

바이오매스 자원의 복합이용을 고려한 미래 농업



홍 성 구

한경대학교 지역자원시스템공학과

1. 서 론

바이오매스는 매우 광범위한 의미를 가지는 용어로서 생물계로부터 유래되는 물질을 의미하며, 본질적으로 식물의 광합성에 의해 저장된 태양에너지라고 볼 수 있다. 바이오매스에는 나무, 작물, 조류 등 각종 식물계와 농업부산물 등이 포함되며, 또한 현대 사회에서 식품제조업에서 발생하는 폐기물로부터 하수처리장 슬러지, 분뇨, 산업계나 가정으로부터 배출되는 유기성 폐기물이 모두 포함된다. 국내의 대표적인 바이오매스 자원을 살펴보면 연간 음식물폐기물류가 430만톤, 폐지 및 폐목류 540만톤, 축산분뇨 4,684만톤, 하수처리장 슬러지 169만톤, 제지슬러지 68만톤, 농업부산물 1,185만톤, 임업부산물 1,200만톤으로 추정되고 있다(과학기술부, 2000). 이들을 에너지로 이용할 때 총 보급 잠재량은 연간 총 231.6만TOE 수준으로 추정하고 있다.

농촌지역에서 발생하는 바이오매스 자원은 농업부산물, 축산분뇨, 숲가꾸기 부산물 등이 대표적이다. 이들은 특정 시기에 집중적으로 발생하는 특징을 보인다. 반면에 주거 지역의 음식물폐기물은 연간 일정하게 지속적으로 배출된다. 국내의 바이오매스 자원은 상당량이 재이용되고 있으나 보다 효율적인 관리와 이용을 위해서는 연구 개발 및 사업화, 그리고 이를 위한 정책적 지원이 절실하다. 일부 바이오매스는 이미 여러 가지 용도로 활용되고 있다. 농업부

산물로서 단일 종류로는 가장 많은 양을 차지하고 있는 볏짚은 대부분이 축산농가의 조사료로 공급되고 있으며, RPC에서 발생하는 왕겨도 다양한 수요처에 판매되고 있다. 처리시설의 분포에서 알 수 있듯이 축산분뇨의 대부분은 퇴비화를 통해 농지로 환원되고 있으며, 음식물폐기물은 일부 사료로 이용되고 나머지는 대부분 퇴비화되고 있는 실정이다. 최근에는 바이오가스 시설이 시범적으로 도입되어 운영되기 시작하였으며, 바이오에너지 생산이 가능하다는 이점으로 앞으로 설치 사례는 증가할 것으로 예상된다. 한편 미활용 바이오매스를 발굴하여 활용하는 것도 중요하다. 과수 전지목은 농가의 땀감으로 이용되거나, 주변에 폐기되어 방치되고 있다. 발작물 부산물은 적지 않은 양이 농지에서 소각되고 있으므로 관리가 필요하다. 목질계 바이오매스로서 숲가꾸기 산물은 고용 제고를 위하여 정부차원에서 추진되고 있으나, 바이오매스의 효율적 관리와 이용을 위해서는 개선할 여지가 있다.

유럽을 중심으로 선진국에서는 온실가스 감축에 대한 절박함과 유가 급등으로 인해 바이오매스의 이용은 부산물이나 폐기물계 바이오매스의 효과적인 활용 수준에 머무르지 않고 더 나아가 적극적으로 에너지작물의 재배를 통해 바이오매스 생산량을 늘리기 위한 노력을 경주하고 있다. 식량생산에 부정적인 영향을 초래하지 않는 범위 내에서 에너지 작물 재배 면적을 늘리고 있으며, 단위 면적당 생산량이 많은 작물을 선발하여 재배하고 있다. 대량 생산된 바이

오매스는 석유화학계통 합성원료를 대체하는 기초물질로서 이용되고 있고, 상당량은 자동차 운송용 연료와 전력생산 또는 열병합시설을 가동하는데 쓰이고 있다. 전 세계의 에너지공급량의 14% 정도는 바이오매스에 의한 것이다 (Gielen, et al., 2001). 근대 산업화 이래로 저렴하고 편리한 화석연료의 보급으로 바이오매스 이용량은 꾸준히 감소하였으나, 반전되어 최근에 이르러 점차 증가하고 있다.

앞으로의 농업과 농촌 또한 이러한 상황에 적극적으로 대응하고 움직여 나아가야 할 것이다. 시설물 중심의 농업 생산시설에 제한되었던 농공분야는 바이오매스 부문에 대한 이해를 통해 변화하는 산업과 사회적 요구에 능동적으로 변해야 한다. 따라서 본 고에서는 바이오매스 자원을 이용하는데 있어서 에너지 생산뿐만 아니라 각종 제품생산에 이용되는 기초물질의 생산 가능성을 살펴보고, 연속적이고 복합적인 이용체계를 고찰해 보았다. 자원의 접근성이 유리한 농촌지역은 바이오매스 자원을 복합적으로 활용하는데 있어서 핵심 기능을 담당하게 될 것이다.

2. 바이오매스 자원의 종류와 특성

바이오매스 자원은 발생원의 종류, 이화학적 특성, 생물학적 분해가능성 등 여러 가지 기준에 의해 분류가 가능하다. 발생원의 종류에 따라서 농업부산물, 축산분뇨, 음식물

쓰레기, 에너지작물 등으로 분류할 수 있다. 농업부산물은 이화학적 조성에 따라서 전처리공정을 거쳐 유효한 물질을 회수할 수 있고, 변환공정을 거쳐 부가가치가 있는 제품이 생산되기도 한다. 축산분뇨는 그 자체가 가지고 있는 비료성분을 활용하기 위해 퇴비화 또는 소화과정의 안정화 과정을 거친 후 농지로 환원하고 있다.

