오일팜 바이오매스의 자원화 연구 II

- 오일팜 바이오매스의 펠릿 제조 특성 -

성용주¹ · 김철환[†] · 조후승 · 김성호 · 심성웅 · 임수진 · 이지영 · 김세빈²

접수일(2013년 1월 30일), 수정일(2013년 2월 7일), 채택일(2013년 2월 8일)

Study of Oil Palm Biomass Resources (Part 2)

- Manufacturing Characteristics of Pellets Using Oil Palm Biomass-

Yong Joo Sung¹, Chul-Hwan Kim[†], Hu-Seung Cho, Sung-Ho Kim, Sung-Woong Sim, Su-Jin Yim, Ji-Young Lee and Se-Bin Kim²

Received January 30, 2013; Received in revised form February 7, 2013; Accepted February 8, 2013

ABSTRACT

In this study, oil palm biomass such as empty fruit bunch (EFB) and palm kernel shell (PKS) was used as raw materials for making pellets. Hardwood sawdusts were also mixed with EFB and PKS for making pellets. For improving a bad forming behavior in a pelletizer, 1 to 3 per cent of corn starch based on oven-dried weight biomass was added. The starch contributed to the decrease of dust generation in addition to the improvement of forming capability during pellet forming. Heating values of every pellets made of EFB and PKS were higher than 4,300 kcal/kg for the first grade pellet, irrespective of addition of sawdusts. However, the pellets made of EFB and PKS had ash contents over 3 per cent, which made it impossible to be applied for home use. Instead, they could be applied for industrial use. For studying their combustion characteristics, the pellets from the mixtures of EFB, PKS and sawdusts were analyzed using thermal gravimetric analyzer (TGA). From the TGA results, thermal decomposition of EFB and PKS occurred following three including endothermic reaction and dehydration, devolatilization of the major chemical components, and finally combustion of residual lignin and char.

Keywords: *Oil Palm biomass, EFB, PKS, combustion, pellet, sawdusts*

· 경상대학교 임산공학과/IALS (Dept. of Forest Products, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea)

1. 충남대학교 바이오소재공학과 (Dept. of Biobased Materials, Chungnam National University, Daejeon, Korea)

2. 충남대학교 산림환경자원학과 (Dept. of Environment & Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon, Korea)

† 교신저자 (corresponding author) E-mail: jameskim@gnu.ac.kr

1. 서론

현재 새로운 바이오매스 자원으로서 오일팜 바이오매스에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 오일팜의 경우 말레이시아와 인도네시아를 중심으로 식재량이 빠르게 증가하고 있는데 전 세계 오일팜 수확 면적의 60%를 차지하고 있다. 특히 팜유 부산물인 EFB와 PKS는 보통 1 ha당 각각 약 1,546 kg과 약 938 kg이 발생한다. 말레이시아만 예를 든다면 2009년 전진중량 기준 EFB는 약 7.25 백만 톤, 그리고 PKS는 4.46 백만 톤이 발생하였다.^{1,2)}

PKS는 화석연료를 대체할 수 있는 연료로서의 가치가 증대되면서 가격이 \$66-70/톤까지 올랐지만, EFB의 경우 높은 함수율(약 65% 이상)로 인한 변패 가능성과 별도의 가공처리 과정이 필요하여 제대로 이용되지 못하고 있는 실정이다.³⁾ 따라서 EFB의 적절한 활용도를 찾는다면 매우 경제적인 리그노셀룰로오스계 자원이 될 수 있을 것이다.

현재 국내에서는 목재 펠릿에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이는 석유의 고갈과 함께 가격 급등이 수반되고, 또한 온실가스 배출로 인한 규제가 심화되면서 신재생에너지에 대한 정부 중심의 정책 패러다임의 변화도 한 몫을 하고 있다. 하지만 목재 펠릿을 제조하기 위한 목재 자원은 턱 없이 부족한 실정이라 목재 펠릿의 수입 의존도가 가파르게 증가하고 있다. 현재 국내에서는 연료용과 축사 깔개용 등의 용도로 40여 곳의 업체에서 목재 펠릿을 수입하고 있는데 2011년 기준 말레이시아에서 약 2,100톤, 베트남에서 약 1,800톤, 그리고 러시아에서 3,200톤, 뉴질랜드에서 540톤 등 여러 국가에서 목재펠릿을 수입하고 있지만 국제적으로 목재펠릿의 수요가 급증하면서 공급 부족으로 인한 가격 인상과 펠릿 품귀 현상까지 빚어질 가능성도 항상 내재되어 있다. 2010년 기준 세계 펠릿 생산량은 약 1,400만 톤 정도였지만, 이는 2006년도의 6-8백만 톤 생산에 비하여 2010년도에는 약 두 배 정도 증가한 양이다.⁴⁾ 국내에서도 발전량의 일정 비율을 신재생에너지로 의무화하는 신재생에너지 의무 할당제 (Renewable Portfolio Standard)를 2012년부터 도입하기로 결정되면서⁵⁾ 화력발전소를 중심으로 석탄과 목재 펠릿의 혼소를 2012년부터 추진하고 있다. 따라서 화력발전소에서 석탄과

