

농업부산물인 산업용 대마(*Cannabis sativa* L.) 목부를 이용한 고밀화 펠릿 연료

한규성¹, 이수민², 신수정^{1*}

¹충북대학교 목재·종이과학전공, ²국립산림과학원 미생물화학과

Densified Pellet Fuel Using Woody Core of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) as an Agricultural waste

Gyu-Seong Han¹, Soo-Min Lee² and Soo-Jeong Shin^{1*}

¹Department of Wood & Paper Science, Chungbuk National University

²Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute

Abstract - We prepared densified wood pellet by agricultural waste. The hemp woody core was used as replacing wood resource. Hemp was separated into the bast fiber and the woody core by hot steaming treatment. The hemp woody core had a similar lignin content(19.4%) and carbohydrate composition with hardwood(20-25% lignin in hardwood), respectively. Also, the hemp had a low ash content(0.5%), which resulted in a low ash formation in pellet burning. Heating value of the hemp pellet(18.40 MJ/kg) had a very similar to the pellet made by hardwoods. The hemp woody core could be replaced the hardwood for densified wood pellet.

Key words - Agricultural Waste, Hemp, Pellet, Woody Core

서 언

화석 연료 사용 증가로 인한 지구 대기층 내 이산화탄소 배출 증가로 인하여 지구온난화 현상이 가속화 되고 있다. 이로 인해 대기 중 이산화탄소 농도를 증가시키지 않을 수 있는 지속적으로 재생산 가능한 에너지 자원에 대한 관심이 날로 커지고 있다.

대기 중에 있는 이산화탄소를 이용하여 광합성을 한 다음 그 자원을 다시 이용하는 것은 탄소중립적인 것이어서 대기 중의 이산화탄소의 농도 증가에 영향을 미치지 않을 것이다. 따라서 버려지는 땅에 급속생장이 가능한 목질계 바이오매스를 재배하여 이용한다면 이산화탄소 농도 증가를 완화시킬 수 있을 것이다. 에너지작물의 개념은 바로 이러한 아이디어에 기초하고 있다. 따라서 초기 생장이 빠른 수종이나 일년생 초본류를 대상으로 하여 주기적으로 재배함으로써 태양에너지를 목질계 바이오매스 형태로 저장하

는 시도가 전 세계적인 트렌드가 되고 있는 현실이다.

대마는 예로부터 세계 각지에서 섬유자원으로 재배되어 왔으나, 대마의 잎이나 열매에 함유되어 있는 Δ^9 -tetrahydrocannabinol(THC)가 환각 작용을 일으키는 마약 성분이어서 관리의 대상이 되기도 했다(Kendell, 2003). 그런데 일반 대마에서는 THC 함량이 3-20% 정도이지만, 육종을 통해 이런 환각을 일으키는 성분의 함량을 획기적으로 줄여 현재 유럽이나 캐나다에서 널리 재배하고 있는 산업용 품종의 경우 THC 함량이 0.3% 이하로 현저하게 낮다(Industrial Hemp, www.industrialhemp.net). 산업용 대마는 연간 바이오매스 생산량도 다른 식물체에 비하여 월등하게 크기 때문에 에너지작물 후보로 각광을 받고 있다. 일반적으로 산림내 목재 바이오매스는건량 기준으로 헥타르당 연간 4-5톤을 생산하는데 비하여 에너지작물 후보 물질은 20-30톤 정도를 생산할 수 있다. 이런 에너지 작물 후보 물질과 단벌기 버드나무 재배가 유력하다(van der Werf et al. 1996). 현재 국내에서는 산업용 대마를 연간 2회 재배하고 있는데, 3월에 파종한 것은 6월

*교신저자(E-mail) : soojeongsf@hotmail.com

말이나 7월초에 수확하여 인피 섬유로 삼베옷을 만들며, 7월 중순에 파종한 것은 10월말이나 11월초에 종자를 수확하여 유지자원으로 사용하고 있다. 대마의 일반특성, 경종기술, 생산 및 관련 정보는 농촌진흥청 국립식량과학원 NICS online 작물 정보 센터에서 특용작물 내 대마 부분에서 자세하게 설명하고 있다(<http://crop.nics.go.kr/main.asp?ran=45119&m=8&s1=42&s2=188>).

