

# 인도네시아 오일 팜 바이오매스 잠재량 평가<sup>1</sup>

안 병 준<sup>2</sup> · 한 규 성<sup>4</sup> · 최 돈 하<sup>3</sup> · 조 성 택<sup>2</sup> · 이 수 민<sup>2,5,†</sup>

## Assessment of The Biomass Potential Recovered from Oil Palm Plantation and Crude Palm Oil Production in Indonesia<sup>1</sup>

Byoung-Jun Ahn<sup>2</sup> · Gyu-Seoung Han<sup>4</sup> · Don-Ha Choi<sup>3</sup> · Sung-Taig Cho<sup>2</sup> · Soo-Min Lee<sup>2,5,†</sup>

### 요 약

본 연구에서는 인도네시아 오일 팜 재배 및 CPO 생산 공정으로부터 발생하는 바이오매스의 에너지 이용 가능성을 조사하기 위하여 오일 팜 플랜테이션에서 발생하는 바이오매스의 잠재성을 분석하였다. 인도네시아의 오일 팜 재배 면적은 2011년 8.9 백만 ha에 달하고 있으며, 2020년까지 13 백만 ha로 확대될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 2011년 면적을 기준으로 하였으며, 바이오매스의 분석은 오일 팜 재배 시에 발생하는 바이오매스와 CPO 생산 공정 중 발생하는 바이오매스 부산물의 양으로 단계를 구분하여 연구를 수행하였다. 그 결과로 2011년 오일 팜 재배 과정에서 발생하는 바이오매스는 줄기, 가지, 뿌리를 포함하여 최소 3 백만 ton에서 최대 16 백만 ton에 이를 것으로 분석되었으며, CPO 제조 공정에서는 건조 중량 기준 49 백만 ton이 발생하는 것으로 분석되었다. 이것을 건조 기준 고위발열량으로 환산을 할 경우, 593 천 TOE에서 3,197 천 TOE의 에너지가 발생하며, CPO 제조 공정 중 발생하는 바이오매스는 건조중량 기준 48,914 천 ton이 발생하는 것으로 추정되며, 바이오매스 부산물의 에너지량은 고위발열량 기준 22,722 천 TOE, 저위발열량 기준으로 16,330 천 TOE가 발생하는 것으로 추정되었다. 따라서, 2011년 인도네시아의 오일 팜 재배와 CPO 생산으로부터 고위 발열량 기준으로 25,919 천 TOE의 오일 팜 바이오매스 부산물이 발생한 것으로 분석되었다.

### ABSTRACT

In this study, the potential of biomass, which is generated from oil palm cultivation and crude palm oil (CPO) production of Indonesia was assessed in the aspect of energy content. The types of oil palm biomass were classified on the basis of the cultivation stage and the CPO production stage. In the cultivation stage, biomass is considered to be

<sup>1</sup> Date Received January 16, 2014 Date Accepted February 11, 2014

<sup>2</sup> 국립산림과학원 임산공학부 화학미생물과. Division of Wood Chemistry & Microbiology, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>3</sup> 국립산림과학원 임산공학부 재료공학과. Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>4</sup> 충북대학교 농업생명환경대학 목재종이과학과. Department of Wood and Paper Science. College of Agriculture, Life & Environments Sciences. Chungbuk National University. Cheongju 361-763, Korea

<sup>5</sup> 국제임업연구센터. Forests and Environment Programme, Center for International Forestry Research, Bogor 16115, Indonesia

<sup>†</sup> 교신저자(corresponding author) : 이수민(e-mail: S.Lee2@cgiar.org)

produced from its' root, trunk and frond. Other possible biomass resources such as empty fruit bunch (EFB), palm kernel shell (PKS) and fiber were included in the CPO production stage. As results, total biomass from damaged plantation area of Indonesia was estimated to be annually from 3 million to 16 million tons in 2011. From CPO mills, approximately 49 million tons/yr of biomass residues were estimated to be annually occurred. Their total energy content from each biomass source in cultivation stage was analyzed to be from 593,000 to 3,197,000 TOEs in terms of gross calorific value. In the case of CPO mills, around 22.7 million TOEs was estimated to be potential energy producible by biomass based on gross calorific value of dry basis. If moisture content considered, net calorific value was analyzed to be decreased to 16.3 million TOEs. Based on the results, the total energy contents of all oil palm biomass were estimated to be up to 25,919,000 TOE in terms of gross calorific value.

CPO : Crude Palm Oil, EFB : Empty Fruit Bunch, FFB: Fresh Fruit Bunch, PKS : Palm Kernel Shell, OPF : Oil Palm Frond, PKOC : Palm Kernel Oil Cake, ISPO : Indonesia Sustainable Palm Oil Commission, TOE : Tone of Oil Equivalent

**Keywords :** Oil palm, biomass, empty fruit bunch, palm kernel shell, bioenergy, crude palm oil

## 1. 서 론

기후변화로 인한 재생에너지 이용은 국제 사회에서 매우 중요한 화제가 되고 있다. 화석연료 사용의 감축과 재생에너지 이용 증대를 통해 온실가스 배출을 저감하는 것은 국제 사회가 진지하게 고민하고 있는 주제이다.

이러한 온실가스 배출 감축과 관련하여 선도적으로 목표량을 제시한 것은 유럽연합으로 2009년 유럽 의회에서 발표된 재생에너지 이용 촉진에 관한 법( Renewable Energy Directive)에서 2020년까지 재생에너지 보급량을 유럽 에너지 공급량의 20%까지 확대하는 것을 명시하였다(EC 2009). 우리나라도 2008년 국가 신·재생에너지 기본 계획을 발표하며, 2030년까지 신·재생에너지 보급 비율을 국가 1차에너지 공급량에 11%까지 확대한다는 계획을 발표하여 추진 중에 있다. 다양한 종류의 바이오매스 자원을 대상으로 발굴 또는 활용 가능성에 대한 지속적인 검토가 이루어지고 있는 가운데, 바이오디젤 등으로의 공급 가능성 때문에 오일 팜에 대한 관심이 증가하고 있다.