목재펠릿을 혼소하기 시작하면 목재펠릿의 공급 부족 문제가 대두될 것이기 때문에 이에 대한 체계적인 대책이 요구된다. 현재 국내 기업들이 인도네시아, 미얀마, 중국, 베트남, 러시아 등지에 목재펠릿 해외 투자를 진행하고 있지만 수요를 충족할 수 있을지에 대해서는 여전히 의문이다.

국내의 펄프 자급률은 20% 미만이다. 현재 화학펄프 생산을 위해 업체에서는 활엽수 칩을, 열기계펄프를 생산하는 업체에서는 침엽수 칩을 사용하고 있다. 특히 국내에서 사용하는 화학펄프의 양은 약 200만 톤이고, 이 중 약 40만 톤을 무림P&P(주)에서 생산하고 있다. 무림P&P(주)는 화학펄프 생산을 위해 인도네시아, 베트남, 태국 등지에서 연간 50만 톤 정도의 목재 칩을 수입하고 있고, 나머지 약 21만 톤 정도는 국내에서 수집한 활엽수 잡목 칩을 사용하고 있다. 전주페이퍼(주)에서는 약 7만 5천 톤/년의 침엽수 칩을 사용한다. 산림청의 2011년 목재수급실적에 따르면 펄프 제조용 칩용 원목 수입은 11,541 m³에 이르지만 국내재는 1,022 m³에 불과한 실정이다.

국내의 목재 자급률이 16%인 상황에서 목재펠릿의 수요가 급증하고 목재펠릿용 원목 공급이 부족한 상황이 초래될 수 있다. 이러한 상황에서 목재펠릿 제조용 원료 공급을 위하여 원목, 칩 혹은 톱밥의 수입이 급증하게 되면 펄프 원료용 원목 혹은 칩의 가격도 급등하여 펄프 및 종이 가격의 동반 상승을 초래할 가능성이 높아질 것이다.

따라서 이러한 상황을 타개하기 위해서는 목재펠릿을 제조할 때 목재 사용량을 줄이고, 목재를 일부 혹은 전부 대체할 수 있는 대체 바이오매스의 사용이 매우 필요한 시점이다. 말레이시아와 인도네시아 등지를 중심으로 팜유 부산물인 EFB와 PKS의 발생이 급증하고 있고, 이를 활용한 펠릿 제조를 위한 연구가 매우 시급하다. 본 연구에서는 EFB와 PKS를 펠릿 제조용 원료로 사용하였을 때 연료로서의 가치를 분석하였고, 이를 통해 EFB와 PKS를 펠릿 제조용 원료로 사용하기 위한 기초 자료로 이용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

Fig. 1. EFB and PKS used for making pellets.

인도네시아 팜유 추출 및 정제 공정에서 부산물로 발생하는 EFB와 PKS를 사용하였다(Fig. 1 참조). EFB는 함수율 약 10% 수준으로 자연 건조시킨 후 사용하였다.

2.2 펠릿 제조

EFB와 PKS를 펠릿을 제조하기 위한 성형 장치는 Fig. 2와 같다. 경상대학교 펄프종이신소재연구실에서 주문제작한 펠릿 성형 장치는 6 mm 지름의 펠릿을 80-120 kg/hr의 속도로 제조가 가능하다.