대마의 껍질부를 구성하고 있는 인피 섬유는 셀룰로오스 함량이 높고 긴 섬유 구조를 하고 있어서 예로부터 섬유자원으로 널리 활용되어 왔으며, 오늘날에는 면섬유 펄프가 가지는 특수한 용도를 대체할 수 있는 고부가가치의 원료로의 모색도 진행되고 있는 실정이다. 그러나 종자와 인피 섬유를 채취할 때 다량으로 발생하는 목부 바이오매스는 사용 용도가 없이 버려지고 있는 실정이어서, 그 용도 개발이 매우 시급한 실정이다. 1990년대 말까지 전국적으로 약 600 ha의 면적에서 재배되던 대마는 2000년대 들어 급감하여 현재는 300 ha 정도의 재배면적을 가지고 있는 것으로 추정된다(특용작물 생산실적 각연도(농림부)). 대마는 헥타아르당 20톤 정도의 바이오매스 생산량(건물 기준)을 가지므로 목부로서 버려지는 양은 연간 약 5000톤에 이를 것으로 추산된다. 또한 이러한 산업용 대마 목부 바이오매스가 갖는 단점 중 하나는 밀도가 매우 낮다는 것이다. 연료로 사용하고자 하여도 단위 무게를 저장하거나 운반할 때 부피를 많이 차지하여 저장 및 운송 특성을 떨어뜨린다.

최근 농작물 재배 후 들판에 버려지는 농업 부산물을 바이오연료로서 이용하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이들 바이오매스의 큰 단점으로는 수확 가능한 시기가 한정되어 있어 이 시기에 집중적으로 배출되기 때문에 저장의 문제를 안고 있다. 또한 농업폐기물 바이오매스는 목질계 바이오매스에 비하여 차지하는 부피가 크기 때문에 운송 및 저장에 있어서 단위 무게당 더 많은 면적을 요구한다. 이런 저장상의 문제를 해결할 수 있는 방법 중의 하나는 부피를 획기적으로 줄일 수 있는 고밀화된 바이오연료로 변환시키는 것이다(Olsson, 2006). 농업 부산물을 연료로 이용하는데 또 다른 걸림돌은 회분 함량이 높은 바이오매스의 경우 보일러 내분해 무기금속의 침적이 일어나서 장치의 자동 작동을 방해하게 된다. 벚집의 경우 구조물 무기이온의 함량이 높아서 연소시 이런 문제를 야기한다(Okash 2007, Thy et al. 2005)

톱밥과 같은 목재 분말을 가지고 압착하여 펠릿(pellet)

을 만들면 밀도가 증가되고 이로 인하여 단위 부피당 에너지 밀도를 그만큼 증가시킬 수 있기 때문에 바이오매스 자원의 운반, 저장, 연소를 쉽게 조절할 수 있다. 따라서 유럽과 북미에서는 석유 연료나 화목(火木)을 대체할 수 있는 고체 바이오연료로서 목재 펠릿(pellet)의 이용과 이에 대한 연구가 꾸준히 증가하고 있다(Keauter et al. 2003; Main et al. 2006; Olsson et al., 2006; Wolf et al., 2006; 권 등. 2007; 한과 여, 2003; 한과 최, 2002).