Fig. 1에서는 발생배경을 근거로 바이오매스를 분류하는 예를 보여주고 있다(Hirayama, 2006). 수확을 목적으로 재배 또는 생산되는 바이오매스와 부수적으로 얻어지는 부산물 바이오매스로 크게 나눌 수 있다. 석유화학공업이 주도해 왔던 지금까지는 식량이나 농산물의 생산과 목질계 바이오매스가 중심이 되어 왔으나, 앞으로는 에너지작물 및 다양한 부산물 바이오매스가 유용한 자원으로 활용될 것이다. 부산물 바이오매스는 농업, 축산 그리고 수산 부문뿐만 아니라 폐기물계로 분류되는 음식물쓰레기, 식품가공 산업 폐기물, 하수처리장 슬러지도 포함된다.

바이오매스의 이화학적 성질 가운데 함수비는 바이오매스 자원의 이용방식과 밀접한 관계를 가진다. 함수비가 높은 바이오매스는 습식 공정에 적합하며, 목질계 바이오매스와 같이 함수비가 상대적으로 낮으면 열화학적 공정과 같은 건식공정이 유리하다. 함수비가 높은 바이오매스를 건식공정에 적용하기 위해서는 건조되어야 하며 이 때 많

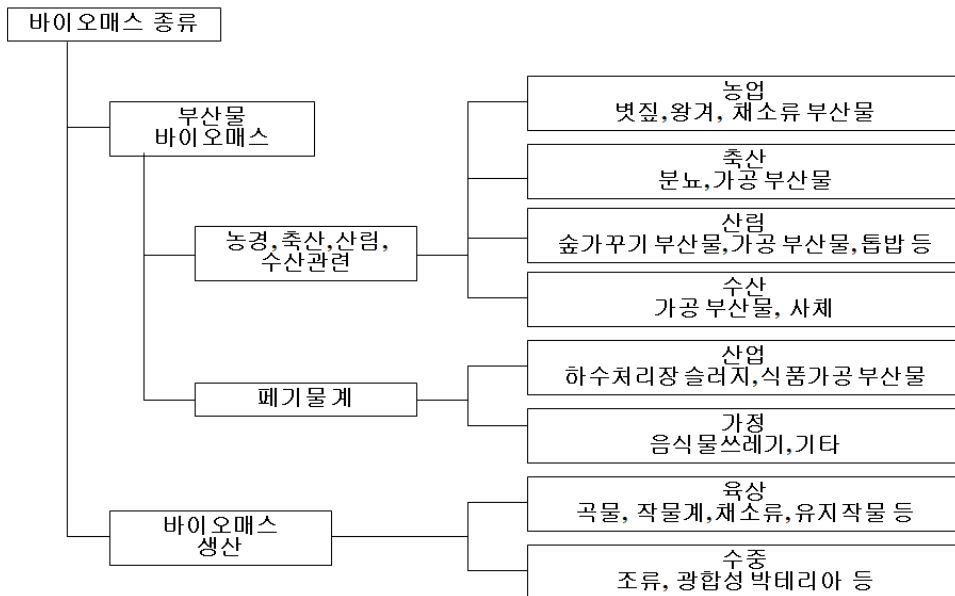


Fig. 1 Types of Biomass (Hirayama, 2006)

은 양의 에너지가 소비되어야 하기 때문이다. 따라서 바이오매스 활용 계획을 수립할 때에는 대상 지역에서 가용한 바이오매스 고유의 화학적 조성뿐 만 아니라 발생원에서의 물리적 특성까지도 충분히 고려해야 할 것이다.

지구상에 부존량이 가장 많은 바이오매스는 목질계를 포함한 식물계이다. 식물계 바이오매스는 조성 물질에 따라 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 용해성 물질, 회분 등으로 분류할 수 있다. 셀룰로오스는 녹색식물의 세포벽을 구성하는 성분으로서 지구상에서 가장 보편적인 유기화합물이다. 목질계 펄프와 목화로부터 얻어지는 셀룰로오스는 종이나 의복 등을 생산하는데 이용되어 왔다. Fig. 2는 주요 바이오매스의 종류별 구성 성분 비율을 나타내고 있다. 대체로 셀룰로오스가 40% 내외로 가장 많고, 그 다음이 30% 수준의 헤미셀룰로오스, 리그닌은 10~20%를 차지한다(Paully and Keegstra, 2008). 나머지는 회분과 용해성 성분으로 구성된다. 회분은 규소 함량이 높은 벚짚이 가장 많이 나타난다. 헤미셀룰로오스는 가수분해하여 자일로오스 등의 5탄당이 얻어지는데, 그 조성은 바이오매스 종류에 따라 크게 다르다. 대체로 자일로오스가 대부분을 차지하고 있으나 침엽수는 육탄당의 하나인 mannose가 상대적으로 높다.

셀룰로오스를 가수분해하는데 어려운 점은 결정질 구조이며 리그닌이 존재한다는 것이다. 이 때문에 산 또는 효소에 의한 가수분해가 어렵게 된다. 셀룰로오스로부터 당을 얻기 위해서는 이러한 장애요인을 극복해야 한다. 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스와 함께 거의 모든 식물의 세포벽에 존재하는 2종류 이상의 종류로 구성되는 중합체(polymer)

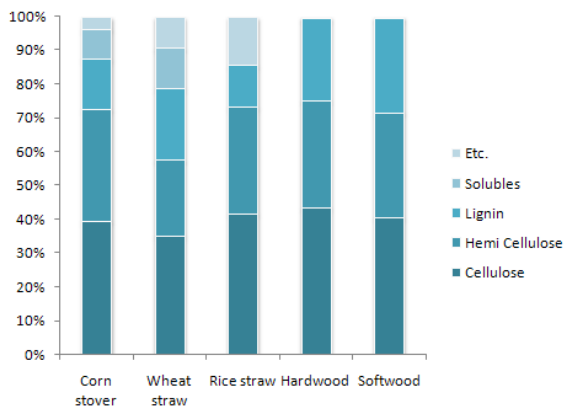


Fig. 2 Comparison of biomass feedstock

이다. 헤미셀룰로오스는 임의성 비결정질 구조로서 강도는 거의 없다. 산이나 염기에 의해서 가수분해할 수 있다. 반추동물은 장내에서 공생하는 미생물의 도움으로 셀룰로오스를 분해하여 직접 이용할 수 있다.