펠릿 제조를 위해 적용한 EFB, PKS 그리고 목재 톱밥(국내산 활엽수 혼합수종)의 배합비는 Table 1과 같다. EFB와 PKS의 회분 함량 감소와 성형성 개선을 위해 목재 톱밥과 혼합하여 제조하였고, 만약 EFB와 PKS

의 첨가로 인해 긍정적 효과가 얻어진다면 목재펠릿 제조에 사용되는 목재 톱밥의 양을 절감시킬 수 있을 것으로 기대하였다. EFB와 PKS를 이용하여 펠릿을 제조할 때 성형성 개선을 위해 부가적으로 옥수수 전분을 1-3% 첨가하였다.

2.3 펠릿 품질 특성 분석

2.3.1 연소 특성

펠릿의 연소 특성을 알아보기 위하여 열중량분석(Thermal Gravimetric Analysis, TGA)을 하였다. 열중량분석기 (SDT Q600, TA, USA)는 반응기 내부 직경이 20 mm이다. 저울의 정확도는 1 μ g이며 모든 조건에서 사용된 가스는 질소를 사용하였고, 그 유량은 100 mL/min으로 연소반응 시 확산저항 영역을 벗어날 수 있도록 충분히 공급하였다. 열중량 분석 시 승온 속도가 미치는 영향을 파악하기 위해 승온 속도 5 $^{\circ}$ C/min 하에서 실험을 수행하였으며, 각 실험을 통해 온도에 따른 시료 무게 감량값 및 DSC (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 값을 구하였다.

2.3.2 연소 특성

원료의 함수율은 자동 함수율 측정기를 사용하여 103 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C의 온도에서 항량까지 도달하였을 때 나타난

Fig. 2. Pelletizer used for making pellets.

Table 1. Mixing conditions of EFB, PKS and wood sawdust

Mixing ratios (%)									
EFB	100		70				70	50	30
PKS		100	30	70	50	30			
Wood sawdust				30	50	70	30	50	70

함수율을 EFB와 PKS의 함수율로 나타냈다.

2.3.3 발열량 분석

펠릿의 발열량 측정은 자동 열량계 (Parr 6400, Germany)로 시료를 연소시키는 동안의 온도 상승을 측정하고, 시료 1 g에 대한 cal나 J (at 20℃) 값을 구하여 발열량을 측정하였다. 시료는 1 mm 금속망 체를 통과하는 크기로 조정한 후 발열량을 측정하였다.

2.3.4 중금속 분석

펠릿을 연소시킨 후 발생하는 회분에 포함된 중금속 함량을 정량하기 위하여 ICPspectrometer (Atomscan25, TJA)를 이용하여 분석하였다. 발생된 회분은 Wonder Blender (WB-08, Sanplatec corp., Japan)를 이용하여 20초간 분쇄하고, 각 시료 약 0.2 g을 습식분해액 (HNO₃:H₂SO₄:HClO₄ = 10:1:4) 25 mL로 분해시킨 후 No.2 여과지를 이용하여 잔사를 분리하고 여액은 최종적으로 100 mL가 되게 희석하여 ICP spectrometer를 이용하여 함유된 원소의 함량을 정량하였다.

2.3.5 회분 분석

펠릿의 회분은 국립산림과학원의 “목재 펠릿 품질 규격”에 의거하여 분석하였다. 분석용 도가니에 0.1 mg까지 무게를 측정된 원료를 분석용도가니에 넣고 회화로에서 575±25℃에서 2시간 동안 연소시킨 후 감량을 기록한 후 아래의 식 (1)에 근거하여 회분 함량을 계산하였다.

$$A_{dm} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (1)$$

A^{dm} : 전건펠릿의 회분(건량기준)

m^1 : 도가니의 무게

m^2 : 도가니 + 시료의 무게

m^3 : 도가니 + 회분의 무게

M^{ad} : 펠릿의 함수율(기건 기준).

2.3.6 펠릿의 밀도

시료 중 25개의 목재펠릿을 무작위로 채취한 후 버니어캘리퍼스를 이용하여 직경과 길이를 0.1 mm 단위까지 측정 후 반올림하여 mm 단위로 기록하였다. 길이를 측정한 목재펠릿을 전자저울을 이용, 무게를 0.01 g

수준에서 측정하였다. 적어도 2회 이상 측정을 실시하여, 소수점 둘째자리까지의 밀도 값을 구하여 g/cm³ 로 표기하였다.