본 연구에서는 산업용 대마 종자 수확 후 버려지는 부분 중 인피섬유를 제거한 후 남아 있는 목부 바이오매스를 이용하여 고밀화된 펠릿연료로 전환하고, 그 연료 특성을 분석하여 고체연료로서의 이용 가능성에 대하여 조사하였다. 무기 성분 분석을 통하여 이를 연료로 사용할 경우 펠릿 보일러에서 발생할 수 있는 문제점의 원인이 될 수 있는지도 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

시료 조정

충남 당진군 농업기술센터의 지도로 산업용 대마 (*Cannabis sativa* L.) 목포 1호 품종을 재배하는 농가에서 7월 중순 파종하여 종자 수확 후 들판에 남아 있는 산업용 대마 목부를 채취하였다. 이를 30cm 크기로 자른 후 120°C에서 30분간 증해하여 인피섬유(bast fiber)와 목부(woody core)를 분리하였다. 분리한 목부를 파쇄한 후 펠릿 제조에 적당한 크기를 체(20-60 mesh)로 선별하였다.

목질계 자원과 초본류 자원의 펠릿 제조 특성을 비교 목질 자원의 대체 가능성을 검토하기 위하여 현사시나무를 비교 시험에 사용하였다. 사용한 현사시나무(*Populus timentiglandulosa* T. Lee) 3클론(현사시 3호, 72-30호, 72-31호)은 경기도 기흥에 소재하는 산림과학원 포플러 시험림에서 채취하였으며, 이들 목재로부터 20-60 mesh의 톱밥을 제조하여 사용하였다.

펠릿 제조

기건 상태의 파쇄분을 자체 제작한 피스톤 타입의 펠릿 제조기(Fig. 1)를 이용하여, 180°C, 150 MPa의 압력 조건에서 3분간 압축하여 평균비중 1.15의 고밀화 펠릿을 제조하였다.

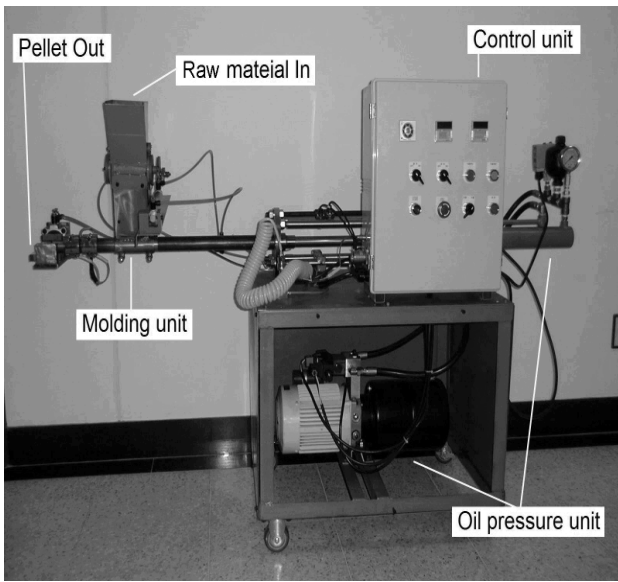


Fig. 1. A piston type pelletizer.

목부 구성물의 리그닌 및 당 분석

분리된 목부를 분쇄한 후 리그닌 함량을 Tappi Test Methods T222 om-88 방법으로 분석하였다(Tappi test methods, 1989). 리그닌 분석 과정에서 만들어진 수용성 부분을 냉장 보관한 후 탄수화물 분석에 사용하였다. 탄수화물의 구성당은 High Performance Anion-Exchange Chromatography(HPAEC, U.S. Dionex사)로 분석하였다(Lee, 1996). 컬럼은 CarboPac PA10(250 cm × 4 mm

id)을 사용하였고, ED50 pulsed amperometric detector를 사용하여 검출하였다. 유속은 0.8 ml/min로 하였다. 단당류의 정량 분석을 위하여 5종류의 단당류 표준물질(arabinose, xylose, mannose, galactose, glucose)로 표준 용액을 만들어 검량선을 구하였고, 체류시간에 따른 각 단당류 표준물질의 피크는 Fig. 2와 같다.