음식물쓰레기는 이분해성 유기물을 다량 포함하여 부패하기 쉽기 때문에 신속하게 처리 또는 변환하여야 한다. 음식물쓰레기는 발생원에 따라 그 조성의 차이가 있으나 탄소소가 30~40%, 질소가 3~3%, 탄질비가 10 내외이며 비료성분인 인과 칼륨은 1% 내외를 차지하고 있다(배재근, 2002). 국내에서 음식물쓰레기 처리를 위한 정책이 자리잡으면서 자원화 비율이 높아진 것은 바람직하다. 축산 분뇨의 처리도 마찬가지로 보다 효율적이고 체계적인 관리를 통해서 자원 회수율을 극대화하고 농지환원 단계까지 순환 이용을 위한 기술적, 제도적 지원이 요구된다.

3. 에너지와 원료물질의 생산

가. 생물정제(Biorefinery)

정제(refinery)는 원료를 가치가 있는 상품으로 변환하는 일련의 공정을 일컫는다. 원유정제는 원유를 옥탄가가 높은 휘발유, 경유, 액화석유가스(LPG), 제트유, 등유, 중유, 윤활유, 아스팔트 등 다양한 제품을 만드는 것이다. 유사하게 사탕정제는 사탕수수나 사탕무로부터 설탕이나 시럽을 만드는 공정이다. 이에 반해 생물정제(biorefinery)는 최근에 만들어진 용어로서 바이오매스로부터 생물계 물질(식품, 사료, 원료, 화학물질)과 연료를 생산하는 일련의 생산 공정으로 말할 수 있다. 생물정제시설은 바이오매스로부터 연료, 전력, 그리고 부가가치의 물질을 생산하기 위한 장비 및 공정이 통합된 설비라고 할 수 있다. Fig. 3는 미국 국립재생에너지(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 정의하고 있는 생물정제의 개념도이다. 여기에서는 생물정제 공정을 열화학적 공정과 생물화학적 공정의 2가지로 구분하고 있다. 생물화학적 공정은 그림에서와 같이 당을 대상으로 하는 것뿐 만 아니라 더 넓게는 혐기성 소화과정도 포함할 수 있다. 열화학적 공정에서는 가연성 합성가스 이외에 열분해유 등이 포함될 수 있다. 열화학적 공정은 기존의 석유화학공업에서 적용되어 왔던 각종 합성공정이 적용될 수 있다.

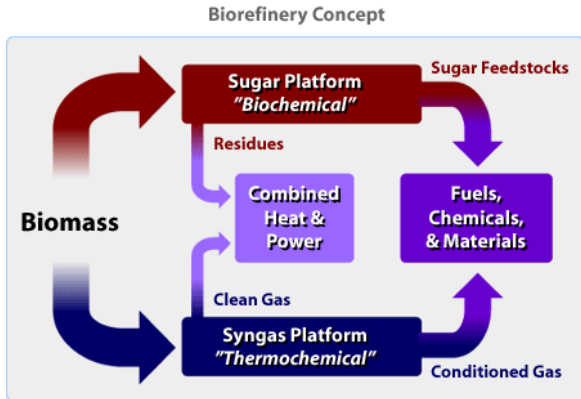


Fig. 3 Biorefinery concept using biomass (NREL, 2007)

나. 에너지 (Bioenergy)

1) 바이오 연료

바이오정제공정에서 초기 단계에서는 유용한 화합물을 추출해 내고, 그 이후에는 바이오연료 생산공정을 연계하는 것이 필요하다. 현재 바이오에탄올은 미국을 중심으로 옥수수 유래 전분을 이용하는 방식과 브라질을 중심으로 당을 이용하는 방식으로 생산되고 있다. 현재는 옥수수 가지나 목재, 기타 저가의 농업부산물을 이용하여 알코올을 생산하는 방법이 탐색되고 있다. 이들의 주 성분은 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 함량이 많기 때문에 효과적인 탈중

합공정이 가장 큰 과제로 남아 있다.

최근에는 분해효소인 셀룰라아제 처리 공정을 발효공정과 결합하는 등의 연구에서부터 유전공학을 이용하여 식물 자체가 분해효소를 생산할 수 있도록 유도하는 등의 연구까지 다양하게 진행되고 있다. 바이오연료를 생산하고 남은 부산물로서 리그닌이나 미반응 유기물이 잔류하므로 이를 에너지로 활용하는 것이 바람직하다. 제지공장과 같이 리그닌이 대량으로 발생되는 곳에서는 소각하여 전기를 생산하거나 열을 이용하거나, 열화학공정을 거쳐 연료용 가스로 변환할 수 있다. 열화학공정에서 생산되는 저열량 가스는 암모니아, 메탄올, Fischer-Tropsch 합성유 등을 생산하는데 필요한 원료로 이용된다. 합성가스는 바이오매스 뿐만 아니라 석탄, 천연가스를 이용하여 생산할 수도 있다.

