를 보일 수 있고, 휘발분의 확산(diffusion)이 어려워질 수 있다[11]. 한편 작은 입자의 경우 질량 손실이 증가될 수 있다. 최적의 열효율을 얻기 위해 일반적으로 수분 함량이 10% 이하인 바이오매스 공급 원료(feedstock)을 반탄화 반응기에 투입한다. 특정 온도(~300 °C) 이상에서는 열분해가 본격적으로 진행되어 질량과 에너지 손실이 클 수 있으므로 경제성 저하가 나타날 수 있다. 그러므로 연료 품질과 경제성이 모두 고려된 반응 조건의 설정이 필요하다.

반탄화 초기(160 ~ 180 °C)에는 열적 축합(thermocondensation)에 의해 주로 물이 제거되고 CO₂가 발생된다. 180 ~ 270 °C에서 반탄화에 의해 주로 헤미셀룰로오스가 분해되고 셀룰로오스와 리그닌이 연료의 주성분이 된다. 각 성분의 열적 분해는 200 ~ 260 °C에서 헤미셀룰로오스가, 260 ~ 290 °C에서 셀룰로오스, 그리고 290 °C 이상에서 리그닌의 분해가 이루어진다[12]. 바이오매스 반탄화에 의해 고체, 액체, 기체 등이 생성된다. 고체의 경우 charcoal(숯), 회분(ash)과 더불어 기존 당(sugar) 구조가 일부 유지되고 또한 변형된 당(sugar) 구조가 함께 존재한다. 액체로는 주로 물이 생성되고, 더불어 아세트산(acetic acid) 등의 산(acid) 류, 일부 다당류(polysaccharide) 류가 발생된다. 기체 성분들은 주로 H₂, CO, CO₂, CH₄이며, 일부 페놀(phenol) 류 등의 방향족 화합물이 방출된다.

3.3. 바이오매스 반탄화의 장점

바이오매스가 갖는 연료로서의 단점은 반탄화 과정을 거치면서 대부분 극복될 수 있다.

- 우선 단위 질량(또는 부피)당 에너지 밀도 증가하여 장거리 운송, 취급 및 보관 시 비용을 상대적으로 절감할 수 있다(Figure 5).
- 낮은 산소/탄소 분율(O/C), 수소/탄소 분율(H/C)에 의해 바이오매스 대비 석탄에 더 가까운 연소 및 가스화 거동 보인다. 결국 높은 효율을 얻을 수 있고 휘발분에 의한 연기 발생을 줄일 수 있다.
- 반탄화 공정을 거치면 바이오매스 공급 원료의 종류에 무관하게 균질한 연료 얻을 수 있다(Figure 6). 물리·화학적으로 유사한 특성 확보되므로 단일 장비를 사용할 수 있고

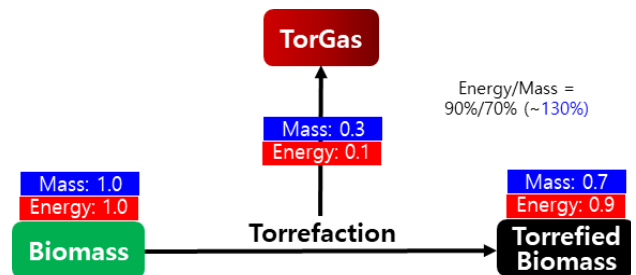


Figure 5. Increased energy density by torrefaction.



Figure 6. Conversion of various biomasses into homogeneous solid fuel.

결국 취급과 보관비용의 절감이 가능하다. 혼합된 바이오매스에서도 균일한 생성물을 얻을 수 있으므로 광범위한 공급 원료 선택이 가능하다. 이는 연료 가용성 및 공급 안정성 개선으로 이어지고 또한 연료 표준화를 통해 거래 및 품질 유지 등에 편리함을 제공한다.

- 반탄화에 의해 분쇄도가 증가되어 ~80%의 분쇄에너지 저감이 가능하고 바이오매스의 석탄과의 혼소 시 혼소율을 급격히 증가시킬 수 있다.
- 반탄화 생성물은 소수성 나타내므로 실외 보관이 가능해지며, 고가의 보관 옵션이 필요 없어져서 운송 및 취급 비용이 낮아진다.
- 생물학적 분해(분해, 곰팡이) 정도가 매우 적다.
- 바이오매스는 유기 또는 무기 화합물 형태로 염소(chlorine, Cl)과 황(sulfur, S)를 포함하며 (특히 초본계) Cl은 장치를 부식시키고 S는 대기오염의 주된 원인이 된다. 반탄화에 의해 Cl, S 함량을 낮게는 90%까지 감소시킬 수 있다[13,14]. 이러한 특징들을 정리하면 다음의 Figure 7과 같다.

3.4. 반탄화된 바이오매스의 연료로서의 특징

반탄화 공정의 주요 동기는 혼소 시 바이오매스의 혼소율을 높여 석탄 사용을 줄임으로써 CO₂ 배출 감소하는 것이다[4].

- 반탄화된 바이오매스는 우드펠릿과 석탄의 중간 정도의 연소 특성을 보인다. 수분 함량은 5% 이하로 낮고, 발열량은 4,000 ~ 5,300 kcal kg⁻¹ (LHV 기준)이며, 겉보기 밀도(bulk density)는 0.65 ~ 0.75 kg L⁻¹을 보인다.
- 반탄화된 바이오매스는 일반 바이오매스 대비 열적으로 더 안정하고 연소 시 더 높은 반응열을 생성하며, 반탄화 정도의 증가에 따라 발열량은 더욱 증가한다.
- 연소 시 셀룰로오스와 리그닌에 의한 질량 손실 피크를 보이며, 연소소진(burnout) 속도는 반탄화에 의한 휘발분 감소에 기인하여 느려진다. 즉 연소 시 더 오래 사용(burning)할 수 있다. 하지만 연소 시간은 다공성 구조와 잔류하는 휘발성 물질로 인해 석탄보다 짧다(휘발분과 다공성은 좌반응성에 영향을 미치는 두 가지 주요 요소임).