유기원소 분석

바이오매스를 구성하고 있는 성분 조성과 연소할 때의 발열량을 대략적으로 추정하기 위하여 C, H, O, N, S 원소의 함량을 유기 원소분석기(EA1110, England CE Instrument사)를 이용하여 측정하였다. 40 mesh 이하로 분쇄된 시료 10 mg을 1800°C에서 연소 시킨 후 발생하는 각 원소의 기체를 GC(gas chromatography) 칼럼을 통과시키면서 이동속도에 따라 분리한 후 열전도도 검출기로 검출하여 각 원소의 구성 비율을 계산하였다.

회분 측정

전건 시료 1.00 g을 연소로에 넣은 후 525°C까지 가열한 후 도달한 온도에서 10 시간 열분해하여 유기물을 제거한 후 남아있는 회분의 양을 측정하였다.

무기원소 분석

무기물을 구성하고 있는 원소 성분을 정량분석하기 위하

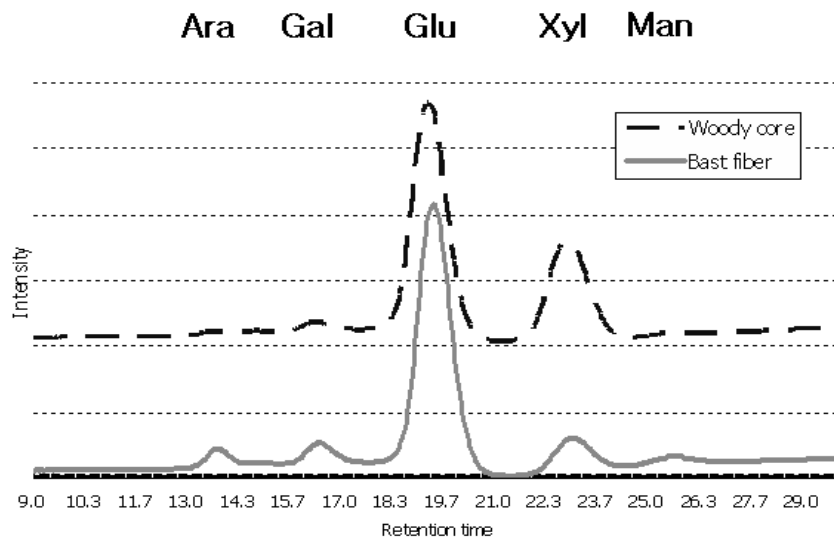


Fig. 2. HPAEC chromatograms of monosaccharides from hemp woody core and bast fiber(Ara : arabinose, Gal : galactose, Glu : glucose, Xyl : xylose, Man : mannose).

여 Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6401, Japan Shimadzu사)을 사용하여 측정하였다. 목질계 바이오폐스에 널리 분포하는 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na의 6가지 원소에 대하여 건량기준 분석하였다.

열량 분석

전건 시료 1.00 g을 열량계(1341 Oxygen Bomb Calorimeter, U.S. Parr Instrument사)에 넣고 산소를 충전한 후 점화하여 연소 전후의 온도변화로부터 건조 고위발열량(HHV, higher heating value)을 계산하였다.

결과 및 고찰

대마 바이오매스를 목부와 인피 섬유로 분리한 결과 20.6%가 인피 섬유로, 79.4%가 목부로 구성되어 있었다. 본 실험에서는 그 중 목부 부분으로 펠릿을 제조하였고 성분 분석을 하였다.