2.3.7 펠릿의 미세분 분석

포장된 제품으로부터 적어도 50 g의 펠릿을 채취하여 0.01 g 수준까지 무게를 측정하였다. 펠릿을 유효면적이 250 cm² 이상인 직경 3.15 mm의 체 (ISO 3310-2에 규정)에 넣고, 진탕기에 장착하여 거른 후, 체에 잔류하고 있는 목재펠릿의 무게를 측정하며 진탕시간은 체를 통과하는 미세분의 양이 분당 0.3%를 넘지 않을 때까지 지속하였다. 적어도 2회 이상 측정을 실시하여 전체 목재펠릿 무게에 대한 체를 통과한 미세분의 무게를 %로 표기하였다.

2.3.8 펠릿의 유황 (S), 염소 (Cl), 그리고 질소 함량 분석

펠릿의 염소, 질소, 유황의 함량 분석에는 원소 분석기 (EA1110, CE Instruments)를 사용하였다. 펠릿을 1 mm 금속망 체를 통과하는 크기로 잘게 부순 후, 100 mg을 취하여 원소 분석기로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 혼합 비율별 펠릿 성형 특성

EFB, PKS, 그리고 활엽수 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 사진을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다.

PKS의 경우 평균 함수율이 5% 미만이었기 때문에 그 자체로 펠릿제조장치에 투입하면 성형이 제대로 되지 않을 뿐만 아니라 매우 많은 양의 미세 먼지가 발생하였다. 따라서 펠릿을 성형하기 전에 PKS를 물에 약 4시간 정도 침지시킨 후 함수율을 약 10% 수준으로 조절한 후 펠릿 제조에 이용하면 펠릿 성형이 잘 이루어졌다. 하지만 Fig. 3에서 보는 것처럼 보조 바인더의 첨가 없이 PKS만으로 펠릿을 제조하면 수율이 많이 떨어지고 제조된 펠릿의 강도와 밀도도 약하게 형성되었다. 하지만 옥수수 전분을 1-3% 첨가하면 펠릿 성형능력이 향상되면서 펠릿의 강도와 밀도가 크게 향상된다. 또한 펠릿의 표면 광택도 전분 첨가량이 증가하면서 함께 증가하였다.

* based on OD biomass weight

Fig. 3. Pellets made of EFB and PKS.

EFB의 경우 PKS와는 다르게 기건 상태의 함수율이 약 10% 정도 나오기 때문에 기건 상태의 EFB를 그대로 펠릿 제조에 사용하였다. 하지만 EFB의 경우 원형 상태로 사용하기가 불가능하기 때문에 펠릿제조 장치에 투입하기 전에 EFB를 약 2-4 cm 정도의 길이로 잘라서 사용하였다. PKS와는 달리 Fig. 3에서 보는 바와 같이 펠릿 성형도 잘 되지 않아 옥수수 전분을 EFB 전건 중량에 대해 약 1-3% 첨가하여 제조하였을 때 PKS 펠릿 제조 시와 마찬가지로 펠릿 성형에 매우 도움이 되었다.

PKS와 EFB를 혼합하여 펠릿을 제조 할 때에는 PKS와 달리 섬유 형태의 EFB가 갖는 형태상의 차이로 인하여 균일한 혼합에 어려움이 있었다. EFB와 PKS혼합 펠릿 제조 시에는 PKS의 함수율을 약 10% 수준으로 조절한 후 2-4 cm 정도 길이로 자른 EFB와 무게비로 PKS:EFB = 7:3으로 혼합한 후 펠릿을 제조하였다. PKS와의 혼합에도 불구하고 섬유질 형태로 구성되어 있는 EFB가 포함될 경우 성형이 잘 되지 않았기 때문에 Fig. 4에서 보는 바와 같이 옥수수 전분을 원료의 전건 중량 대비 1% 투입하면 펠릿 성형에 큰 도움이 되었다.

PKS와 톱밥을 혼합하여 제조한 혼합 펠릿의 경우 PKS와 톱밥 모두 기건상태의 함수율이 매우 낮기 때문에 함수율 조절이 가장 중요하다. 하지만 두 원료를 혼합한 후 함수율을 높여기가 쉽지 않기 때문에 펠릿 제조 전에 원료별로 각각의 함수율을 약 10% 수준으로 조절한 후 적정 비율로 혼합하여 사용하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 톱밥의 혼합 비율이 더 높을수록 펠릿 성형이 잘 되지 않았고, 오히려 PKS의 혼합 비율이 더 클수록 우수한 성형 특성을 나타냈다. 이는 PKS와 톱밥을 혼합할 때 PKS는 단단한 껍질 형상을 그대로 유지한 상태에서 톱밥을 일정 비율로 혼합시켜 펠릿 성형기에 투입하기 때문에 균일한 혼합이 되지 않은 것에서 그 원인을 찾을 수 있다. 하지만 앞서 확인한 바와 같이 적정량의 전분 투입으로 성형성의 개선이 가능한 것을 알 수 있다.