반탄화된 바이오매스의 가스화 특성은 다음과 같다[15].

- O/C가 높은 연료는 가스화기의 산화 정도를 증가시켜 가스화 효율을 낮춘다. 반탄화에 의해 바이오매스의 산소 함량 감소하며 결국 산화 경향이 줄어들어 결국 냉가스효율(cold gas efficiency)이 증가된다.
- 가스화 반응에서 발생하는 타르(tar)는 헤미셀룰로오스와 리그닌에 기인하는 바 반탄화에 의해 헤미셀룰로오스가

높은 수분 함량	낮은 수분 함량
낮은 열량 및 에너지 밀도	높은 열량 및 에너지 밀도
낮은 연소 효율 (높은 O/C, H/C)	높은 연소 효율 (낮은 O/C, H/C)
흡습성 (Hygroscopic)	소수성 (Hydrophobic)
낮은 grindability	높은 grindability
Non-uniform 성질	Uniform 성질
제한적 feedstock 선택	넓은 feedstock 선택 폭
높은 염소 함량 (부식)	낮은 염소 함량 (부식 저하)
CO ₂ 배출 많음 (LCA)	CO ₂ 배출 적음 (LCA)

Figure 7. Advantage of biomass torrefaction for solid fuel production.

제거되므로 타르 생성은 크게 감소된다.

- 반탄화에 의한 바이오매스 기공 구조 변화(비표면적 등)는 가스화 반응 속도에 영향을 미칠 수 있다. 비표면적의 증가는 좌와 CO₂/H₂O 간의 이종 접촉(heterogeneous contact)을 향상시키므로 더 높은 좌 전환율(conversion rate)을 얻을 수 있다.

4. 반탄화 기술 개발 동향

4.1. 국외 동향

반탄화는 건조와 열분해의 중간 온도에서 진행되며, 기존의 반응기 구조에서 온도 조절을 통해 제작 가능하다. 기 개발된 반응기로는 rotary drum이 가장 일반적이며 스크류(screw), 이동층, 유동층, 띠 운반(belt conveyor) 타입 등이 다양하게 존재한다. Table 3은 반탄화 반응기 종류 및 관련 회사를 정리하였다[16].

반응기의 제작 목표는 간단하게 만들어서 제조 비용을 줄이고 쉬운 운전 가능하도록 하여 생산성 높이는 것이다. 반응기들은 각각의 구조에 따라 장단점이 있으며 사용 용도 및 공급 원료의 종류 등을 고려하여 선택하게 된다. 아래의 Table 4는 반응기 타입에 따른 장단점을 보여준다[17].

2016년 기준 상용화되었거나 실증 설비 운영 중인 반탄화 공정 실시 예(references)를 다음의 Table 5에 나타냈다[18]. 유럽과 미국을 중심으로 20여개의 반탄화 플랜트가 건설되었으며, 이를 통해 반탄화 기술의 확산 가능성을 확인할 수 있다. 전통적으로 사용하던 로타리 드럼 방식이나 스크류 이송 방식을 채택한 회사가 많으며, 이것은 오랜 시간 운전을 통해 증명된 기술로서 리스크에 대한 염려가 작은 것이 이유인 듯하다. 하지만 에너지 효율이 상대적으로 낮고 긴 체류시간이 필요하므로 이를 극복하기 위해 Multiple hearth 기반 직접가열 방식의 반탄화 기술이 확대되는 추세이다. 유동층(Fluidized bed) 기반 반탄화 기술도 많은 실시 예를 갖는 증명된 기술로 상용화 공정에 적용되고 있다, 하지만 원료 수용성이 낮고 유동을 위해 많은 양의 고온 가스가 필요한 단점이 있다. 또한 이동층(moving bed) 방식의 반탄화 공정 개발도 실증 규모에서 진행되고 있다. 한국에너지기술연구원에서 개발 중인 Counter flow multi baffle (COMB) 공정은 유동층과 유사한 원리를 갖는다. 바이오매스의 하강은 중력에 의해서 이루어지고 컬럼(column) 내부의 방해판(baffle)

Table 3. List of torrefaction reactor type

Type	Company
Rotary drum	CDS (UK), Torr-Coal (NL), BIO3D (FR), EBES AG (AT), 4Energy Invest (BE), BioEndev/ETPC (SWE), Atmosclear S.A. (CH), Andritz (AT), EarthCare Products (USA)
Screw	BTG (NL), Biolake (NL), FoxCoal (NL), Agri-tech Producers (USA)
Multiple hearth furnace	CMI-NESA (BE), Wyssmont (USA)
Torbed reactor	Topell (NL)
Microwave reactor	Rotawave (UK)
Compact moving bed	Andritz/ECN (AT, NL), Thermya (FR), Buhler (DE)
Belt dryer	Stramproy (NL), Agri-tech Producers (USA)
Fixed bed	NewEarth Eco Technology (USA)

Table 4. Advantage/disadvantage of various torrefaction reactors

Reactor type	Advantage	Disadvantage
Rotating drum	Flexible control, proven	Large gas volume, uncertain scale-up, long retention time
Screw	Continuous, inexpensive	Uncertain scale-up, poor heat distribution
Multihearth furnace	Continuous, inexpensive, less sensitive to feedstock shape	
Torbed-Fluidized bed	Continuous, efficient heat transfer, short residence time	Sensitive to feedstock shape
Microwave		High operation cost
Moving bed		Non-uniform product, uneven heat distribution
Belt conveyor	Easy control of residence time, uniform product	Uncertain scale-up, Sensitive to feedstock density
Counter flow multi baffle (COMB)	Efficient gas(G)-solid(S) contact, low G/S ratio, short residence time, high E. efficiency	