합성가스를 혐기성 발효하여 바이오연료를 생산하는 공정은 새롭게 조명되는 기술이다. 혐기성 발효공정은 합성가스 중에 있는 타르나 분진 등에 크게 영향을 받지 않는다. 아직까지 성숙단계에 이르지 않았기 때문에 상용화되기 위해서는 미생물 균주 확보, 반응조 설계, 바이오연료의 분리 등에 대한 요소기술이 확보되어야 한다. 바이오매스를 이용한 바이오연료 및 에너지 생산 방식의 종류와 경로를 Fig. 4에서 정리하였다.

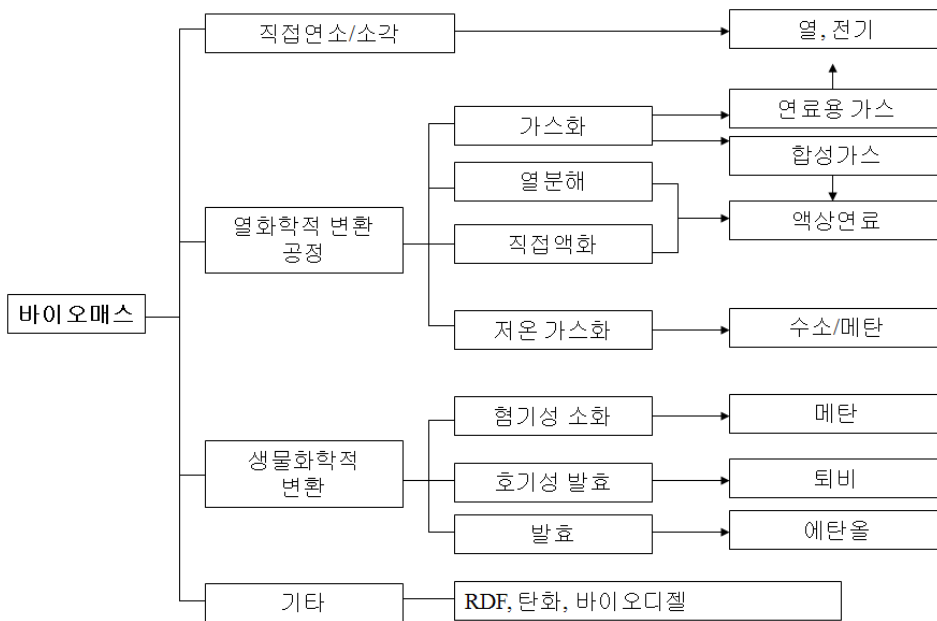


Fig. 4 Energy production alternatives using biomass(Hirayama, 2006)

2) 원료물질 (Biomaterial/Biochemical)

석유화학산업에서 원료로부터 얻어지는 탄화수소 대신 산소작용기를 가진 생물계 바이오매스를 이용하게 되면 공정을 보다 효율적으로 개선할 수 있다. 예를 들어 화학원료로서 탄수화물을 이용하면 기존의 석유화학산업이 적용하는 고비용의 산화공정이 필요 없다. 탄수화물은 알코올, 카르복시산, 그리고 에스테르와 같은 제품을 생산하는 공정에 이용할 수 있다. 석유화학계 원료물질에 특정 작용기를 붙이기 위한 촉매의 이용이 필요 없게 되고, 합성공정을 단순화 할 수 있다. 바이오재료는 이미 용매, 플라스틱, 운할제, 향료 등의 분야에서 상용화되기 시작하였다. 최근 수요가 증가하고 있는 친환경 바이오 플라스틱(Polylactic acid)은 전분으로부터 포도당을 만들고 이것을 발효시켜 제조한 젖산으로부터 만들어진다. 자연환경에서 100%분해되기 때문에 환경수지라고 부른다. 바이오플라스틱은 식품포장이나 의류분야에서 이용되고 있다. 또 다른 예로서 탄수화물을 발효하여 얻어지는 1,3-propanediol은 고분자 섬유를 만드는데 이용된다(Ragauskas, et al., 2006).

기존의 화학공정에서 분리, 정제, 변환 등의 공정 가운데 분리공정이 전체 비용의 60-80%를 차지한다. 석유화학기반 공정에서 바이오매스 기반 공정으로 바뀌어도 분리공정의 중요성은 바뀌지 않을 것이다. 즉, 석유화학공정에서는 분리단위공정이 주축이 되나 바이오매스 공정에서는 용매를 기반으로 한 추출공정이 중심이 될 것이다. 대부분의 바이오매스 구성성분은 비휘발성이므로 다른 공정으로는 경제성을 갖추지 못하기 때문이다.

앞으로의 바이오정제기술에서는 먼저 바이오매스 내에 이미 존재하는 향료와 같은 고부가 화합물, 식품관련 제품, 고부가 건강보조식품 등을 추출하는 공정으로 시작될 것이다. 그 다음으로 리그닌이나 셀룰로오스를 처리하여 바이오연료를 생산할 수 있는 원료로 만드는 공정이 연결되는 방식으로 단계별 활용이 바람직하다. 여기에서는 혁신적인 분리 및 탈중합을 위한 화학공정이 필요로 하는데, 초임계 CO₂, 근임계수 등이 적합한 것으로 평가되고 있다. 상온에서의 물은 여러 가지 기질을 용해시키지 못하지만, 근임계 조건에서는 아세톤과 견줄만큼 비극성 유기물과 무기염을 용해할 수 있는 능력을 갖는다. 이외에 산 또는 염기 촉매

로서의 기능 등은 바이오매스 활용을 위한 공정에서 도입 가능성을 높여주고 있다.

바이오정제과정에서 당은 발효나 효소 및 화학적 변환공정에 의해 원료물질로 변환되는데, 주요 원료물질에는 에탄올, 탄소가 3개에서 6개를 가지는 카르복시산, 글리세롤, 소르비톨 등이 있다. 이들을 생산하기 위한 공정은 기존의 석유화학공정과 가격 경쟁력을 가진다.