오일 팜(*Elaeis guineensis*)은 다년생 작물로 25년 생의 경우 높이가 10 m에 달한다. 오일 팜 열매(FFB)는 유지 성분이 많이 포함되어 있어 식용유의 주 원료로 사용되며, 세계 식용유 시장의 약 30%가 팜 오일로 충당되고 있다(Corley 2009). 또한 축산

사료나 비누·세제를 제조하기 위한 원료로도 사용된다(Corley *et al.* 1971; Prasertsan and Prasertsan 1996). 최근 들어 바이오에너지에 대한 관심이 증대됨에 따라, 팜 오일이 바이오디젤 원료로서 활용 가능성이 높다는 측면에서 크게 주목을 받고 있으며(Corley 2009; Shuit *et al.* 2009; Sulaiman *et al.* 2011; Chiew and Shimada 2013), 이러한 국제적인 동향에 따라 오일 팜 재배 면적은 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다. 한국에서도 오일 팜 부산물에 대한 이용 연구가 대학교 및 연구 기관을 중심으로 일부 진행 중에 있다(Sung *et al.* 2013). 이러한 시장 확대는 인도네시아에서 오일 팜이 산업적으로 중요하게 인식되도록 하였으며, 인도네시아 정부가 정책적으로 지원하고 있는 중요 작물이다(Dermawan *et al.* 2011). 인도네시아의 국토 면적은 약 190 백만 ha로 우리나라(약 9.9 백만 ha)와 비교하여 약 20배 가량 넓고, 오일 팜 재배면적은 2011년 기준으로 인도네시아 국토 면적의 4.7%에 해당하며, 오일 팜 재배 면적은 우리나라 국토 면적에 근접한다. 한편, 인도네시아 정부는 2020년까지 오일 팜 재배면적을 13 백만 ha로 확대한다는 계획을 발표한 바 있다(Dermawan *et al.* 2011).

오일 팜 바이오매스의 에너지 이용 활성화를 통한 국가 신재생에너지 보급확대와 온실가스 배출 저감에 기여라는 거시적 측면에서의 접근을 바탕으로, 본

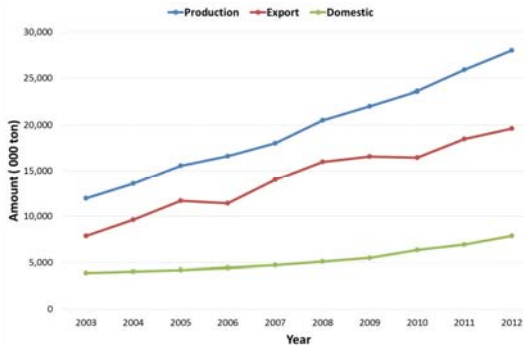


Fig. 1. Oil palm plantation area of Indonesia from 2003 to 2011.

연구에서는 향후 국내 오일 팜 바이오매스 관련 연구에 기초자료를 제공하기 위해 인도네시아의 오일 팜 재배와 CPO 생산공정을 기준으로 이용 가능한 바이오매스 부산물의 양을 추정하고 바이오매스 에너지 자원으로서의 기대 효과를 분석하였다.

## 2. 연구 수행 방법

### 2.1. 인도네시아 오일 팜 플랜테이션 산업 현황 및 관련 정책 분석

인도네시아의 주요 오일 팜 플랜테이션 현황을 논문과 면담 수집자료를 기준으로 분석하였다. 면담에 사용된 자료에서는 객관화가 가능한 자료를 이용하였다. 주요 분석 항목으로는 인도네시아 전체 오일 팜 플랜테이션 면적 변화 및 단위 면적 당 오일 팜 생산량, 바이오매스 존재량 등을 항목으로 선정하였다. 더불어, 인도네시아에서의 오일 팜 플랜테이션 관련 정책을 바탕으로 향후 오일 팜 플랜테이션 면적 등을 분석하였다.

### 2.2. 오일 팜 재배 및 CPO 생산 공정 바이오매스 발생량 추정

바이오매스 발생량을 추정하기 위해 오일 팜 플랜테이션의 조림에서부터 FFB (Fresh Fruit Bunch) 생산 및 운반 공정과 CPO 생산 공정으로 크게 2단계

의 공정으로 나누었으며, 각 단계별로 생산 가능한 바이오매스의 종류 및 특성을 문헌 자료를 바탕으로 비교하였다.

### 2.3. 오일 팜 바이오매스의 에너지 특성 분석

남부 발전에서 수마트라 등의 인도네시아 지역에서 수집한 오일 팜 관련 바이오매스들의 에너지 특성 분석 자료를 기반으로 오일 팜 플랜테이션에서 생산된 주요 바이오매스 부산물들의 에너지 이용 가능성을 확인하는데 적용하였다.

발열량, 회분, 원소분석, 무기물 분석 등을 수행하였으며, 국립산림과학원의 목재펠릿 품질기준에서 제시된 시험방법에 준하여 측정하고 ISO 등의 해외 펠릿 품질기준과 비교하였다. 분석된 결과는 문헌 자료와 비교하였다(KFRI 2009).

## 3. 결과 및 고찰

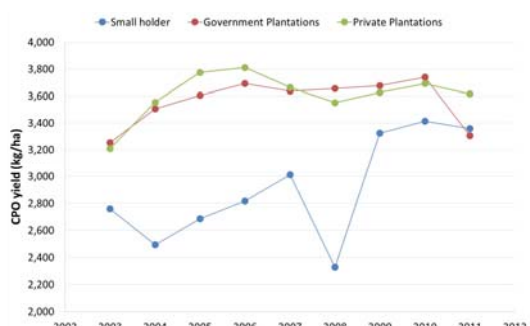
### 3.1. 세계 팜 오일 시장 현황

2012년 세계 오일 팜 시장의 규모는 연간 410억 불 규모로 집계되고 있다. 팜 오일의 국제가격 동향은 최근 5년 동안 2011년 2월 1,250 USD/ton으로 가장 높았던 반면, 2008년 11월에는 433 USD/ton까지 낮았던 경우도 있었으며, 2012년에는 평균 760 USD/ton에 거래된 것으로 분석되었다(Mundindex 2012).