목부 구성물의 리그닌 및 당 함량

글루코오스(glucose)와 자일로오스(xylose) 함량이 다른 당(mannose, arabinose, galactose)에 비하여 높은 것으로 미루어, 산업용 대마의 목부를 구성하고 있는 구조용 탄수화물 성분은 주로 셀룰로오스와 자일란(xylan)으로 추정되었다(Table 1). 만노오스(mannose)가 검출되지 않은 것으로 미루어 글루코만난(glucomannan)계 헤미셀룰로오스 성분은 대마 목부에 존재하지 않는 것으로 사료되었다. 이와 같이 셀룰로오스 및 자일란 함량이 높은 반면 글루코만난 성분의 함량이 낮은 것은 일년생 초본류들의 특징적인 화학적 조성이다. 91일과 151일 재배 후 kenaf의 인피 섬유와 목부 의 탄수화물 조성 분석에서 만노오스의 함량은 목부에서 1.5-2.0% 함량을 인피섬유에서 1.6-2.4%

Table 1. Lignin and carbohydrate composition in hemp(Mokpo-1) woody core and bast fiber based on hot-water extracted hemp

	Lignin content, (%)	Monosaccharides composition, (%)					
		Total	Glu	Xyl	Gal	Man	Ara
Woody core	19.4	80.6	50.0	28.4	1.7	-	0.5
Bast fiber	10.4	89.6	67.6	10.0	4.6	3.9	3.5

Table 2. Elementary composition difference between hemp (Mokpo-1)woody core and hybrid Hyunsasi-poplar

		Elementary Composition(%)				
		C	H	O	N	S
Hemp	Woody Core	47.89	6.04	45.86	0.20	N.D.
<i>P. timentiglandulo</i>	3	48.86	6.54	43.87	0.73	N.D.
<i>sa T. Lee</i>	72-30	47.57	6.33	45.70	0.40	N.D.
	72-31	47.87	6.57	45.04	0.55	N.D.

N.D. : not detected.

함량을 보였다(Morrison et al., 1999). 다른 연구에서는 인피섬유 내 만노오스의 함량이 1.5%와 목부에서 1.3%를 보였다(Ohtani et al., 2001).

대마 목부의 리그닌 함량은 19.4%로서 일반적인 활엽수재의 리그닌 함량인 20-25%에 비해 약간 낮았다(Sjöström, 1993).

유기 원소 함량

유기 원소 성분 분석 결과 산업용 대마의 목질부는 세 가지 현사시나무 잡종 클론과 비교하여 수소의 함량이 0.3-0.5% 정도 낮았고 산소의 함량은 약 0.16-2.0% 정도 높았다(Table 2). 탄소의 함량은 유사하게 나타났다. 대마 목부는 연료에 있어서 발열량 증대에 영향을 끼치는 수소 함량이 낮고 발열량을 낮추게 하는 산소 함량이 높기 때문에, 대마 목부로 제조한 펠릿은 육종 중인 현사시나무 클론으로 제조한 펠릿에 비하여 약간 낮은 열 함량을 가질 것으로 예상되었다.

무기물 함량

연소과정 중 유기물질은 연소되어 열량을 발생시키면서 산화되지만 무기물은 남아 재의 형태로 존재한다. 산업용 대마 목부를 이용하여 펠릿을 제조하였을 경우 생겨나는 재의 양을 추정하기 위하여 무기물 함량을 분석하였다. 무기물 함량은 전건 시료를 기준으로 0.5%로서 목부 분말이나 펠릿으로 제조하였을 경우와 같은 함량을 보였다. 따라서 대마 목부를 이용하여 펠릿을 제조하여도 특별하게 많은 양의 재를 생성하지는 않을 것이다.

무기물을 구성하고 있는 원소 구성을 추정하기 위하여 원소 분석을 실시하였다. 대마 목부를 구성하고 있는 주요

Table 3. Inorganic compounds in hemp(Mokpo-1) woody core

	Inorganic compounds(ppm)					
	Ca	K	Na	Mg	Mn	Fe
Hemp Woody Core	1333.3	52.5	46.0	8.8	0.6	N.D

N.D. : not detected

무기물 분석 결과 Ca가 가장 많이 들어 있고, K, NA, Na, Mg, Mn이 검출되었으며 Fe의 존재는 검출되지 않았다.