셀룰로오스는 가수분해하여 글루코오스를 얻을 수 있고 글루코오스는 효모나 세균에 의하여 당으로 분해하여 에탄올을 생산할 수 있다. 다시 글루코오스는 환원과정을 거쳐 감미료로 이용되는 솔비톨(sorbitol), 탈수하여 하이드록시메틸 푸르푸랄(Hydroxymethyl Furfural, HMF)을 얻을 수 있다. 또한 셀룰로오스를 이성화하여 식용으로 이용이 가능한 과당을 생산하기도 한다. 셀룰로오스는 그 자체가 고분자 재료로서 종이 뿐 만 아니라 레이온, 셀로판, 셀룰로이드 등을 생산하는데 활용되기도 한다.

헤미셀룰로오스는 가수분해하여 글루코오스, 자일로스(xylose), 만노스(mannose), 갈락토오스(galactose), 아라비노스(arabinose), 우론산(uronic acid) 등을 얻을 수 있다. 이들은 추가의 반응공정을 거쳐 플라스틱 제조원료, 감미료, 식품첨가물, 계면활성제, 필터, 약품원료 등을 생산할 수 있다.

최근 리그닌을 직접 처리하여 연료생산을 위한 가능성을 모색하고 있지만, 대체로 펄프제조 폐액 중에 남아 있는 리그닌이 대체로 제품생산이 이루어져 왔다. 리그닌을 분해하여 벤젠이나 페놀을 얻을 수 있으며 산화처리하여 바닐린산, 나트륨처리를 통해 용제로 이용되는 디메틸설폭사이드(Dimethyl Sulfoxide, DMSO)를 얻을 수 있다. 리그닌을 이용하기 위해 농도가 높은 황산을 이용한 가수분해는 다른 유효물질까지도 변질되는 문제가 남아 있다.

셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 등을 변환하여 이용하는 방법 이외에 식물계 바이오매스 자체가 가지고 있는 유효성분을 이용하기도 한다. 이들 유효성분들은 세포벽에서 유리한 저분자 물질의 종류로서 유기용매 또는 물에 녹여 추출한다. 활용 가능성이 높지만 분리하여 농축하는 기술적 문제가 남아 있어 아직까지 경제적인 타당성을 갖지 못하는 경우가 많다. 목재로부터 얻을 수 있는 대표적인 추출물에는 Turpentine, Tall oil, 탄닌(Tannin), 라

텍스(Latex), 올레오레진(Oleoresin), 우리가 종종 접하는 옷 등이 있다. Turpentine은 도료의 용제로 이용되며, 산처리하여 방향제나 방부제 등으로 이용되는 합성 피네올을 얻을 수 있다. Tall oil은 도료의 원료로 이용되고 있으며, 원료에 따라 큰 차이가 있으나 수지산이 40-60%, 지방산이 40-45% 정도 차지하고 있다. 탄닌은 접착제나 도료로 이용되고 있고, 라텍스는 천연탄성고무로 이용되고 있다. 올레오레진은 발삼이라고도 불리며 향료의 원료나 의약품으로 이용되고 있다(황병호 외, 1998).

4. 바이오매스의 복합이용

가. 복합이용의 개념

바이오매스의 복합적 이용(multi-functional)은 여러 가지 다양한 용도로 이용한다는 의미와, 순차적으로(cascading) 이용하는 것을 의미한다. 어쩌면 바이오매스의 복합적 이용은 역사적으로 오랫동안 동양에서 적용되어 왔던 자연자원의 이용방식으로도 볼 수 있다. 벼를 예로 들어보자. 논농사의 주 목적은 쌀을 생산하기 위한 것이다. 그러나 전통적으로 수확 후, 벼짚과 왕겨를 다양한 목적으로 활용해 왔다. 벼짚은 새끼줄이나 가마니, 땀감에서 조사료, 심지어 익년 여름에 이용할 수 있도록 겨울에 얼음을 저장하기 위한 단열재료로도 이용되었다. 왕겨는 충전제로 다양하게 이용되었음을 우리는 기억한다. 왕겨가 채워진 사과 껍질이나 베개가 그 예이다.

바이오매스의 순차적 혹은 단계별 활용(cascading)은 순환이용과 유사한 개념으로 설명할 수 있다. 음식물쓰레기의 처리과정을 예로 들어보자. 음식물쓰레기는 비교적 신선한 상태에서 수집되면 증자 등의 과정을 거쳐 사료로 공급할 수 있다. 그 이후에 발생하는 분뇨는 혐기성 소화과정을 거쳐 바이오가스가 생산되고, 소화액은 농지로 환원된다. 사실 과거에는 가정에서 먹고 남은 음식물은 키우는 개나 닭에게 주고 이들로부터 배출되어 흙과 혼합된 분뇨는 주위의 논밭에 던져져 환원된 것을 우리는 잘 알고 있다. 대량생산으로 인한 폐기물 다량 배출과 그리고 그 폐기물을 수용할 수 있던 주거지역 주변 농지가 사라져 감에 따라서 과거 선조들이 터득하여 물려주었던 지혜는 잠시 잊혀졌다.