Table 5. Commercial and demo. scale torrefaction references

Developer	Technology	Location	Capacity (ton yr ⁻¹)	Scale
American Biocarbon	Unknown	White Castle (US)	200,000	Commercial
Clean Electricity Gen. (UK)	Oscillating belt	Derby (UK)	30,000	Commercial
Hip Lik Green Energy Ltd	Unknown	Malaysia	100,000	Commercial
New Biomass Energy (US)	Screw reactor	Quitman MS (US)	80,000	Commercial
Black Wood/Topell (NL)	Multistage FB	Duiven (NL)	60,000	Commercial
Arigna Fuels (IR)	Screw conveyor	Roscommon (IR)	20,000	Commercial
Torr-Coal (NL)	Rotary drum	Dilsen Stokkem (BE)	30,000	Commercial
Airex (CA)	Cyclonic bed	Becancour QC (CA)	16,000	Demo.
Andritz (AT)	Rotary drum	Frohnleiten (AT)	8,000	Demo.
Andritz (DK)/ECN (NL)	Multiple hearth	Stenderup (DK)	10,000	Demo.
BioEndev (SE)	Screw reactor	Holmsund (SE)	16,000	Demo.
CMI NESA (BE)	Multiple hearth	Seraing (BE)	Undefined	Demo.
Earth Care Products (US)	Rotary drum	Independence KS (US)	20,000	Demo.
Grupo Lantec (ES)	Moving bed	Urnieta (ES)	16,000	Demo.
Integro Earth Fuels (US)	Multiple hearth	Greenville SC (US)	11,000	Demo.
LMK Energy (FR)	Moving bed	Mazingarbe (FR)	20,000	Demo.
Konza Renewable Fuels (US)	Rotary drum	Heally KS (US)	5,000	Demo.
River Basin Energy (US)	FB (aerobic)	Rotterdam (NL)	7,000	Demo.
TSI (US)	Rotary drum	White Castle (LA)	15,000	Demo.

Table 6. List of companies participating IBTC

Company	Country	Website
Airex Energy	Canada	airex-energy.com
AmandusKahl	Germany	akahl.de
Arigna Fuels	Ireland	arignafuels.ie
BioEndev AB	Sweden	bioendev.se
Clean Electricity Generation	Netherlands	cegeneration.com
CPL Industries	UK	cplindustries.co.uk
CPM Europe B.V	Netherlands	cpmeurope.nl
Laborelec/GDF Suez	Belgium	electrabel.be
National Carbon Technologies	USA	national-carbon.com
Next Fuel	Sweden	nextfuel.com
Polytechnik	Austria	biomass.polytechnik.com
Teal Sales Incorporated (TSI)	USA	tsi-inc.net
Torr-Coal	Netherlands	torrcoal.com
Yilkins	Netherlands	yilkins
Advanced Fuel Solutions	Portugal	adfuelsolutions.com
Futerra	Portugal	futerrafuels.com
GreenCarbon	Russia	gc-renewables.com
CENER-CIEMAT	Spain	cener.com
MikseiOy	Finland	mikseimikkeli.fi
ECN part of TNO	Netherlands	tno.nl
Wallonie recherche CRA-W	Belgium	cra.wallonie.be
Wild &Partner	Austria	wild.or.at

에 의해 고체와 기체의 효율적인 접촉이 이루어지는 구조이다. 이를 통해 에너지 효율이 높아지고 단시간에 반응이 이루어지는 장점을 갖는다.

International Biomass Torrefaction Council (IBTC)는 반탄화 기술 개발 및 적용하려는 기관들의 모임으로 이에 참여하는 회사들을 다음 Table 6에 나타냈다. RWE (독일), Vattenfall (스웨덴), DONG (덴마크) 등은 바이오매스 반탄화 연료에 대한 혼소 테스트를, Andritz (오스트리아)와 ECN (네덜란드)는 NUON IGCC (벨기에)에서 co-gasification 테스트를 진행하였다[18]. 2019년에는 CEG/TSE와 SSAB는 반탄화 펠릿을 발전소와 제철

소에 각각 적용하여 긍정적인 결과를 얻었으며, 2018년에 포르투갈의 Futerra는 120,000 ton yr⁻¹ 반탄화 펠릿 공장 건설 계획을 발표하였다(Figure 8)[19]. 일본에서도 반탄화 펠릿 사용을 통한 feed-in-tariff (FIT) 정책 하에서의 경제성 확보를 위한 기업들의 노력이 지속되고 있다. 일례로 Ube industries는 Okinoyama coal center에 60,000 ton yr⁻¹ 반탄화 demo. plant를 건설하여 반탄화 펠릿의 석탄 혼소 적용을 발표하였다. 또한 Idemitsu Kosan은 2022년부터 상용 반탄화 펠릿 생산을 계획하고 있다. 반탄화 펠릿의 국제표준규격(ISO/TS 17225-8)이 2016년에 공식 등재되었다.

TECHNICAL SPECIFICATION ISO/TS 17225-8

First edition 2016-12-15

Solid biofuels — Fuel specifications and classes —

Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels

Biocombustibles solides — Classes et spécifications des combustibles —
Partie 8. Combustibles de biomasses traités thermiquement et densifiés



2019. Nov. CEG & TSE successfully trial renewable black pellets

Clean Electricity Generation Ltd (CEG), a member of IBTC, has with Turun Seudun Energiantuotanto Oy (TSE) announced the successful logistics, handling and combustion trial of over 1,000 ton of CEG Renewable Black Pellets at TSE's coal-fired power unit Na2 in Naantali power plant, Finland.



2019. Aug. SSAB Brahestad successfully concludes blast furnace biocoal tests

SSAB has disclosed the test results of using biocoal in the blast furnace at the SSAB Brahestad steelworks in Finland. Tests show that up to 10% biocoal blend is possible, which would reduce fossil CO₂ emissions by 100,000 ton/a.