미국 농무성의 통계자료에 의하면, 2012년 기준으로 세계 팜 오일 시장은 53.3 백만 ton 규모였으며, 이 중 52.5%인 28.0 백만 ton이 인도네시아로부터 공급되었다. 인도네시아는 2003년 이후 매년 평균 10.6%의 CPO 생산량이 증가하였으며, 국내 소비량도 연간 약 7.9% 증가하였으나, 세계적으로 팜 오일 소비 시장 확대 속도가 인도네시아 국내 시장을 앞서는 것으로 분석되었다(Fig. 1)(Slette and Wiyono 2012). 2012년 인도네시아에서 생산된 팜 오일 중 70%인 19.6 백만 ton은 해외로 수출되었으며, 국내에서 소비된 양은 28%인 7.8 백만 ton이었다. 팜 오일의 수입량을 기준으로 볼 때, 주요 소비국으로는

**Table 1.** Regional area of oil palm and CPO production efficiency in Indonesia (2010)

Regional Plantation			CPO production			Production
Region	Percentage	Area (ha)	Region	Percentage	ton	ton/ha
Riau	22	1,801,210	Riau	31	6,064,391	3.37
North Sumatra	13	1,057,769	North Sumatra	16	3,230,488	3.05
South Sumatra	9	737,191	West Sumatra	11	2,082,196	2.82
Central Kalimantan	14	1,085,158	Central Kalimantan	9	1,717,494	1.58
West Kalimantan	7	545,805	West Kalimantan	4	881,768	1.62
East Kalimantan	6	494,983	West Sumatra	4	852,042	-
Jambi	6	494,078	Jambi	7	1,293,173	2.62
Others	23	1,820,238	Others	18	3,638,459	2.00

**Fig. 2.** CPO yield from oil palm plantation in Indonesia, 2003~2011.

인도(8.0 백만 ton), 중국(6.4 백만 ton), 유럽연합(5.6 백만 ton) 순으로 분석되었다(Mundindex 2012).

### 3.2. 인도네시아 오일 팜 플랜테이션 면적 증가와 CPO 생산

단위 면적 당 생산되는 CPO 양은 민간기업 부분에서는 ha 당 3.5 ton 전후인 것으로 판단되며, 소규모 지역 주민에 의해 생산되는 오일 팜의 CPO 생산 효율이 2000년대 초반 약 2.5 ton에서 점차 증가하여 2011년에는 3.4 ton까지 증가한 것으로 분석되었다(Fig. 2). 오일 팜은 식재 후 시간에 따라 구분된다. 이는 오일 팜의 성장 특성과 관계가 있다. 식재 후 팜 열매 수확이 없는 4년 미만의 오일 팜은 미성숙재, 4년에서 25

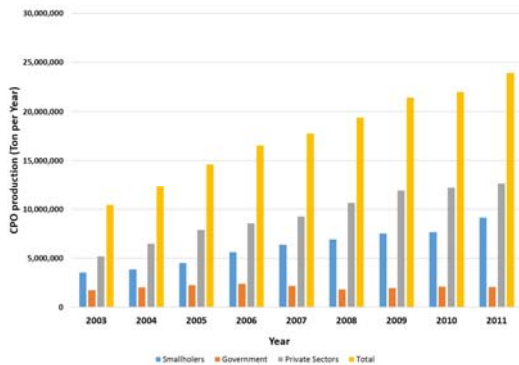
년은 성숙재, 25년 이상인 경우에는 벌채 후 재식재된다. 기타 피해로 인하여 더 이상 팜 열매를 생산하지 못하는 지역에서도 벌기령에 관계없이 벌채 후 재식재되는 단계가 필요하다(Corley *et al.* 1971; Somporn Pleanjai 2009; Singh *et al.* 2011; Aholoukpè *et al.* 2013). 인도네시아에서 연간 벌채 가능한 오일 팜 면적은 대략 65 천 ha에서 85 천 ha 규모로 보고되고 있으나, 벌채 가능 면적은 해마다 여러 가지 요인으로 인해 큰 편차를 나타내고 있다(ISPO 2012).

인도네시아 오일 팜 협회(Indonesia Renewable Oil Palm Commission, ISPO)의 자료에 따르면, 인도네시아 오일 팜 재배면적은 지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다(ISPO 2012). 인도네시아는 2003년에서 2011년까지 약 5 백만 ha에서 9 백만 ha로 증가하였는데, 2011년 기준으로 인도네시아의 오일 팜 재배 면적은 약 8.9 백만 ha로 집계되었다(Fig. 1). 최근 팜 오일 가격이 상대적으로 안정화되어 있음에도 불구하고, 인도네시아 정부가 정책적으로 오일 팜 재배 면적을 확대하고자 하는 배경에는 바이오디젤과 같은 에너지 수요가 지속적으로 증가할 것이라는 예상과 관계가 있는 것으로 판단된다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 인도네시아의 주요 오일 팜 플랜테이션은 수마트라와 칼리만탄 지역에 대부분 위치하고 있다. 특히, 수마트라의 리아우(Riau) 지역과 북수마트라 지역은 인도네시아 전체

**Table 2.** Oil palm biomass from plantation area Syahrudin (In: Vlek PLG 2005) (Unit: ton/ha, wet basis)

Age	Belowground			Aboveground				Total
	Root	Trunk base	Trunk	Fronde	Rachis	Leaflet	Others	
3	12	1.3	13.1	1.2	4.6	1.4	1.4	35.00
10	16.1	8.9	49.0	20.5	9.9	4.8	2.16	111.36
20	27.6	12.5	74.1	2.3	15.8	4.3	5.71	142.31
30	35.7	16.7	94.3	3.3	24.2	6.4	6.54	187.14



**Fig. 3.** CPO production of Indonesia from 2003 to 2011.

오일 팜 재배 면적의 35%를 차지하며, CPO 생산량의 47%를 담당하는 중심 지역이다. 이 지역에서 2010년 ha 당 생산되는 CPO의 양은 리아우 지역이 3.37 ton, 북수마트라는 3.05 ton이었다. 같은 해 중부 칼리만탄 지역의 1.58 ton이나 서부 칼리만탄 지역의 1.62 ton과 비교하면 약 2배 정도 많은 생산규모를 나타냈다. 이와 같은 지역별 생산량 차이는 토질이나 기후, 오일 팜 재배지역 조성 시기, 재배방법 등의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 FFB 생산량과 CPO 생산량을 비교 분석하는 것이 생산효율 변화를 이해하는데 필요할 것으로 보인다.