생명공학을 포함한 현대 과학기술의 발달로 바이오매스의 복합적 이용은 더욱 효과적으로 추진할 수 있다. 앞에서 기술된 바와 같이 원유에 의존했던 석유화학 관련 산업분야의 원료를 바이오매스로부터 생산하는 것이다. 목질계, 농업부산물, 또는 에너지 작물 등의 바이오매스로부터 각종 유효 성분의 추출과 이용, 그리고 나머지 잔류물을 이용한 에너지 생산, 최종 부산물의 농지환원 등이 종합적으로 추진될 수 있다. 이를 위해서는 바이오매스 자원의 효과적 이용을 위한 통합적 정책이 수립되어야 하고, 이를 근거로 관련 시설의 구축과 운영이 이루어져야 한다. 2002년 일본 각료회의에서 결정된 바이오매스 종합전략은 유사한 개념을 구체적으로 명시하고 있다. 일본의 전략의 추진 배경은 지구온난화의 방지, 자원순환형 사회의 창출, 경쟁력 있는 신규 산업의 창출, 그리고 농림수산업 및 농어촌의 활성화에 두고 있다. 주요 선진국에서도 유사한 정책을 추진하고 있다. Schell 등(2008)은 미국에서 바이오매스 산업 개발을 위한 방향을 정리하여 제시하면서 바이오연료와 물질생산의 생산 등 복합적 활용 방안을 제시한 바 있다. 그는 옥수수를 대상으로 예를 들면서 에탄올을 생산하는 것뿐 만 아니라 중간 과정에서 사료, 섬유질, 식용유 등 다양한 제품을 생산하고 잔류 부산물을 생산 공정에서 재이용하여야 함을 강조하고 있다. Fig 5에서는 바이오매스를 이용한 에탄올 합성과 제품생산에 적용한 복합공정도를 보여주고 있다.

나. 도농 연계 순환이용

농촌지역에서 생산되는 농산물은 도시에서 소비되어 분뇨, 하수처리장 슬러지, 그리고 음식물폐기물의 형태로 배출된다. 도농 연계에 기초한 바이오매스 순환이용의 예로서 음식물폐기물의 처분을 생각해 볼 수 있다. 음식물폐기물 먼저 발생원으로부터의 수집되고, 안정화 과정을 거쳐, 농지로 환원된다. 퇴비화나 혐기성 소화공정이 안정화에 속한다. 안정화 전단계에서 사료로서 활용하는 방법도 고려할 수 있다. 가축사료로 이용된 후에는 분뇨의 형태로 다시 배출된다. 가축분뇨는 역시 안정화 과정을 거쳐 농지에 환원할 수 있다. 안정화 공정을 혐기성 액비화 또는 소화공정으로 택하면 부수적으로 바이오가스를 생산할 수 있다.

바이오가스 생산을 고려한 도농연계 순환이용시스템의 주요 시설은 소화시설, 바이오가스 정제 또는 활용설비, 액

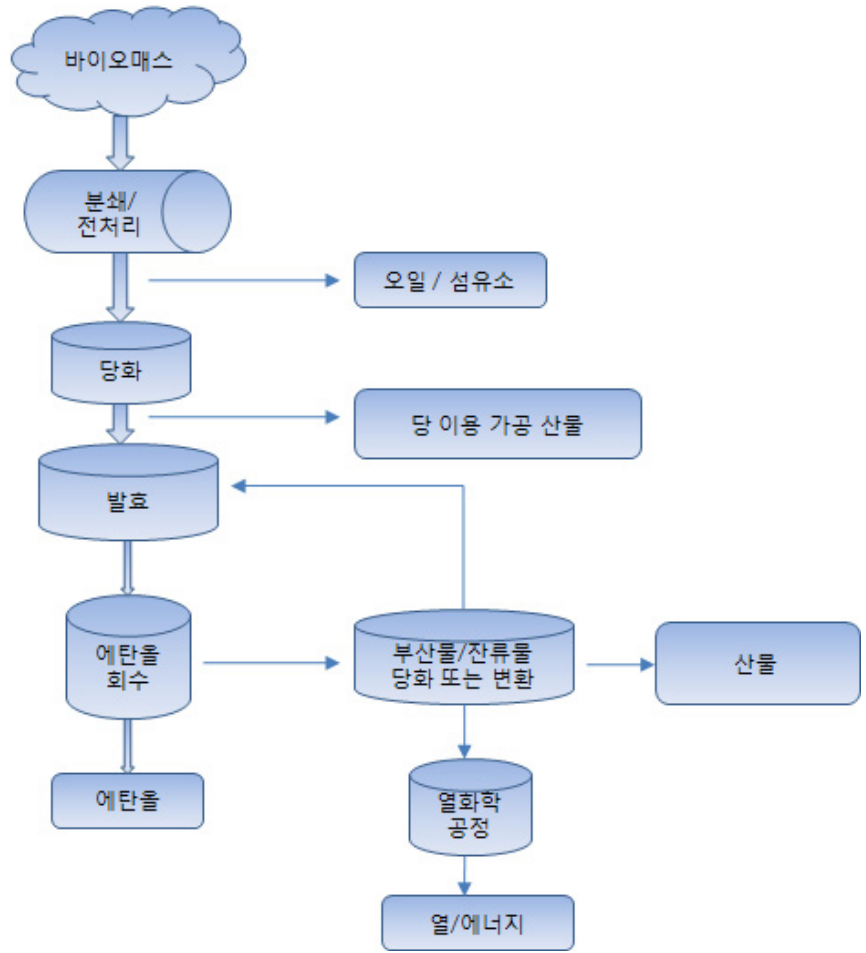


Fig. 5 Mutile-use of biomass for producing ethanol and co-products.

비 저장조 등으로 구성된다. 바이오가스 정제 또는 활용설비는 바이오가스의 활용방식에 따라 결정된다. 현재 대부분의 경우 바이오가스를 이용한 발전설비를 도입하는 경향이 있으나, 바이오가스 중에 포함되어 있는 CO₂와 H₂S를 제거하면 천연가스와 거의 같게 되므로 도시가스 파이프라인에 주입하여 활용하는 것도 가능하다. 또는 가스를 주변 지역에서 활용할 수 있는 가스충전소를 설치하여 공급하는 것도 또 다른 활용방법이다. 액비 저장조는 액비나 퇴비를 농지에 살포하는 시기가 연중 특정 기간에 국한되어 있으므로 살포지 주변에 다수의 저장조를 계획하고 위치와 규모를 결정하여야 한다. 스웨덴에서 시범사업으로 시행되어 운영된 사례로서 Agropiti-Gas 프로젝트(Vågström, 2005)는 유기성폐기물의 도농 복합형 순환이용 사업으로서, 국내에서 유사한 사업을 계획한다면 참고할 만 하다.