EFB와 톱밥을 혼합하여 제조한 혼합 펠릿의 경우 PKS와 혼합할 때와 같이 원료별 함수율을 각각 약 10% 수준으로 조절한 후 펠릿 제조에 이용하였다. 성형 특성 면에 있어서도 Fig. 4에서 보는 바와 같이 PKS와 마

PKS:Saw dust = 30:70	PKS:Saw dust = 50:50	PKS:Saw dust = 70:30	PKS:EFB = 30:70 (Starch 1%*)

EFB:Saw dust = 30:70	EFB:Saw dust = 50:50	EFB:Saw dust = 70:30	Hardwood (oak) pellet

* based on OD biomass weight

Fig. 4. Pellets made of mixed biomass including EFB, PKS and sawdusts.

찬가지로 EFB의 혼합 비율이 증가할수록 펠릿의 성형성이 우수하였다. 하지만 보조 바인더 첨가 없이 PKS, EFB, 그리고 톱밥을 혼합하여 사용할 경우 일반 활엽수 펠릿에서 보는 바와 같이 강한 압력에 의해 밀려나 오면서 생성되는 펠릿 표면의 표면 광택이 많이 관찰되지 않았다.

결론적으로 목재로부터 제조된 톱밥 사용량을 줄이고 대체 원료로 EFB와 PKS를 일부 혼합하여 사용하기 위해서는 오일팜 바이오매스와 톱밥과의 적정 함수율 조절과 균일한 혼합이 중요한 고려 요소들이라 할 수 있다.

3.2 EFB와 PKS로 제조한 펠릿의 품질 특성

EFB와 PKS로 각각 제조된 펠릿의 품질 특성은 전분을 1-3% 첨가한 펠릿에 대해서만 측정하였다. 물론 전분이 포함되지 않은 EFB와 PKS의 경우 펠릿이 제조되긴 하지만 성형성이 좋지 않아 실제 펠릿 제조에는 적용

하기 어렵기 때문에 보조 바인더인 옥수수 전분을 첨가하여 제조한 펠릿들에 대해서만 품질 특성을 분석하여 Table 2에 나타냈다.

펠릿제조 장치를 통하여 제조된 펠릿의 밀도는 전분 첨가와 관계없이 모두 1등급 펠릿의 기준인 640 kg/m^3 을 초과하는 밀도를 나타냈다. 이는 목재 칩의 밀도인 200 kg/m^3 보다도 훨씬 높은 수준으로 동일한 에너지를 발현하는데 필요한 저장 공간을 저밀도 연료에 비하여 보다 더 많이 줄일 수 있음을 의미하는 것이다. 전분 첨가량에 따른 밀도의 차이는 크게 나타나지 않았다.

PKS와 EFB로 제조된 펠릿의 함수율은 1등급 펠릿의 함수율 기준인 10% 이하에 모두 해당되었다. 펠릿의 함수율은 발열량과 직접적인 관계가 있기 때문에 펠릿이 적정 함수율을 갖도록 보관하는 것이 무엇보다 중요하다. 만약 펠릿의 함수율이 10%를 넘어 너무 높으면 발열량이 빠르게 감소하기 때문에 주의할 필요가 있다 (Fig. 5 참조). 반대로 펠릿의 함수율이 너무 낮으면

발열량은 증가하겠지만 펠릿 공급업자의 입장에서는 손해를 볼 수 있다. 즉, 무게 단위로 펠릿을 판매할 때 펠릿의 함수율이 지나치게 낮게 되면 더 많은 양의 펠릿을 포장하여 보내야 한다. 따라서 펠릿 제조 후 8-10% 수준으로 펠릿의 함수율을 적절하게 조정할 필요가 있다. 참고로 국내에서 최상급 펠릿에 대한 기준이 아직 정해지지 않았지만 외국에서 최상급 펠릿 (premium pellet)의 함수율은 8% 이하로 규정하고 있다.