인도네시아에서의 오일 팜 재배 농장의 구성 비율은 크게 지역 주민들에 의한 재배와 기업, 그리고 정부가 직접 운영하는 지역으로 나뉜다. 2001년 이후 인도네시아 정부가 주도한 오일 팜 재배면적에는 변화가 없으나, 지역 주민에 의한 소규모 재배와 민간 기업의 재배면적은 꾸준히 증가하고 있다. 한편 기업

이 직접 관리하는 지역의 오일 팜 생산효율은 정부나 개인이 재배하는 지역보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었다(Pehnel and Vietze 2012)(Fig. 2). Fig. 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 인도네시아에서 연간 생산하는 CPO는 2011년 25 백만 ton에 이르렀으며, 2012년에는 28 백만 ton에 달한 것으로 분석되었다(Dermawan et al. 2011). 이러한 생산량은 인도네시아 정부의 정책적 지원 하에 오일 팜 재배 면적 증가와 더불어 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

### 3.2. 오일 팜 줄기 및 가지 생산량 및 에너지

오일 팜의 단위 면적(ha) 당 식재 본수는 식재 환경 등에 따라 다양하지만, 일반적으로 136본에서 148본 정도인 것으로 보고되고 있으며 평균 140본 정도로도 예상된다(Schmidt 2007). 주요 생산물인 FFB 생산량은 지역 등에 따라 약간의 편차가 있으나, 평균 연간 20 ton/ha 정도인 것으로 분석되었다(Corley et al. 1971; Schmidt. 2007; Sumathi et al. 2008; Somporn Pleanjai 2009; ISPO 2012; Kaewmai et al. 2012; Souza et al. 2012).

재배 단계에서 생성되는 부산물 중 이용 가능한 자원으로는 가지와 줄기 및 뿌리로 구분하여 생각할 수 있다. Syahrudin (2005)에 따르면, 30년생 오일 팜의 경우 뿌리를 포함하여 ha 당 약 187 ton의 바이오매스가 발생하는 것으로 분석되었다(Table 2). 이 중 줄기가 약 50.3%인 94.3 ton/ha이 발생하는 것으로 분석되었으며, 잎 등을 포함한 가지부는 약 16.4%를 차지하였다(Syahrudin In, Vlek PLG 2005). 수

**Table 3.** The estimation of oil palm biomass potential from damaged plantation area in Indonesia

Year	Area (ha)	Biomass (ton/ha, wet basis)			
		3 years	10 years	20 years	30 years
2003	74,889	2,621,115	8,312,679	10,634,238	14,004,243
2004	65,586	2,295,510	7,280,046	9,313,212	12,264,582
2005	63,751	2,231,285	7,076,361	9,052,642	11,921,437
2006	68,730	2,405,550	7,629,030	9,759,660	12,852,510
2007	83,744	2,931,040	9,295,584	11,891,648	15,660,128
2008	76,603	2,681,105	8,502,933	10,877,626	14,324,761
2009	85,317	2,986,095	9,470,187	12,115,014	15,954,279
2010	76,414	2,674,490	8,481,954	10,850,788	14,289,418
2011	86,330	3,021,550	9,582,630	12,258,860	16,143,710

**Table 4.** Major biomass by-products from CPO production

Biomass type	Crude Palm Oil	Palm Kernel Oil	Palm Kernel Cake	Empty Fruit Bunches	Kernel Shell	Fibers	POME	Ref.
Percentage (wt%)	20.0	1.5	3.5	22.0	5.0	12.0	50.0	Queiroz <i>et al.</i> 2012
	19.9	5.3		22.5	7.0	13.0	67.3	Schmidt. 2007
	20.3	2.4	2.7	22.3	6.8	13.3	66.1	Yusoff. 2006

명이 다한 오일 팜 재식재의 경우에 뿌리를 모두 제거한다면, 추가로 ha 당 52.4 ton의 바이오매스를 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 반면, Yusoff (2006)는 말레이시아의 오일 팜 재배 사례 연구를 통해 건조된 바이오매스 무게를 기준으로 ha 당 frond가 10.4 ton, EFB가 1.6 ton 발생하며, 오일 팜 재식재 시에 trunk가 75.5 ton, frond 등이 14.4 ton 발생하는 것으로 보고하였다(Yusoff 2006).

이러한 연구 결과들의 차이는 장기적으로 오일 팜 바이오매스 활용 정책 수립에 혼란을 야기한다. 특히, 현재에도 오일 팜 플랜테이션 및 CPO 생산공정에서 발생하는 바이오매스 중 일부는 CPO 공정의 에너지원 및 오일 팜 수율 증대를 위한 퇴비 등으로 재활용되고 있다. 따라서 정확한 오일 팜 바이오매스 이용 가능량의 산정 및 경제성 분석을 위해 국가 차원에서 체계적인 통계 자료를 구축하는 것이 필요하다.

오일 팜 플랜테이션에서 바이오매스가 발생하는 경우는 오일 팜이 수명을 다하여 재식재되거나 질병 등으로 인하여 생산이 제한되는 경우를 산정하였으며, Table 2에 비추어 발생 최소량과 최대로 구분하였다. 재식재되는 면적은 인도네시아 국가 통계에서 제시하는 훼손된 지역을 기준으로 하였으며, 이를 기준으로 인도네시아에서의 바이오매스 발생량을 환산하였다(Table 4). 산출 결과에 따르면, 2011년 인도네시아에서 훼손되어 재식재되는 면적은 약 86 천 ha로 추산되었으며, Table 2의 기준을 따라 3, 10, 20 그리고 30년생을 기준으로 발생량을 산출하였다. 연간 발생하는 바이오매스가 3 백만 ton에서 16 백만 ton으로 분석되어 바이오매스 자원으로서의 가치가 충분한 것으로 사료되며, 향후 오일 팜 재배면적의 확대에 따른 발생량 증가가 예상된다.