Fig. 6에서는 유기성폐기물을 복합적으로 이용하는 체계를 보여주고 있다. 농산물을 포함한 바이오매스를 생산하고, 자원회수와 안정화 과정을 거친 후 발생하는 부산물의 처분지로서 농지는 순환이용의 중심에 위치하고 있다. 농지에서 출하되는 농산물은 식품이나 사료로서 공급되며, 그 곳에서 배출되는 폐기물 바이오매스는 혐기성소화시설에서 안정화를 거친다. 안정화 공정은 혐기성소화시설 뿐만 아니라 유효 성분의 추출 및 전환공정이나 퇴비화공정으로 대체할 수 있다. 소화시설에서 얻어지는 바이오가스는 정제과정 없이 가스엔진에 공급하여 전력을 생산하거나, 정제 후 천연가스버스 또는 도시가스 공급망에 주입하여 이용할 수 있다. 이미 독일이나 스웨덴에서는 자동차 연료로서 공급하는 사업을 시행하고 있다.

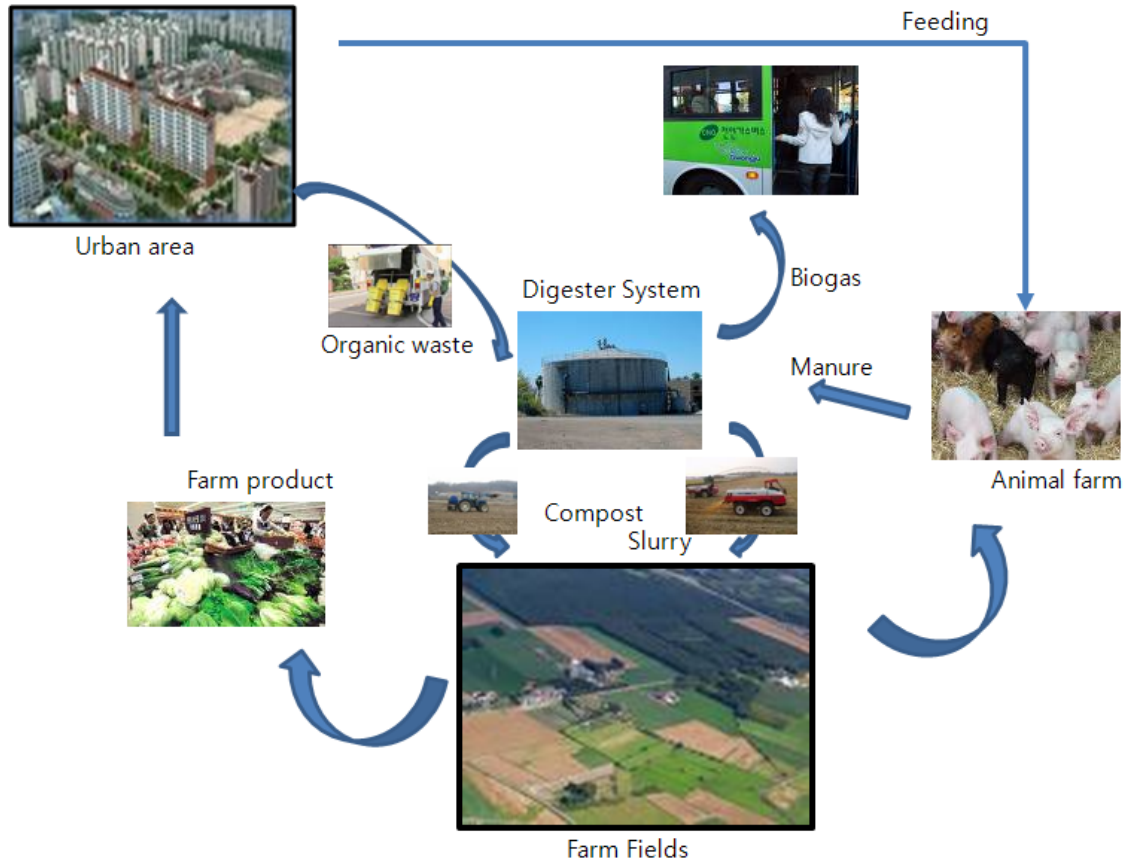


Fig. 6 Example of Multi-functional use of biomass

다. 부산물의 활용

생물정제공정을 거치게 되면 대부분의 가용 유기물은 추출된다. 그럼에도 불구하고 바이오매스를 농지에 환원하기 위해서는 충분히 안정화해야 한다. 안정화 과정은 호기적인 방법으로서 퇴비화가 있으며, 혐기성 소화공정에서 얻어지는 소화액은 추가의 공정이 필요 없이 살포가 가능하다.

퇴비화의 정의는 약간의 차이는 있지만 일반적으로 유기물이 미생물에 의하여 분해되어 안정화되는 과정이다. 그 최종물질은 환경에 악영향을 미치지 않아야 하며 토양에 사용할 수 있을 정도로 안정해야 한다. 유기성폐기물을 부식토 상태로 변화시키는 생화학적 공정이라고 할 수 있다. 퇴비화는 유기성폐기물의 처분 공정으로서 농업용 유기질 비료를 생산하는 것이다. 퇴비화과정을 거치면 원료 중의 탄질비가 20 수준으로 조절되어 토양 중에서 급격한 분해로 인한 질소기아 현상이 일어나지 않도록 한다. 또한 오물감을 없애 취급이 용이하다. 특히 함수비는 최초에 50~

65% 수준으로 퇴비화 후에는 함수비가 더욱 낮아지게 된다.