Valongo, 11 December 2018 – Portuguese bioenergy start-up Futerra Torrefação e Tecnologia S.A. (Futerra Fuels) has started the construction of their first commercial scale torrefied pellet production plant in Valongo, Portugal. The plant will have an annual production capacity of 120,000 tons of torrefied pellets.

Figure 8. International torrefaction activity.

Table 7. Torrefaction papers published in Korea during last 10 years

#	Journal	Institute	Title
1	Trans. Kor. H2 New Energy Soc. 30 (2019) 49	부산대	반탄화 과정을 통한 바이오매스의 수소성 개선 연구
2	Trans. Kor. H2 New Energy Soc. 29 (2018) 280	부산대	반탄화 과정이 바이오매스 연료의 구조 및 연소성에 미치는 영향
3	Trans. Kor. H2 New Energy Soc. 28 (2017) 683	부산대	발전용 WP·EFB·PKS의 열분해 온도 따른 반탄화 및 염소 방출 특성에 관한 연구
4	Trans. Kor. H2 New Energy Soc. 29 (2018) 81	부산대	바이오매스 전처리 기술에 따른 혼소 특성에 관한 실험적 연구
5	Kor. Chem. Eng. Res. 55 (2017) 395	부산대	무회분 석탄(AFC)을 바이너리로 이용한 코크스의 물리적 및 화학적 특성
6	J. Korean Wood Sci. Tech. 44 (2016) 685	전남대	반탄화 온도와 승온속도에 의한 바이오매스 열분해 거동
7	J. Korean Wood Sci. Tech. 43 (2015) 381	전남대	낙엽송 반탄화 바이오매스를 이용한 고밀도 고품질 연료 생산
8	J. Kor. Wood Sci. Tech. 44 (2016) 360	전남대	용탈처리와 습식 반탄화에 의한 Empty Fruit Bunch의 연료적 특성 향상
9	J. Kor. Wood Sci. Tech. 41 (2013) 497	전남대	반응표면분석법을 이용한 유칼립투스의 반탄화 최적조건 탐색
10	Kor. Chem. Eng. Res. 51 (2013) 739	전남대	낙엽송(Larix kaempferi) 고밀도 에너지화를 위한 반탄화 최적조건 탐색
11	J. Korean Wood Sci. Tech. 43 (2015) 135	충남대	반탄화 목분과 폐활성탄 혼합물의 복합연료활용 위한 연료적 특성 연구
12	J. Kor. Wood Sci. Tech. 48 (2020) 271	충남대	Stability & Sludge Energy Efficiency of Torrefied Wood Material Based Coagulant
13	J. Kor. Wood Sci. Techn. 47 (2019) 709	충남대	Impact of Paste Type Torrefied Wood Flour Coagulants on Water Ecosystem
14	J. Kor. Soc. Agricultural Eng. 56 (2014) 55	한경대	우드칩 반탄화와 부생가스의 특성 분석
15	J. Kor. Soc. Agricultural Eng. 59 (2017) 17	한경대	바이오매스 연료로서 미활용 농업부산물의 반탄화 특성
16	Korean Chem. Eng. Res. 52 (2014) 672	공주대	사탕수수 부산물의 반탄화 특성에 관한 연구
17	Appl. Chem. Eng. 25 (2014) 510	공주대	하수슬러지의 반탄화 특성에 관한 연구
18	J. Kor. Soc. Waste Manage. 31 (2014) 469	IAE	바이오매스 반탄화 기술
19	J. Kor. Soc. Waste Manage. 29 (2012) 793	IAE	EFB 반탄화 시 생성된 Char의 수율 및 특성에 대한 운전변수의 영향
20	Korean Chem. Eng. Res. 53 (2015) 224	충북대	반탄화 낙엽송, 백합나무 펠릿의 현미경 관찰과 내구성에 대한 바이너리의 영향
21	J. Korean Wood Sci. Tech. 44 (2016) 96	국민대	비등온 TGA 이용한 급속 반탄화 참나무 목분의 열적 특성과 활성화 에너지 연구
22	Trans. Kor. H2 New Energy Soc. 28 (2017) 190	KIER	석탄과 반탄화 바이오매스 혼합연료의 가스화
23	Kor. Chem. Eng. Res. 51 (2013) 465	고려대	Oil Palm Frond의 반탄화를 통한 연료화 연구
24	Appl. Chem. Eng. 23 (2012) 440	인하대	반탄화 우드칩의 열분해 특성 및 발열량에 관한 연구
25	J. Kor. Soc. Waste Manage. 30 (2013) 376	청양대	반탄화 바이오매스의 연료비와 연소특성 조사
26	Kor. Chem. Eng. Res. 56 (2018) 725	경상대	바이오매스 촉매 탄화 및 반탄화 바이오매스의 비등온 연소 반응 특성
27	Appl. Chem. Eng. 29 (2018) 350	서울시립대	굴참나무 촉매열분해에 바이오매스 반탄화가 미치는 영향
28	J. Kor. Wood Sci. Tech. 43 (2015) 122	산림과학원	낙엽송재의 화학적 조성 및 연료적 특성에 대한 반탄화 조건의 영향
29	J. Kor. Soc. Environmental Tech. 18 (2017) 364	동신대	발전연료화를 위한 하수슬러지 개질방안 연구
30	Kor. Chem. Eng. Res. 50 (2012) 385	전남대	고에너지밀도 펠릿제조를 위한 목재칩 반탄화 특성

4.2. 국내 동향

국내에는 최근 10여 년간 대학교와 국립산림과학원을 중심으로 30여 편의 논문이 lab-scale 실험을 기반으로 출판되었다 (Table 7). 연구의 목적은 석탄 혼소용 연료로서 바이오매스를 석탄과 유사한 성질(분쇄성, 발열량 등)을 갖도록 하는 것이다. 또한 국내·외에서 미활용되는 바이오매스의 활용 범위를 확대하고자 하는 목적으로 반탄화에 따른 연료로서의 성질 변화를 연구하였다. 최근 신재생에너지공급인증서(Renewable energy credit, REC) 제도 변화에 따라 국내 미활용 자원의 반탄화에 따른 연료 특성 변화를 연구하는 노력이 확대 되리라 예상된다. 국내 발전사들은 RPS 정책에 대응하기 위한 방안으로 목질계 바이오매스를 석탄과 혼소하고 있으며 RPS 비율 증가에