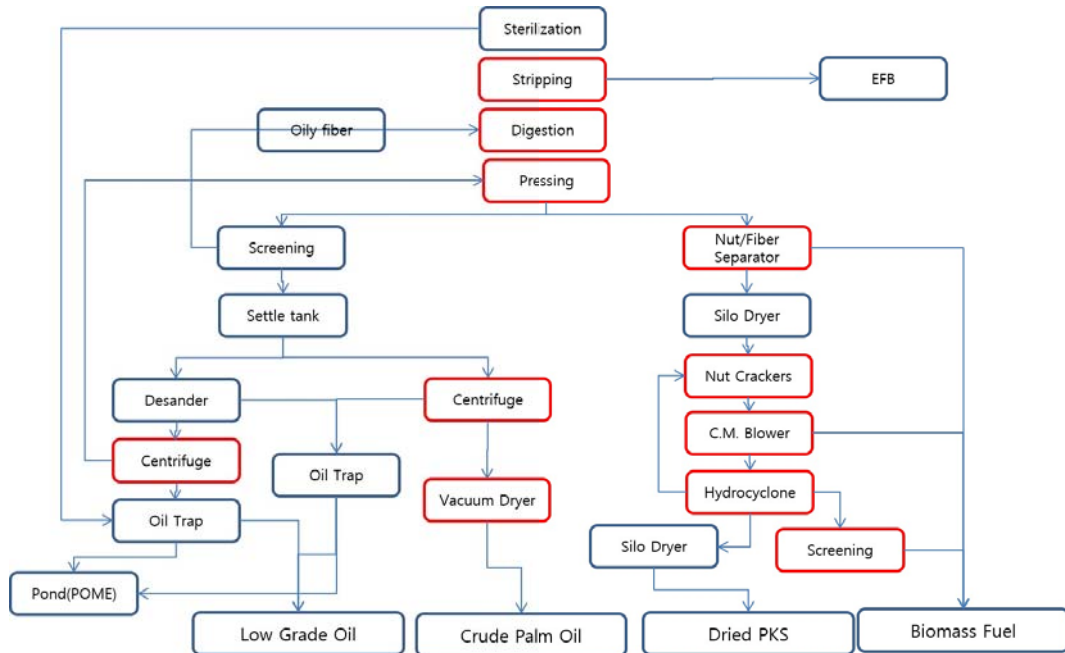


Fig. 4. Scheme of CPO production.

### 3.3. CPO 제조 공정 중 발생하는 바이오매스의 분류

CPO 제조는 농장으로부터 FFB를 수령하면서 시작된다. 일반적인 공정을 간단히 설명하면, 무게측정, 멸균, 분리, 소화, 압착 등을 통해 CPO를 제조한다(Fig. 4). 이 과정에서 CPO와 함께 FFB로부터 부산물이 생산된다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 주요 부산물로는 EFB, PKS, PKOC 및 POME 등이 있다. CPO 제조공정에서 생산되는 부산물은 모두 화학적 처리가 되지 않은 바이오매스이다. CPO 제조공정 중 발생하는 부산물의 생산량에 대하여 바이오매스 에너지 자원으로서의 가치 평가가 최근 활발하게 연구되기 시작하였는데, Table 4와 같이 지역별 및 공정에 따라 유사한 수준의 발생량을 보고하고 있다(Schmidt 2007; Queiroz *et al.* 2012). 이는 FFB로부터 CPO를 생산하는 공정 관련 기술이 어느 정도 안정화되어 있다는 것으로 분석된다. FFB 1 ton이 CPO 생산 설비로 반입되면, 우선 오일 팜 열매로부

터 외피를 제거하는 단계(stripping)가 진행된다. 이 단계에서 EFB가 생산되는데 FFB 무게 대비 22% 정도가 발생한다. 외피로부터 분리된 오일 팜 열매는 고압의 수증기를 이용한 소화(digestion) 단계를 거친 후 압착을 통해 착유를 한다. 압착 후 발생하는 바이오매스 중 오일 성분이 남아 있는 부분은 다시 소화 단계로 돌아간다. 대부분은 PKS와 섬유 분리 공정을 통해 바이오매스로 배출된다. 이 공정에서 PKS가 5% 그리고 섬유가 FFB 무게 대비 12% 발생하게 된다. 채추출된 오일 함유 바이오매스로부터 PKOC가 1.5% 생산되며, 그 부산물인 PKOC가 3.5% 생산된다. 압착, 세척, 멸균 등에 사용된 물은 POME를 구성하는데, 물을 포함하여 생성되는 양이 처리된 FFB의 50~60%에 달하는 것으로 알려져 있다. 결과적으로 CPO 생산 공정에서 최종 생산된 CPO는 생산 설비에 투입된 FFB 무게 대비 20% 수준으로 보고되고 있다(Table 4).

따라서, 수확된 FFB 무게 중 20%의 CPO를 제외하고 다양한 형태의 바이오매스로 구성된 나머지

**Table 5.** Calorific values and moisture contents of oil palm biomass from CPO production

Biomass type	Palm Kernel Cake	Empty Fruit Bunches	Palm Kernel Shell	Fibers	Ref.
Calorific value (MJ/kg, dry basis)	20.1	18.8	20.1	19.1	Chiew, 2008
	20.9	12.8	19.7	18.5	
Moisture contents (wt%)	78.3	59.4	18.9	30.2	Kaewami, 2012

80%는 여전히 이용 가능한 바이오매스 자원으로 분석된다. 특히 이러한 바이오매스는 주기적인 FFB 수확과 CPO 생산 설비의 연중 가동으로 공급의 안정성 확보와 더불어 발생량 예측이 충분히 가능하다는 장점이 있다.

### 3.4. 오일 팜 바이오매스의 함수율 변이와 에너지 특성

바이오매스는 주요 구성성분이 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌이며, 중량의 약 50%가 탄소로 구성되어 있다. 이는 오일 팜 유래 바이오매스에서도 동일하게 적용된다. 따라서 오일 팜 농장 및 CPO 생산과정에서 발생하는 다양한 종류의 오일 팜 바이오매스 유래 바이오매스도 유사한 발열량이 있을 것으로 예상된다.

CPO 공정에서 발생하는 오일 팜 바이오매스의 주요 에너지량은 Table 5에 나타났다. 분석 결과에 따르면 공정 중에 발생하는 바이오매스 자원은 수분 함량에서 크게 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 바이오매스의 수분 함량은 에너지량에 영향을 미치는 주요 인자로서, 함수율 변화는 바이오매스의 이용에 큰 영향을 주게 된다. Kaewmai 등(2012)에 따르면, CPO 공정에서 채취된 바이오매스의 생성 원인에 따라 함수율은 7~80%로 변이가 크다(Table 5). 이는 원료에 따른 공정 차이와 다량의 증기 처리로 인하여 원료의 수분이 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같이 바이오매스가 함유한 수분의 증가는 바이오매스 원료의 열량을 감소시키기 때문에 에너지 자원으로 활용하기 위해서는 건조 공정이 필수적이다. 이

러한 바이오매스를 건조하기 위해서는 다량의 에너지를 투입해야 되기 때문에 개선된 CPO 공정설계가 필요하다. 따라서 바이오매스 고유의 고위발열량은 바이오매스 자원의 이용 가능성과 경제성 측면에서 시사하는 바가 크다. 가장 높은 고위발열량은 PKS에서 20.1 MJ/kg으로 산출되었다. 반면 EFB는 12.8 MJ/kg에서 18.8 MJ/kg으로 처리 및 관리 공정에 따라 발열량 특성에 영향을 미치는 것으로 분석된다. 발생 시점에서의 함수율은 착유 후 PKO 생산공정을 거친 PKOC에서 함수율이 78.3%으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 EFB가 59.4%에 달하는 것으로 보고되었다(Kaewmai *et al.* 2012). 이러한 함수율 변이는 이용 가능한 바이오매스 산출과 에너지 이용 공정에도 영향을 미칠 것으로 사료된다.