회분은 펠릿의 등급을 나누는데 있어 중요한 지표로 사용되고 있다. 우리나라와는 달리 유럽이나 미국의 경우 펠릿의 등급을 크게 3등급으로 나누는데 각 등급별 분류 기준으로 삼고 있는 것이 회분이다. 즉, 회분이 1% 미만이면 최상급, 1-2% 수준이면 표준등급, 그리고 3% 이상이면 산업용 등급으로 분류한다. 이와는 달리 우리나라에서는 1-4등급까지 분류하고 있고, 보통 3-4등급 펠릿을 산업용으로 취급한다. PKS와 EFB로 제조된 펠릿의 회분 함량은 모두 4등급 펠릿에 해당하는 3-6% 수준의 회분 함량이 검출되었다. 특히 EFB로 제조되거나 EFB가 많이 포함될수록 회분 함량은 증가하였다.

PKS와 EFB로 제조된 펠릿의 발열량은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 1등급 펠릿의 발열량 기준인 4,300 kcal/kg을 초과하는 우수한 발열량이 측정되었다. 이는

PKS와 EFB가 펠릿용으로 사용되는 목재 자원을 일부 대체할 수 있는 유용한 바이오매스가 될 수 있음을 의미한다. 특히 PKS 펠릿의 경우 발열량이 5,000 kcal/kg 이상이 나오기 때문에 회분 기준에 대한 규제가 완화되어 있는 산업용에 사용하면 화석연료 대체 효과가 매우 우수할 것으로 판단된다. 동시에 회분 제거가 용이하게 설계되어 있는 가정용 펠릿 보일러에 EFB와 PKS로 제조된 펠릿을 사용한다면 경제적으로 상당한 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

PKS와 EFB로 제조된 펠릿의 미세분 함량은 모두 약 0.32% 미만이 검출되어 1등급 펠릿의 기준인 1% 미만에 해당되었다. 이는 저장이나 운송 중에 펠릿 입자들 사이에 형성된 강한 결합력으로 펠릿이 쉽게 파손되지 않음을 의미한다.

PKS와 EFB로 제조된 펠릿에서는 펠릿 보일러의 수명에 치명적 영향을 줄 수 있는 유황분, 질소분, 그리고 염소분은 거의 검출되지 않았다. 이는 PKS와 EFB가 목재 원료와 마찬가지로 청정 연료임을 입증하는 것이다.

3.3 혼합 펠릿의 품질 특성

PKS, EFB, 그리고 활엽수 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 품질을 분석한 결과를 Table 3에 나타냈다. 펠

Table 2. Quality comparison of pellets made of PKS and EFB

Quality	PKS	PKS	EFB	EFB	PKS:EFB 30:70
Density (kg/m ³)	1163.09	1211.17	1195.12	1190.33	1146.37
Moisture content (%)	8.60	7.46	7.14	7.53	7.12
Ash (%)	3.71	4.10	5.21	5.78	4.43
Heating value (kcal/kg)	4940.58	5158.93	4712.63	4648.58	4630.63
Fines (%)	0.16	0.22	0.32	0.20	0.20
S (%)	0	0.01	0	0	0
N (%)	0	0	0	0	0
Cl (%)	0	0	0	0	0
Starch (%)*	1	3	1	3	1

* based on OD biomass weight.

Fig. 5. Relationship between heating value and moisture contents of EFB.

릿의 밀도는 640 kg/m^3 이상이 나와야만 1급 펠릿에 해당되는데 PKS와 EFB 모두 톱밥의 혼합 비율에 관계없이 그 이상의 밀도를 나타냈다. 함수율의 경우 10% 이하가 유지되어야 1급 펠릿에 해당되는데 톱밥의 혼합 비율에 관계없이 10% 미만의 매우 낮은 함수율을 나타냈다. 함수율이 높을 경우 발열량에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 펠릿의 저장 안정성에도 나쁜 영향을 미칠 수 있다. EFB와 톱밥이 혼합된 펠릿의 경우 함수율이 7-12%의 범위에 해당되어 PKS와 톱밥이 혼합된 펠릿에 비해서 함수율 변이가 심하였다. 이는 섬유질의 EFB가 혼합된 펠릿의 경우 저장 혹은 보관, 이송 동안 함수율 조절이 어려울 수 있음을 의미한다.