따라 혼소율은 더욱 증가될 것으로 예상된다. 국내에서 현재 진행 중인 바이오매스 반탄화 기술로서 (주)O&M Korea와 남동발전이 50 ton d⁻¹ 반탄화 펠릿 생산하는 플랜트 개발 과제를 수행하고 있다. 한국에너지기술연구원은 지난 2012년부터 COMB 기술 기반 바이오매스 반탄화 연구를 진행하고 있으며, 2019년에 5 ton d⁻¹ 반탄화 설비를 운전하였다. 기존에 진행된 개발로는 경동에너지가 로터리 킬른(rotary kiln)을 이용하여 반탄화하는 기술을 개발하였고, 탐 인프라도 역시 로터리 킬른 반탄화 기술을 개발하였다. 또한 한전산업개발은 스크류 이송식 킬른을 개발하였다. 하지만 에너지 효율이 높다고 알려진 Multiple hearth, 유동층 및 이동층 방식의 기술은 아직까지 진행된 예가 없다.

Table 8. RPS by year

Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023~
Ratio (%)	2	2.5	3	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10

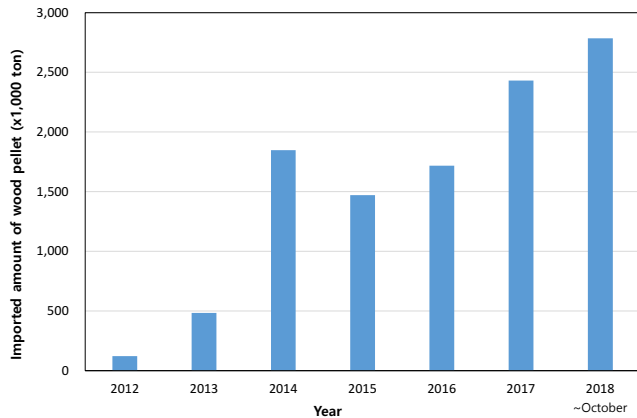


Figure 9. Imported amount of wood pellet by year.

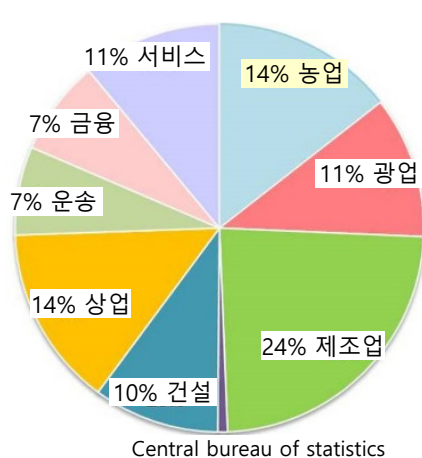
5. 반탄화된 인도네시아 바이오매스의 시장 및 전망 (국내 및 인도네시아)

5.1. 국내 시장 및 전망

반탄화 시장은 아직 열리지 않았으므로, 본 논문에서는 동일 시장을 갖는 우드펠릿 시장을 기반으로 기술하였다. 바이오매스는 석탄과 대비하여 경제성이 떨어지므로 정부의 정책적 지원에 의해 경제성 확보되는 경우에만 성장할 수 있다. 가장 중요하게는 2012년 시작된 RPS이다. RPS에 의해 500 MW 이상의 발전사업자는 일정 비율 이상을 신재생에너지원으로 발전해야 한다. 또 신재생에너지로 발전하는 경우 REC를 발급받을 수 있고 REC는 거래 가능하다. 현재 RPS에 의한 연도 별 의무 공급량은 다음과 같다. 2020년 기준 의무 공급 비율은 7%이며 2023년에는 10%까지 확대될 예정이다. 향후 3020 정책 지속에 따라 더욱 확대될 것으로 예상된다.

국내 우드펠릿 제조 설비 용량은 2017년 기준 ~17만톤로 추산되며, 이는 현재 수요 대비 10% 이하에 불과하다[20]. 대부분의 수요는 수입에 의해 충당된다. 연도 별 수입량 변화는 다음의 Figure 9와 같으며 최근 2.5 million ton yr⁻¹ 이상 수입되고 있다. 우드펠릿은 주로 베트남, 말레이시아, 태국, 인도네시아 등의 동남아시아 국가들에서 100~170 \$ ton⁻¹에 수입되었다. 현재 수입가격은 과열 경쟁에 의해 100~110 \$ ton⁻¹으로 낮은 상태이다. 2018년 발표된 REC 가중치 변화에 따라 기존 신재생 발전 용량 외에는 수입 바이오매스의 REC는 축소 또는 폐지되었다. 이에 따라 당분간 우드펠릿 또는 반탄화 바이오매스의 수입량은 현 상태를 유지할 가능성이 높다. 다만 다른 신재생에너지원과의 경제성 비교, RPS 의무공급량의 증가, 국내 미활용바이오매스에 의한 우드펠릿 공급량 변화, REC 가격 변화 등에 의해 수입량이 결정되리라 예상된다. 바이오매스 연료의 경제성은 RPS와 ETS 정책과 연계되어 검토되어야 한다. 국가 장기 에너지 정책에 포함된 분산발전의 확대 및 prosumer의 발달 등은 소형 바이오매스 발전(연소, 가스화)을 필요로 하며, 이들은 반탄화 펠릿 연료의 새로운 비즈니스 모델이 될 수 있다. 현재 독일, 일본, 미국 등의 많은 나라들에서 바이오매스에 의한 분산 발전 시스템 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

인도네시아의 바이오매스 부산물인 EFB는 국내 법규(수입 폐기물 관리 지침, 환경부 자원순환정책관실, 2018)에 의해 폐기물로 분류되어 국내에 수입될 수 없다. 산림부산물로 제조된(반탄화) 우드펠릿은 수입 가능하나 REC 저하와 가격 경쟁 과열에 의한 낮은 가격 등을 고려 시 경제성 확보 어렵다. 국내에서는 현재 바이오매스가 포함하는 염소에 의한 발전 설비의 부식 문제가 있으며, 이의 해결책으로 염소 함량을 줄일 수 있는 반탄화 기술이 활성화될 수 있으리라 예상된다.