### 3.5. 오일 팜 바이오매스의 화학적 특성

일반적으로 바이오매스의 고위발열량은 바이오매스의 탄소, 수소, 산소 함량과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Toscano *et al.* 2013). 오일 팜 바이오매스 부산물이 지니고 있는 화학적 특성을 일부 연구 결과와 문헌조사를 통하여 분석하여 Table 6에 나타내었다. 최근의 관련 연구 결과를 살펴보면, 탄소는 45.9~58.5%까지 구성하는 것으로 분석되었다. 반면 수소는 4.8%에서 12.6%까지 분포하고 있으며, 산소는 22.5%에서 50.2%까지 분포하고 있어 변이가 큰 것으로 분석되었다. 국립산림과학원의 분석 결과에 따르면, 오일 팜 바이오매스 내 연소 특성에 영향을 주는 황 성분은 1.4%, 회분 함량은 10.8%인 것으로 분석되었다. 이러한 연구 결과 간의 변이는



**Table 6.** Elemental analysis and ash content of oil palm biomass residues (Unit: wt%, dry basis)

Elements	KFRI <sup>1)</sup>		Na <i>et al.</i> (2013)		Uemura <i>et al.</i> (2011)		ISO DIS 17225-1 (2012)		Lu <i>et al.</i> (2012)	Average (%)
	Palm Frond (Pellet)	EFB (Pellet)	Mesocarp	EFB	Mesocarp	PKS	Min	Max	OPF	
C	45.9	47.6	48.0	45.5	46.9	46.7	46.3	58.5	51.9	48.6
H	6.0	6.1	5.8	5.5	5.9	5.9	5.9	12.6	4.8	6.5
N	0.3	0.5	2.41	0.45	1.12	1.01	0.04	0.5	2.4	1.0
O	43.3	38.8	22.5	43.4	42.7	36.7	43.0	50.2	40.6	40.1
S	0.19	0.31	ND*	0.04	0.09	0.06	0.03	0.09	0.30	0.1
Ash	4.3	6.6	10.8	5.1	3.3	4.4	1.4	7.4	7	5.6

\* ND : Not Determined

1) KFRI : Korea Forest Research Institute

바이오매스의 활용에 저해 요인이 된다. 따라서 바이오매스 자원의 특성에 맞는 이용 기술 개발을 유도하기 위해서도 관련 기초 자료의 구축은 필요한 것으로 판단된다.

Table 6의 결과에서도 나타난 바와 같이, 오일 팜 바이오매스 부산물의 황 함량은 연구 결과에 따라 0.03%에서 0.31%까지로 변이가 큰 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과의 차이는 바이오매스의 종류, 오일 팜 재배 지역, 시료 채취 방법 및 일부 실험 오차 등으로 인하여 발생할 수 있으나, 가장 큰 요인은 오일 팜 재배 농장 및 CPO 생산설비에서 발생하는 바이오매스 부산물에 대한 품질 관리 여부인 것으로 사료된다. 따라서 향후 고형 바이오연료 자원으로서 오일 팜 바이오매스 부산물을 효율적으로 활용하기 위해서는 자원 발생 현장에서 제품에 대해 철저한 품질 관리가 필요한 것으로 판단된다.

바이오매스 연료의 품질과 관련하여 황, 질소 및 염소 등 대기 오염을 유발하는 유해물질의 함량은 엄격히 제한되고 있다. 이들은 바이오매스 연소 중에 황산화물과 질소산화물의 형태로 대기 중으로 방출되며, 염소의 경우에는 바이오매스 연소 장비의 부식을 유발하여 장비의 내구성 저하를 유발하기도 한다. 이러한 연유로, 국내 목재펠릿 규격에서는 황 함량을 0.05% 미만으로 제한하기 때문에 오일 팜 바이오매스를 이용하여 제조한 펠릿은 국내 목재펠릿 품질규

격을 충족하지 못할 것으로 판단된다(KFRI 2009). 유럽연합의 고형 바이오연료 품질기준에서는 다양한 종류의 바이오매스에 대한 화학적 특성의 변이를 구분하여 품질을 정의하고 있으며, 이러한 기초 자료는 특성이 다른 바이오매스를 적합한 용도로 이용하도록 구분하고 있다.

### 3.6. 인도네시아의 오일 팜 유래 바이오매스 잠재성과 에너지 추정

인도네시아의 오일 팜 재배 및 CPO 생산 설비에서 발생하는 바이오매스의 양과 에너지 잠재성을 분석하였다. 오일 팜 재배 기간 동안 발생하는 바이오매스의 발생량과 에너지 분석은 발생량을 발생 부위에 따라 지하부, 가지 그리고 줄기로 구분하였으며, 결과를 Table 7에 나타냈다. 지하부는 뿌리 부위를 나타내는 것으로, 벌채 후에 오일 팜을 재식재하는 경우에는 뿌리를 제거한 후 경지 정리 단계를 수행하는 것으로 산정하였다. 연간 바이오매스 발생량은 생육 조건 및 벌채 면적에 따라 매년 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 오일 팜 재배 면적 중 훼손 등으로 인하여 오일 팜 생산이 어려운 지역을 대상으로 하였다. 평균 재식재 및 훼손 면적에 대한 근거 자료가 없어 ISPO에서 발표한 2011년 훼손으로 인한 재식재 대상 면적을 기준으로 산정하였다. 실제 오일

**Table 7.** Estimation of oil palm biomass & energy equivalent from damaged plantation area of Indonesia in 2011

Production (ton/ha, wet basis)	Wet basis (ton/ha)		MC <sup>2)</sup> (%)	Dry basis (ton/ha)		Calorific Value <sup>3)</sup> (MJ/kg)	Energy <sup>7)</sup> (TOE, dry basis)		
	Min <sup>1)</sup>	Max <sup>1)</sup>		Min	Max		Min	Max	
Belowground <sup>5)</sup>	10.6	13.3	52.4	50	6.7	26.2	17.5	240,115	946,017
Fronnd <sup>6)</sup>	14.6	7.2	33.9	50	3.6	17.0	15.7	116,617	549,072
Trunk	15.4	13.1	94.3	50	6.6	47.2	17.5	236,504	1,702,470
Total (TOE, dry basis)								593,236	3,197,559

1) Estimation from 3 years (Min) & 30 year (Max)-old oil palm Syahrudin (In: Vlek PLG 2005).