발열량

포플러류는 최근 세계 각지에서 에너지자원식물로서의 조림이 활발이 이루어지고 있는 수종인데, 우리나라에서는 현사시나무가 포플러류에 해당하며 성장량도 매우 좋아 금 후 에너지식물로서 기대를 받고 있는 수종이다. 따라서 대마 목부와 현사시나무로부터 제조된 고밀화 펠릿의 건조 고위발열량을 측정하여 비교 분석하였다. 원소 조성 분석에서 예측한 대로, 낮은 수소함량과 높은 산소 함량을 가지는 대마 목부로부터 제조한 펠릿은 육종된 현사시나무 클론으로 제조한 현사시나무 펠릿 3종과 비교하여 약 10% 적은 고위발열량을 보였다. 이는 대마 목부의 화학적인 조성에 있어서 리그닌 함량이 낮은 사실과 깊은 관련이 있다. 일반적으로 바이오매스 주성분인 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스 성분은 높은 산소 함유량으로 인하여 산소 함유량이 낮은 리그닌에 비하여 발열량이 크게 떨어진다. 대마 목부의 리그닌 함량은 19.0%로 현사시나무 잡종 클론의 21~23%에 비하여 낮기 때문에 이로 인하여 발열량이 떨어지는 것으로 생각되었다.

한편, 바이오매스의 원소 구성에 따른 열량 추정을 위하여 다음의 두 모델이 널리 인용된다.

1) Dulong 모델(Sivapalan et al. 2003)

$$CV(\text{Calorimetric value}) = 80,80 \%C + 344,60(\%H - \%O/8) + 22,50 \%S(\text{kcal/kg})$$

2) Ruyter 모델(Ruyter, 1982)

$$CV = 0,34 \%C + 1,40 \%H - 0,16 \%O(\text{MJ/kg})$$

두 개의 모델식에 따라 건조 고위발열량을 추정된 결과 대마 목부는 현사시나무에 비해 다소 낮은 열량을 가질 것

Table 4. Higher heating value comparison between hemp (Mokpo-1) woody core and hybrid poplars

		Higher Heating Value(MJ/kg)		
		Measured	By Ruyter's equation	By Dulong's equation
Hemp	Woody Core	18.40	17.39	16.64
<i>P.</i>	3	20.18	18.75	18.05
<i>timentiglandu</i>	72-30	20.83	17.72	16.98
<i>losa T. Lee</i>	72-31	21.22	18.27	17.55

으로 추정되었고 그 차이는 5% 정도일 것으로 추정되었다. 그러나 실제 측정 결과 대마 목부는 현사시나무에 비해 10% 정도 낮은 열량을 나타내었다. 두 가지 모델 모두 실제 열량과 다른 추정치를 나타내었으며, Dulong의 식은 현저하게 낮은 추정치를 나타내었다. 보다 정확한 펠릿의 연소열량 추정을 위해서는 두 가지 모델 모두 개량을 필요로 하였다.

적 요

종자 수확 후 버려지는 산업용 대마를 이용한 목질 펠릿 제조 가능성과 제조된 펠릿의 특성을 살펴보았다. 산업용 대마의 성분 분석 결과 활엽수와 비슷한 리그닌 함량과 당 구성을 보였으며, 회분 분석 결과 무기물 함량이 0.5% 정도이어서 연료로 사용할 경우 재의 생산량은 크지 않을 것이다. 원소 분석 결과 대기 오염을 유발할 수 있는 질소와 황 함량을 분석한 결과, 황 성분은 전혀 포함하지 않고 있으며, 약간의 질소 성분을 포함하고 있는데 이는 현사시나무와 비슷한 수준이었다. 고위발열량 측정 결과 대마 목부는 현사시나무보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 바이오매스 생산량이 큰 대마 목부를 이용하여 제조한 펠릿은 활엽수로 제조한 펠릿과 비슷한 화학적 성질과 발열 특성을 가질 것으로 기대되어 고체연료로서의 이용이 가능할 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 학술 진흥재단의 학문 후속세대 양성 사업(KRF-2006-353)에 의하여 신수정의 일부가 지원을 받은 것으로 관계기관에 감사의 말씀을 올립니다.