Indonesia power mix (2019)

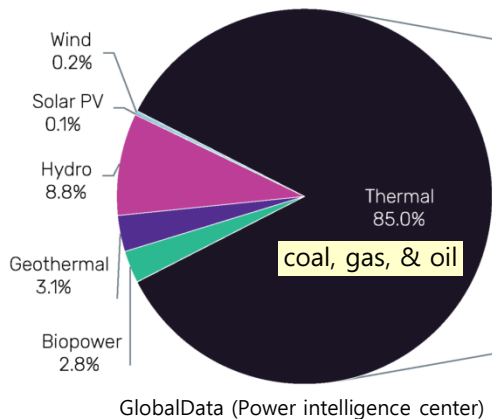


Figure 10. General introduction of Indonesia.

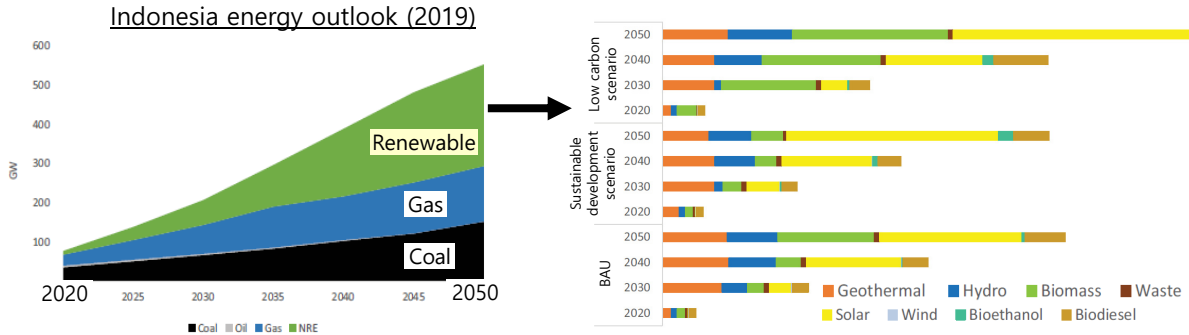


Figure 11. Indonesia energy outlook.

5.2. 인도네시아 시장 및 전망

인도네시아는 ~190만 km²의 면적(한반도의 9배)을 갖는 세계 4위 인구 대국(~2.5억 명)이다. 농업(~14%)이 주요 산업의 하나이며 G20 회원국이다. 지속적 성장에 따른 도시화·산업화에 필요한 에너지를 주로 화석연료(~80%)에 의존하고 있으며, 전력 보급률이 ~84%에 불과해 아직도 ~1,250만 가구(or ~5천만 명)가 전력 부족을 경험하고 있다.

인도네시아의 전력 생산 설비 용량은 ~65 GW (2018년 기준)이며, Vision 25/25 정책을 통해 2025년까지 신재생에너지 비율을 23%로, 2050년까지 31%로 확대하려 노력하고 있다. 온실가스 배출 세계 12위로 41% 온실가스 감축 목표를 제출하였다. 현재 FIT 제도를 시행 중이며 계통한계 가격(system marginal price, SMP)에 차별을 두어 신재생 에너지에 의한 전력 생산을 지원하고 있다(석탄 ~6 c kWh⁻¹, 신재생에너지원 ~12 c kWh⁻¹ at Riau). 현재 200 million ton yr⁻¹ 바이오매스 부산물(팜, 산림, 벼, 코코넛, 사탕수수)이 발생된다고 추산되며,

이를 활용한 바이오매스 기반 온실가스 감축 사업의 활성화가 기대된다.

아래 Table 9에 보이듯이 인도네시아의 미분탄 발전 용량은 ~32 GW이다[21]. 1 GW 당 10,000 ton d⁻¹ 석탄 사용 가정 시 ~120 million ton yr⁻¹의 석탄을 미분탄 발전에서 소비한다.

현재 시행중인 FIT 제도 하에서 가격 경쟁력 확보된 바이오매스 연료 기반 fuel switch (석탄 → 바이오매스)를 적극 추진하고 있다. 향후 혼소용 바이오매스 연료 시장 확대 및 이에 따른 미활용 바이오매스연료 사용의 증가 예상된다[22]. 발전소 연료로는 알카리 금속 함량이 낮은 산림부산물을 원료(feedstock)로 제조된 반탄화 펠릿을 사용함으로써 슬래깅 문제 및 연소 효율 저하 없이 혼소를 증가시킬 수 있다.