2) Roughly assumed on the basis of common moisture content of fresh cut log

3) Source from Chiew et al (2008), belowground was estimated as same calorific value with trunk of oil palm.

4) 1 TOE = 41.841 MJ

5) Belowground = root + trunk base

6) Fronnd = Fronnd base + Rachis + leaflet

7) Damaged area of oil palm plantation in 2011 was estimated to 86,330 ha based on ISPO report (2012)

팜 플랜테이션에서의 바이오매스 발생량에 대한 체계적인 통계 자료가 없는 상황으로 본 연구에서는 바이오매스 발생량은 Syahrudin (2005)가 수행했던 연구 결과인 3년생과 30년생 오일 팜에서 발생하는 바이오매스 잠재량을 기준으로 최소와 최대로 구분하였다. 바이오매스의 함수율은 환경조건에 따라 상이하지만, 채취 후 대기 조건에서 오일 팜 바이오매스 함수율 관련 자료가 구축되어 있지 않아 일반적으로 인식되는 벌채 직후의 함수율 50%로 가정하였다. 오일 팜 바이오매스의 종류에 따른 단위 발열량은 다른 연구자들의 문헌자료를 준용하였다(Yusoff 2006; Schmidt 2007; Shuit et al. 2009; Abnisa et al. 2011; Uemura et al. 2011; Na et al. 2013). 따라서, 건조기준 오일 팜 바이오매스의 발생량 및 에너지량 산정과 관련된 부분은 심도 있는 연구가 필요하다. 2011년 인도네시아에서 발생한 오일 팜 바이오매스 부산물의 에너지량은 고위발열량으로 산정 시 최소 593 천 TOE에서 3,197 천 TOE에 달하는 것으로 분석되었다(Table 7). 그러나 수분 함량을 고려한 저위발열량 산정이 아니기 때문에 에너지 이용 설비에서 공정 관리에 따라 최대 및 최소 에너지 잠재성은 차이가 발생할 것이 예상된다.

CPO 생산 공정에서 발생하는 바이오매스와 에너지 잠재성은 2011년 인도네시아 FFB 생산량을 기준으로 분석하였다. Sulaiman 등(2011)은 CPO 생산공정 중 발생하는 바이오매스 부산물을 FFB 건조단위 무게 당 EFB 14.6%, Fiber 15.4%, PKS 10.4% 그리고, PKOC 11.4%인 것으로 보고하였으며, 본 연구에서는 이를 준용하였다. 2011년을 기준으로 인도네시아에서는 EFB 13,787 천 ton, Fiber 14,542 천 ton, PKS 9,821 천 ton, PKOC가 10,765 천 ton 발생한 것으로 분석되었다(Table 8). 이들을 합산하면 48,914 천 ton에 달하며, 산술적으로 앞서 Table 3에서 제시된 바와 같이 2011년 기준으로 인도네시아 훼손지에 식재된 오일 팜 재배지역 중 30년생 오일 팜 바이오매스 발생 추정량의 3배에 해당하는 양으로 추정된다. 오일 팜 바이오매스의 고위발열량을 기준으로 발생하는 총 에너지량은 22,722 천 TOE로 추정되며, 저위발열량 기준으로 16,330 천 TOE가 발생하는 것으로 분석되었다. 오일 팜 바이오매스 종류에 따른 생산량은 Fiber와 EFB 순으로 분석되었으나, 저위발열량 기준 바이오매스 에너지는 PKOC와 PKS가 전체 이용 가능한 바이오매스 에너지량의 50% 이상을 구성하고 있는 것으로 분석된다.

**Table 8.** Estimation of energy contents from oil palm biomass residues during CPO production in 2011

Biomass Type <sup>5)</sup>	Proportion <sup>1)</sup> (wt% of FFB, dry basis)	Biomass <sup>2)</sup> (ton/yr, dry basis)	Gross calorific value <sup>3)</sup> (MJ/kg)	Energy Contents of Oil Palm Biomass Residues (TOE/yr, dry basis)	Net calorific value <sup>4)</sup> (MJ/kg)	Total Net Energy (TOE/yr, wet basis)
FFB	-	94,429,029	-	-	-	-
EFB	14.6	13,786,638	18.8	6,194,613	8.0	2,636,006
Fiber	15.4	14,542,071	19.1	6,638,310	14.2	4,935,288
PKS	10.4	9,820,619	20.1	4,717,728	16.6	3,896,233
PKOC	11.4	10,764,909	20.1	5,171,355	18.9	4,862,618
Total	-	48,914,237	-	22,722,006	-	16,330,144

1) Sulaiman *et al.* 2011

2) Estimated on the basis of Sulaiman *et al.* 2011 and ISPO 2012

3) From Table 5.

4) Kaewmai *et al.* 2012 and Sumathi *et al.* 2008

5) FFB (Fresh Fruit Bunch), EFB (Empty Fruit Bunch), PKS (Palm Kernel Shell), PKOC (Palm Kernel Oil Cake)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 오일 팜 재배와 CPO 생산량을 기준으로 인도네시아에서 발생하는 오일 팜 바이오매스 잠재성을 추정하였다. 오일 팜 재배기간 동안에 오일 팜의 가지, 줄기, 뿌리로부터 2011년 기준으로 약 3.0 백만 ton에서 16.1 백만 ton의 바이오매스 발생이 추정되며, 함수율을 제외한 에너지량은 593 천 TOE에서 3,197 천 TOE로 추정되었다. CPO 제조공정에서는 FFB로부터 건조 중량 기준 48,914 천 ton이 발생하는 것으로 추정되며, 에너지량은 고위발열량 기준 22,722 천 TOE로 저위발열량 기준으로 16,330 천 TOE가 발생하는 것으로 추정되었다. 따라서 고위발열량 기준으로 25,919 천 TOE의 에너지가 2011년 기준의 오일 팜 바이오매스 부산물 이용 생산가능한 것으로 분석되었다. 이러한 에너지 양은 2011년 우리나라 1차 에너지 소비량인 275,688 천 TOE의 9.4%에 해당하는 양이며, 같은 해 신재생에너지 총 공급량인 7,582 천 TOE의 36배에 달하는 양이다(KEEI 2012). 또한 인도네시아의 오일 팜 재배면적 확대는 바이오매스의 에너지 자원으로서의

가능성을 확대하는 역할을 하고 있다. 오일 팜 플랜테이션 및 CPO 생산공정에서 발생하는 바이오매스는 함수율, 화학조성 등 물리·화학적으로 다양성이 큰 것으로 분석되었다. 이와 같이 다양한 특성을 지닌 바이오매스의 효율적 활용을 위해서는 바이오매스의 특성에 맞춘 공정 최적화 기술 개발 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 산림청 임업기술개발의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### REFERENCES

Abnisa, F., Daud W.M.A.W., Husin, W.N.W., Sahu, J.N. 2011. Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass and Bioenergy* 35(5): 1863~1872.