인용문헌

Industrial Hemp information(www.industrialhemp.net)

- Kauter, D., I. Lewandowski and Claupen, W. 2003. Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use-a review of the physiological basis and management influence. *Biomass Bioenerg* 24: 411-427.
- Kendell, R. 2003. Cannabis condemned: the proscription of Indian hemp. *Addiction*. 98(2): 143-151.
- Lee, Y.C. 1996. Carbohydrate analyses with high-performance anion-exchange chromatography. *Journal of Chromatography. A*. 720: 137-149.
- Mani, S., L. G. Tabil, and Sokhansanj, S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses, *Biomass Bioenerg*. 30: 648-654.
- Morrison, W.H., D.E. Akin, D.D. Archibald, R.B. Dodd and Raymer, P.L. 1999. Chemical and instrumental characterization of maturing kenaf core and bast, *Ind. Crops Prod*. 10(1): 21-34.
- NICS online crop information(<http://crop.nics.go.kr/>)
- Ohtani, Y., Mazumder, B.B. and Sameshima, K. 2001. Influence of the chemical composition of kenaf bast and core on the alkaline pulping response. *J. Wood Sci*. 47: 30-35.
- Okash, F. 2007. Staged combustion of rice straw in a fluidized bed, *Exp. Therm. Fluid Sci*. 32: 52-59.
- Olsson, M. and Kjallstrand, J. 2006. Emissions from burning of softwood pellets, *Biomass Bioenerg*. 27: 607-611.
- Olsson, M. 2006. Wheat straw and peat for fuel pellets-organic compounds from combustion, *Biomass Bioenerg*. 30: 555-564.
- Ruyter, H.P. 1982. Coalification model, *Fuel*. 61: 1182-1187.
- Sivapalan, K., M.N.M. Yunus, K. Sopian, A.H. Samsuddin and Rahman, R.A. 2003. Modeling the heating value of municipal solid waste, *Fuel*. 82: 1119-1125.
- Sjöström, E. 1993. *Wood Chemistry-fundamentals and application*. Academic Press, San Diego, U.S.A. pp. 70-72.
- Tappi Standard, T222 om-88, 1989. Acid-insoluble lignin in wood and pulp, In: *TAPPI test methods*. TAPPI PRESS. Atlanta. USA.
- Thy, P., Jenkins, B. M., Leshner, C.E, and Grundvig, S. 2005. Compositional constraints on slag formation and potassium volatilization from straw blended wood fuel, *Fuel Process. Technol*. 87(5): 383-406.
- Van der Werf, H.M.G., E.W.J.M. Mathijssen and A.J, Haverkort. 1996. The potential of hemp(*Cannabis sativa* L.) for sustainable fibre production: a crop physiological appraisal. *Annals of Applied Biology*. 129: 109-123.
- Wolf, A., A. Vidlund, and Andersson, E. 2006. Energy-efficient pellet production in the forest industry - a study of obstacles and success factors, *Biomass Bioenerg*. 30: 38-45.
- 권성민, 조재현, 이성재, 권구중, 황병호, 이귀현, 한규성, 차두송, 김남훈. 2007. 산불 피해 소나무재의 목질 펠릿으로의 이용 가능성 평가, *목재공학*. 35(4): 14-20.
- 농림부. 2003. 농림업 주요 통계.
- 한규성, 여진기. 2003. 고밀화에 의한 현사시 톱밥의 고품연료화, *임산에너지*. 220(2): 54-59.
- 한규성, 최돈하. 2002. 포플러로부터 고밀화 연료의 제조, *임산에너지*. 21(3): 59-65.

(접수일 2008.10.14; 수락일 2009.6.4)