수분 및 알카리 함량이 높은 EFB를 원료(feedstock)로 사용하는 경우 미분탄 발전에 적합한 고품위 연료 제조를 위한 비용이 높아질 수 있다[23]. POM에서 얻어지는 EFB의 수분 함량은 ~60%이므로 건조에 많은 에너지가 소모되고, EFB의 낮

Table 9. Pulverized coal (PC) power plant in Indonesia

PP	MW	Operator	PP	MW	Operator
Paiton (PLN) coal-fired, E. Java	2 × 400	PT. PLN	CilacapAdipala coal-fired, C. Java	1 × 660	PT. PLN
Suralaya coal-fired, Banten	4 × 400 3 × 600	PT. PLN	Indramayu coal-fired, Java-Bali	3 × 330	PT. PLN
Paiton, E. Java	2 × 670 2 × 610 1 × 850	PT. Paiton Energy (IPP)	Pacitan coal-fired, Java-Bali	2 × 315	PT. PLN
TanjungJati-B I coal-fired, E. Java	2 × 662	PT. Central Java Power (IPP)	Labuan coal-fired, Java-Bali	2 × 300	PT. PLN
TanjungJati-B II coal-fired, E. Java	2 × 662	PT. Central Java Power (IPP)	Lontar coal-fired, Java-Bali	3 × 315	PT. PLN
Cirebon coal-fired, W. Java	2 × 300	PT. Cirebon Electric Power (IPP)	PelabuhanRatu coal-fired, Java-Bali	3 × 350	PT. PLN
Cilacap, C. Java	2 × 300	PT. SSP (IPP)	Rembang coal-fired, Java-Bali	2 × 315	PT. PLN
Java 4 coal-fired, C. Java	2 × 1000	PT. Bhumi Jati Power (IPP)	TanjungJati-A coal-fired, W. Java	2 × 660	PT. Bakrie Power (IPP)
Java 7 coal-fired, Banten	2 × 1000	PT. SGPJB (IPP)	Arahan coal-fired, S. Sumatra	4 × 600	PT. PLN
Central Java coal-fired, C. Java	2 × 1000	PT. Bhimasena Power Indonesia (IPP)	C. Bangko coal-fired, S. Sumatra	4 × 620	PT. BA &CHD (IPP)
Bojonegara coal-fired, Banten	3 × 740	PT. PLN			

은 밀도에 의해 반탄화 에너지 효율이 낮아지는 것은 피하기 어렵다. 추가로 알카리 금속 제거를 위한 산 세척 등의 공정이 열적 반탄화 공정과 결합되거나, 수열 반탄화 공정이 필요하다. 이러한 경우 분쇄, 고온 세척 및 건조, 산 제거를 위한 세척, 물의 승온에 따른 에너지 소모, 폐수 처리 비용 등이 추가되어야 하므로 FIT 제도 하에서도 경제성 확보가 어려울 것으로 예상된다. 결국 폐기물 재활용에 따른 정책 지원 등의 추가적인 지원이 있어야 EFB의 혼소용 고품위 연료화는 실현될 수 있으리라 판단된다. 또는 부가가치가 높은 바이오화학 등으로의 전환 등을 통해 폐기물로서의 EFB의 재활용 가능하리라 생각된다.

인도네시아의 시멘트 산업은 2018년 기준 100 million ton yr⁻¹ 이상의 시멘트 생산하고 있으며, 주로 석탄(~10 million ton yr⁻¹)에 의해 소성로의 열원이 공급된다[24]. 시멘트는 석회석 등의 미네랄 원료들을 ~2,000 °C 고온 가열하여 생산된다. 이러한 높은 온도에서는 중금속 외에는 연료 품질에 대한 제한이 심하지 않다. EFB와 우드펠릿 등의 바이오매스 연료가 포함하는 알카리 금속의 함량은 최대 5% 이내 이므로 대부분의 바이오매스 연료는 시멘트 소성로에 사용 가능하리라 판단된다. 인도네시아는 2020년 초에 ETS 제도를 연내 시행할 계획임을 발표하였다. 이를 통해 시멘트 산업에서 바이오매스 연료 사용에 따른 석탄 대비 가격 경쟁력 확보할 수 있으리라 판단된다. 우리나라 기업들이 인도네시아 현지 바이오매스 연료화 사업에 참여 시 청정개발 체제(clean development mechanism, CDM) 통한 온실가스 해외 감축분 기여를 통해 추가적인 경제성 개선 가능할 수 있다. Bubbling 유동층과 traveling stoker boiler 등의 연료 민감성이 낮은 일부 발전 방식에는 높은 알카리 함량을 갖는 EFB 및 초본계 연료들도 도입 가능할 수 있으나, 이는 현장 검증이 필요하다.

6. 결론

본 논문에서는 고품위 연료화를 위한 인도네시아 바이오매스의 잠재력, 반탄화에 의한 일반적인 연료 특성 변화, 반탄화 기술 동향 및 반탄화 고품위연료의 잠재적 시장에 대해 논의하였다. 인도네시아 산림 부산물과 팜 부산물(EFB)은 수거 및 이송 비용이 상대적으로 낮아 원료 가격 경쟁력이 있으며, 발생량이 각각 30 million ton yr⁻¹ 이상으로 풍부하므로 연료화를 위한 좋은 feedstock이다. 일반적으로 바이오매스들은 연소, 가스화 등의 연료로서 석탄 대비 품질이 떨어지므로 반탄화 등의 고품위화를 통해 고품질 연료로의 전환이 필요하다. 반탄화된 바이오매스는 혼소율을 높여 CO₂ 배출을 줄일 수 있고, 연소 효율을 개선하며, 보관·이송에 경제적 이점을 부여할 수 있다. 유럽을 중심으로 실증 및 상용급의 rotary drum, screw, 이동층/유동층, multi-hearth, 및 belt conveyor 타입 등의 반탄화 기술이 개발되었다. 반면 국내에서는 대학교를 중심으로 여러 편의 실험 결과가 출판되었으나 상용화 및 실증을 위한 개발은 아직 미미한 수준이다. 대부분의 나라에서 바이오매스는 석탄 대비 높은 가격에 기인 신재생에너지 확대를 위한 정책적 지원(RPS,

ETS, CDM)에 의해서만 경제성 확보할 수 있다. 인도네시아를 포함하는 동남아시아 바이오매스 수입량은 REC 가중치 감소에 의해 향후 현 상태를 유지할 가능성이 높고, EFB는 폐기물로 분류되어 국내에 수입될 수 없다. 국내 반탄화 바이오매스 시장은 아직 열리지 않았지만 향후 RPS 의무공급량의 증가를 포함하는 신재생에너지 확대 정책의 강화, 대량 생산에 따른 경제성 개선, 분산발전 및 prosumer의 발달에 따른 소형 바이오매스 발전(연소, 가스화)의 증가 등은 반탄화 연료의 새로운 비즈니스 모델을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 인도네시아의 시멘트 소성로 열원으로 EFB를 포함하는 대부분의 바이오매스 연료를 사용할 수 있다. 이때 ETS 제도를 통해 바이오매스 연료의 가격 경쟁력 확보할 수 있으리라 판단된다. 슬래깅과 부식 문제가 없는 반탄화 우드펠릿은 인도네시아 미분탄 발전소에 적용 시 FIT 제도에 의해 경제성 확보할 수 있을 것이다. 우리나라가 인도네시아 현지 바이오매스 연료화 사업에 참여 시 CDM을 통한 경제성 개선 및 해외 CO₂ 감축 가능하리라 판단된다.