하지만 회분의 경우에는 0.7% 이하가 되어야만 1급 펠릿에 해당되지만 톱밥과의 혼합 비율에 관계없이 매우 높은 회분 함량을 나타냈다. 하지만 톱밥의 혼합 비율이 높아질수록 회분 함량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 회분 함량이 높게 되면 발열량 감소되고, 펠릿 보일러에서 재(회분)로 인한 연소 불량을 야기할 수 있다. 따라서 가정용으로 사용되는 특급 혹은 1급 펠릿의

Fig. 7. Ash contents of pellets made of mixtures of PKS, EFB and sawdusts.

경우 회분 함량 관련 데이터는 매우 중요하게 고려된다. 하지만 Fig. 7에서 보는 바와 같이 EFB와 PKS의 경우 자체 회분 함량이 각각 5.8%와 4.1%로 매우 높게 나오기 때문에 산업용으로 사용되는 4급 펠릿에 적당한 연료였다. 그래서 이와 같은 오일팜 바이오매스의 회분 함량을 낮추기 위해 활엽수 톱밥과 혼합하여 펠릿을 제조하였지만 가정용으로 사용되는 1-2급 펠릿 수준까지 낮추기 어려웠다.

혼합 펠릿의 발열량은 1급 펠릿의 발열량 기준인 $4,300 \text{ kcal/kg}$ 을 넘어서는 수준이었고, 톱밥의 혼합 비율이 발열량에 부정적 영향을 나타내지는 않았다. 특히 EFB의 경우 PKS에 비해 톱밥 혼합으로 인한 발열량 변이가 크게 나타났을 뿐 아니라 발열량도 PKS와 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿에 비하여 $100\text{-}200 \text{ kcal/kg}$ 정도 낮게 측정되었다. 그럼에도 불구하고 1급 펠릿 수준의 발열량을 가지고 있기 때문에 산업용 용도의 목적에 사용한다면 큰 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

Table 3. Quality comparison of pellets made of mixtures of PKS, EFB and wood sawdust

Quality	PKS:sawdust 70:30	PKS:sawdust 50:50	PKS:sawdust 30:70	EFB:sawdust 70:30	EFB:sawdust 50:50	EFB:sawdust 30:70
Density (kg/m^3)	1084.89	1132.61	1093.26	1172.05	1118.63	1067.53
Moisture content (%)	9.49	9.59	6.85	7.64	7.08	8.72
Ash (%)	3.66	3.41	2.07	4.78	4.15	3.47
Heating value (kcal/kg)	4954.74	4875.26	4718.19	4602.64	4776.29	4574.95

3.4 펄릿의 연소 특성

PKS와 활엽수 톱밥을 혼합하여 제조한 펄릿의 연소 거동을 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8은 PKS와 톱밥을 7:3의 비율로 혼합하여 제조한 펄릿의 연소 거동을 승온속도 5°C/min 일 때를 기준으로 나타내었다. PKS와 톱밥의 연소 거동은 크게 3구간으로 일어나는데, 1차 구간은 50-220°C은 탈수(수분건조) 및 흡열반응에 의한 무게 감량 단계이다. 2차 구간은 220-380°C에서 발생하였으며 리그노셀룰로오스계 펄릿의 주성분인 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 그리고 리그닌들이 부분적으로 탈휘발이 주로 일어나는 구간이다. 3차 구간은 380-510°C 구간에서 발생하였고, 주로 잔류 리그닌과 숯(char)의 연소로 인한 무게감량이 발생하는 구간인 것으로 보인다.

EFB와 활엽수 톱밥을 7:3으로 혼합하여 제조한 펄릿의 연소 거동은 Fig. 9와 같다. PKS와 톱밥을 혼합하여 제조한 펄릿의 연소 거동과 마찬가지로 1차 구간은 50-220°C에서 일어났지만, 2차 구간은 PKS와 톱밥 혼합 펄릿보다는 좁은 220-320°C에서 발생하였다. 3차 구간은 320-460°C에서 일어나 PKS와 톱밥 혼합 펄릿보다는 빠르게 연소가 종료되었다.

Fig. 8. Combustion behavior of pellets made of mixtures of PKS and hardwood sawdust.

Fig. 9. Combustion behavior of pellets made of mixtures of EFB and hardwood sawdust.