- Aholoukpè, H., et al. 2013. Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass. *Forest Ecology and Management* 292(0): 122~129.
- Brockhaus, M., Obidzinski, K., Dermawan, A., Laumonier, Y., Luttrell, C. 2012. An overview of forest and land allocation policies in Indonesia: Is the current framework sufficient to meet the needs of REDD+? *Forest Policy and Economics* 18(0): 30~37.
- Chiew, Y.L., Shimada, S. 2013. Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer - A case study of Malaysia. *Biomass and Bioenergy* 51(0): 109~124.
- Corley, R.H.V. 2009. How much palm oil do we need? *Environmental Science & Policy* 12(2): 134~139.
- De Souza, S.P., Pacca S., de Ávila M.T., Borges J.L.B. 2010. Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renewable Energy* 35(11): 2552~2561.
- Corley, R.H.V., Hardon, J.J., Tan, G.Y. 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica* 20(2): 307~315.
- Dermawan, A., Obidzinski, K., Komarudin, H. 2011. Withering before full bloom?: Bioenergy development in Southeast Asia. Bogor, Indonesia, Center for International Forestry Research (CIFOR).
- European Council. 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- Hassan, M.N.A., Jaramillo, P., Griffin, W.M. 2011. Life cycle GHG emissions from Malaysian oil palm bioenergy development: The impact on transportation sector's energy security. *Energy Policy* 39(5): 2615~2625.
- Hassan, M.A., Yacob, S., Shirai, Y., Busu, Z. 2008. Reduction of greenhouse gases emission from palm oil industry and clean development mechanism business in Malaysia. *Journal of Biotechnology* 136, Supplement(0): S14.
- ISPO. 2012. Indonesian Palm Oil Numbers in 2012. M. o. A. R. o. Indonesia. Building D. 2nd Floor Jl. Harsono RM No. 3 Ragunan, Jakarta 12550, Indonesia, Directorate General of Processing and Marketing of Agriculture Products: 1~21.
- Kaewmai, R., H-Kittikun, A., Musikavong, C. 2012. Greenhouse gas emissions of palm oil mills in Thailand. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 11(0): 141~151.
- KEEL. 2012. Yearbook of Energy Statistics. Korea Energy Economics Institute.
- KFRI. 2009. Standard for the quality of wood pellets.
- Lee, S.M. et al. 2013. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass and Bioenergy* 48(0): 1~9.
- Mundindex. 2012. <http://www.mundindex.com>
- Na, B.-I., Kim, Y.-H., Lim, W.-S., Lee, S.M., Lee, H.-W., Lee, J.-W. 2013. Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. *Biomass and Bioenergy* 52(0): 159~165.
- Prasertsan, S., Prasertsan, P. 1996. Biomass residues from palm oil mills in Thailand: An overview on quantity and potential usage. *Biomass and Bioenergy* 11(5): 387~395.
- Pehnelt, G., Vietze, C. 2012. Recalculating GHG emissions saving of palm oil biodiesel. *Environ Dev Sustain*: 1~51.

- Queiroz, A.G., França, L., Ponte, M.X. 2012. The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass and Bioenergy* 36(0): 50~59.
- Schmidt, J.H. 2007. Life Cycle Assessment of Rapeseed Oil and Palm Oil. Part 3: Life Cycle Inventory of Rapeseed oil and Palm oil. Ph.D. Thesis. Department of Development and Planning, Aalborg University.
- Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., Kochubabu, M. 2011. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products* 33(1): 7~22.
- Shuit, S.H., Tan, K.T., Lee, K.T., Kamaruddin, A.H. 2009. Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. *Energy* 34(9): 1225~1235.
- Singh, R.P., Embrandiri, A., Ibrahim, M.H., Esa, N. 2011. Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling* 55(4): 423~434.
- Slette, J.P., Wiyono, I. 2012. Indonesia Biofuels Annual. Global Agricultural Information Network. Jakarta, Indonesia.
- Somporn Pleanjai, S.H.G. 2009. Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied Energy* 86: S209~S214.
- Souza, S.P., De Ávila, M.T., Pacca, S. 2012. Life cycle assessment of sugarcane ethanol and palm oil biodiesel joint production. *Biomass and Bioenergy* 44(0): 70~79.
- Syahrinudin, D.M., Martius, C., Rodgers, C., Van de Giesen, N., editors. 2005. The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia. Ecology and development series no. 28.
- Sulaiman, F., Abdullah, N., Gerhauser, H., Shariff, A. 2011. An outlook of Malaysian energy, oil palm industry and its utilization of wastes as useful resources. *Biomass and Bioenergy* 35(9): 3775~3786.
- Sumathi, S., Chai, S.P., Mohamed, A.R. 2008. Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(9): 2404~2421.
- Sung, Y.J., Kim, C.-H., Cho, H.-S., Sim, S.-W., Lee, G.-S., Cho, I.-J., Kim, S.-B. 2013. Study of oil palm biomass resources (Part I) – Characteristics of thermal decomposition of oil palm biomass-. *Journal of Korea TAPPI* 45(1): 13~20.
- Toscano, G., Riva, G., Foppa Pedretti, E., Duca, D. 2013. Effect of the carbon oxidation state of biomass compounds on the relationship between GCV and carbon content. *Biomass and Bioenergy* 48(0): 231~238.
- Uemura, Y., Omar, W.N., Tsutsui, T., Yusup, S.B. 2011. Torrefaction of oil palm wastes. *Fuel* 90(8): 2585~2591.
- Yusoff, S. 2006. Renewable energy from palm oil – innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production* 14(1): 87~93.