감사

본 논문은 미래창조과학부가 지원하는 “폐자원 반탄화에 의한 고품위 연료 제조와 가스화 연계 분산발전 시스템 구축”의 과제(CO-6502)의 연구비로 수행된 연구결과입니다.

References

1. Nhuchhen, D. R., Basu, P., and Acharya, B., “A comprehensive review on biomass torrefaction,” *Int. J. Renewable Energy Biofuels*, **2014**, Article ID 506376 (2014).
2. Thoe, J. M. L., Surugau, N., and Chong, H. L. H., “Application of Oil Palm Empty Fruit Bunch as Adsorbent: A review,” *Trans. Sci. Technol.*, **6**(1), 9-26 (2019).
3. Sukiran, M. A., Abnisa, F., Syafie, S., Daud, W. M. A. W., Nasrin, A. B., Aziz, A. A., and Loh, S. K., “Experimental and Modelling Study of the Torrefaction of Empty Fruit Bunches as a Potential Fuel for Palm Oil Mill Boilers,” *Biomass Bioenerg.*, **136**, 105530 (2020).
4. Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., and Boardman, R. D., “A review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy applications,” *Industrial Biotechnology*, **7**(5), 384-401 (2011).
5. Shibata, M., Varman, M., Tono, Y., Miyafuji, H., and Saka, S., “Characterization in Chemical Composition of the Oil Palm,” *J. Japan Institute of Energy*, **87**(5), 383-388 (2008).
6. Menon, V., and Rao, M., “Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, **38**(4), 522-550 (2012).
7. https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_06_05_02&cmsId=FC_000823 (accessed Sep. 2020).

8. Parthama, P., "Corrective Actions untuk Darurat DAS," Indonesian ministry of environment & forestry (2018).
9. Yan, M., Hantoko, D., Susanto, H., Ardy, A., Waluyo, J., Weng, Z., and Lin, J., "Hydrothermal Treatment of Empty Fruit Bunch and its Pyrolysis Characteristics," *Biomass Conv. Bioref.*, **9**, 709-717 (2019).
10. Wang, M. J., Huang, Y. F., Chiueh, P. T., Kuan, W. H., and Lo, S. L., "Microwave Induced Torrefaction of Rice Husk and Sugarcane Residues," *Energy*, **37**(1), 177-184 (2012).
11. Gent, S., Twedt, M., Gerometta, C., and AlMBERG, E., "Theoretical and applied Aspects of Biomass Torrefaction," Butterworth-Heinemann, London, 41-72 (2017).
12. Chen, W. H., and Kuo, P. C., "Torrefaction and co-torrefaction characterization of Hemicellulose, Cellulose and Lignin as well as Torrefaction of Some Basic Constituents in Biomass," *Energy*, **36**(2), 803-811 (2011).
13. Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L., and Raiko, R., "The Effect of Torrefaction on the Chlorine Content and Heating Value of Eight Woody Biomass Samples," *Biomass Bioenerg.*, **66**, 232-239 (2014).
14. Saleh, S. B., Flensburg, J. P., Shoulaifar, T. K., Sárossy, Z., Hansen, B. B., Egsgaard, H., DeMartini, N., Jensen, P. A., Glarborg, P., and Dam-Johansen, K., "Release of Chlorine and Sulfur during Biomass Torrefaction and Pyrolysis," *Energy Fuels*, **28**(6), 3738-3746 (2014).
15. Sarkar, M., Kumar, A., Tumuluru, J. S., Patil, K. N., and Bellmer, D. D., "Gasification Performance of Switchgrass Pretreated with Torrefaction and Densification," *Appl. Energy*, **127**, 194-201 (2014).
16. Bajpai, P., "Biomass to Energy Conversion Technologies," Elsevier, Amsterdam, 55-67 (2020).
17. Radics, R. I., Gonzalez, R., Bilek, E. T. M., and Kelley, S. S., "Systematic Review of Torrefied Wood Economics," *Bioresources*, **12**(3), 6868-6884 (2017).
18. Koppejan, J., Cremers, M., Wild, M., and Junginger, M., "Biomass Torrefaction," IEA Bioenergy Task 40 and ECN information (2016).
19. <https://ibtc.bioenergyeurope.org/1915-2/> (accessed Sep. 2020).
20. Lee, S. M., Trends and Prospects of Wood Pellets, National Institute of Forest Science (2019).
21. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_power_stations_in_Indonesia (accessed Sep. 2020).
22. Rai, R. (PT. PJB), "Renewable Energy in Indonesian," Presentation at Int. Conf.: Challenges in Sustainable Development from Energy & Environment (2017).
23. Kasim, N. N., Mohamed, A. R., Ishak, M. A. M., Ahmad, R., Nawawi, W. I., Ali, S. N., and Ismail, K., "The Effect of Demineralization and Torrefaction Consequential Pre-treatment on Energy Characteristic of Palm Empty Fruit Bunches," *J. Thermal Analysis Calorimetry*, **138**, 343-350 (2019).
24. PT. Indocement Tunggal Prakarsa TBK ADR 2018 Q1.