펠릿의 연소 특성은 펄릿 제조에 사용된 원료의 종류에 차이가 있었지만 목재 펄릿의 연소 거동⁶⁾을 따르는 것을 알 수 있었고, 섬유상 형태의 EFB가 많이 포함될수록 연소가 다른 원료에 비해 빨리 종료되는 것을 알 수 있었다.

3.5 중금속 분석

활엽수 톱밥을 EFB와 PKS와 일정 비율로 각각 혼합하여 제조한 펄릿을 연소시켜 발생하는 회분으로부터 수은, 카드뮴, 납, 비소, 크롬 등과 같은 중금속 함량을 분석하였다. 회분에 포함된 중금속은 회분의 재활용을 방해하여 회분 재처리에 문제를 야기할 수 있다. 따라서 유해 중금속의 포함 여부는 펄릿 연소 후 발생하는 회분의 재사용에 있어 매우 중요하게 고려되어 진다. Table 4에 나타난 바와 같이 PKS와 EFB로만 만든 펄릿에서는 중금속이 거의 검출되지 않은 것으로 분석되었고, 톱밥이 함유된 EFB와 PKS 펄릿도 중금속 성분이 검출되지 않았다.

4. 결 론

Table 4. Heavy metals contained in pellets made of mixtures of EFB, PKS and hardwood sawdusts (unit: mg/L)

	Hg (≤ 6)	Cd (≤ 5)	Pb (≤ 100)	As (≤ 5)	Cr (≤ 70)
PKS	0	0	0	0	0
EFB	0	0	0	0	4.8

팜유를 추출하면서 발생하는 바이오매스 중에서 EFB와 PKS를 이용하여 펠릿을 제조한 후 품질 특성을 분석하였다. 또한 EFB와 PKS에 활엽수 톱밥을 일정 비율로 혼합한 후 펠릿을 제조한 후 그 품질 특성도 함께 분석하였다. EFB와 PKS를 이용하여 펠릿을 제조할 때에는 원료 자체의 함수율에 의해 펠릿 성형이 큰 영향을 받았고, 성형성 개선을 위해서는 전분과 같은 보조 바인더의 첨가가 도움이 되었다. EFB와 PKS로 만든 펠릿 모두 4,500 kcal/kg 이상의 우수한 발열량을 나타냈지만 회분이 과다하게 발생하여 1등급 펠릿의 기준에는 미치지 못하였다. 펠릿 제조 시 목재 사용을 줄이기 위해 활엽수 톱밥을 EFB와 PKS에 각각 일정 비율씩 혼합하여 제조하였을 때 1등급 펠릿에 해당하는 우수한 발열량을 나타냈다. 하지만 톱밥과 혼합하였을 때 회분 함량이 조금 감소는 하였지만 1등급 펠릿의 기준에는 미치지 못하였다. EFB, PKS, 그리고 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿이 연소될 때 흡열 및 탈수, 목재 주성분의 탈휘발, 그리고 잔류 리그닌과 숯의 연소와 같이 3단계로 연소되는 것을 확인할 수 있었고, EFB와 톱밥으로 제조된 펠릿이 PKS와 톱밥으로 제조된 펠릿에 비하여 연소가 조금 더 빠르게 종료되었다.

사 사

이 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S111212L070120)’의 지원에 의해 수행된 연구입니다.

인용문헌

1. Sumanthi, S., Chai, S.P., and Mohamed, A.R., Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 2404-2421 (2008).
2. Sulaiman, F., Abdullah, N., Gerhauser, H., and Shariff, A., An outlook of Malaysian energy, oil palm industry and its utilization of wastes as useful resources, *Biomass & Bioenergy* 35: 3775-3786 (2011).
3. Piarpuzán, D., Quintero, J.A., and Cardona, C.A., Empty fruit bunches from oil palm as a potential raw material for fuel ethanol production, *Biomass & Bioenergy* 35: 1130-1137 (2011).
4. Cocchi, M., Global wood pellet industry, market and trade survey, 2011 IEA Bioenergy Report, pp. 1-8.
5. 성낙환, 신재생에너지 의무할당제 영향과 기업의 대응, *LG Business Insight* 10: 36-37 (2008).
6. Ryu, J-S, Kim, K-S, and Park S-J, A study of combustion characteristics of wood biomass for cogeneration plant, *Appl. Chem.* 22(3): 296-300 (2011).