화학비료와 비교할 때 퇴비가 가지는 주요 특성은 퇴비는 양분을 다양하게 함유하고 있어 작물이 필요로 하는 영양분을 동시에 공급할 수 있으나 성분이나 품질이 균등하지 못하다는 것이다. 퇴비는 지효성으로 작물이 양분을 흡수하는데 시간이 소요되나 액비는 화학비료와 같이 속효성이다. 화학비료에 비해 퇴비나 액비는 운송 등에 있어서 불리하며 사용할 때마다 성분을 분석하여 시용량을 결정하여야 하는 불편함이 있다.

액비를 농지에 이용하기 위해서는 성상이 균일하고, 고형분이 거의 없는 액상분으로서, 점착성이 낮아야 한다. 또한 작물에 대한 피해가 없도록 충분히 부숙되어야 한다. 액비화는 호기성 액비화와 혐기성 액비화의 2가지 종류가 있다. 호기성 액비화에서는 산소공급, 즉 공기를 포기하는 방법으로서 호기성 미생물이 성장할 수 있는 조건을 제공해야 한다. 호기성 액비화에서는 퇴비화와 유사하게 질소성

분의 손실이 많다. 축산분뇨를 액비화하는데 있어서 사전에 고액분리를 통해서 고형분은 퇴비화 처리하고, 나머지 액상분만을 액비화하는 것이 바람직하다. 앞서서 언급한 바와 같이 혐기성액비화는 소화공정으로서 바이오가스를 부수적으로 얻을 수 있는 장점이 있다.

5. 미래 농업의 전망

지난 2006년 바이오디젤이 본격적으로 상용화되면서 재배에 대한 관심이 커지게 된 에너지 작물이 유채이다. 바이오매스로서 유기성폐기물의 유효한 활용 수준에서 벗어나 유채와 같은 에너지작물의 재배를 통한 대량 생산 및 활용이 전망된다. 농업부문에서는 에너지 작물 또는 유용 바이오 작물의 생산 비중이 지속적으로 높아질 것이다. 에너지 작물 뿐만 아니라 바이오 재료의 생산과 이용을 위해서는 보다 다양한 작물의 탐색과 재배가 보다 활발하게 추진될 것으로 예상된다. 단위면적당 바이오매스 생산량을 높이기 위해 형질전환 등 유전공학이 도입하는 사례도 증가할 것이다. 유전자조작 작물을 식품으로 이용하는 것은 그 안정성이 아직까지 검증되지 않았기 때문에 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 그러나 에너지 및 원료 생산을 위하여 생산량 극대화를 위한 유전자 조작은 상대적으로 쉽게 수용될 수 있기 때문이다.

바이오매스 생산을 위한 전용작물의 재배는 여러 가지 문제점을 낳을 가능성이 있다. 유희지나 한계농지 등을 활용하는 방안이 검토되고는 있으나, 역시 작물재배의 생산성을 고려한다면 기존의 농지가 유리하다. 따라서 식량작물이나 기타 작물과의 경합은 필연적이다. 아직까지 주곡의 자급률을 유지하고 있으나, 최근의 해외 곡물가격의 상승은 바이오매스 생산문제를 신중하게 접근해야 함을 시사하고 있다. 또한 유채를 포함하여 바이오매스 생산용 작물을 재배하게 되면 관개 용수량 및 시비량의 증가, 그리고 토양의 지력 저하 등의 문제가 발생할 수 있다.

최근 석유에 기초한 현대사회는 자원의 유한성과 가격 급등, 지구온난화에 대한 관심 등이 복합적으로 작용하여 바이오매스 활용을 위한 수요가 증가함에 따라서 부작용에 대한 우려가 높아지고 있는 것이 사실이다. 곡물가격의 상승까지 유발하고 있는 현재 상황을 고려하면 바이오연료 및 바이오유래 화학물질의 생산과 이용이 과연 바

람직한가에 대해 생각할 필요는 있다. 경제적인 문제 뿐만 아니라 최근에는 바이오에너지 생산에 따른 환경문제에 대한 우려도 높아지고 있다. Brabeck-Letmathe(2008)은 최근 작물생산을 위한 많은 농지가 에너지 작물을 재배지로 전환되고 있음을 지적하면서, 지구온난화와 이에 대한 대응책의 하나로서 바이오연료 생산을 위해 이러한 변화가 정당화될 수 있는지 의문을 제시하고 있다. 바이오연료 생산은 세계 농업시장을 부정적인 방향으로 변화시키고 있다. 에탄올 1리터 생산에 2,000리터의 물을 소비하며, 1리터의 바이오디젤 생산에는 5,000에서 10,000리터의 물을 소비된다는 미국 에너지성의 자료를 인용하면서, 바이오연료는 비경제적이며 생태학적으로 유해하며, 윤리적으로 정당화될 수 없다고 강하게 비판하고 있다. 2008년 미국은 1.3억톤의 옥수수를 바이오연료 생산에 이용할 것이다. 이 양은 미국 에너지 소비량의 극히 일부에 지나지 않는다.

그럼에도 불구하고 석유를 근간으로 하는 세계 산업구조는 바이오매스에 의존하는 형태로 변화하고 있음은 인식해야 한다. 미래 농업 또한 이러한 인식 하에서 적극적으로 대처해야 하는 것이다. 석유화학 사회 기반을 극복하기 위한 바이오연료 생산 뿐만 아니라 다양한 원료물질의 생산을 위해서 앞으로의 농업은 1) 다양한 바이오작물의 발굴과 재배, 2) 생산량 증대와 형질개량을 위한 유전공학의 도입, 3) 제한된 농지의 효과적 이용, 4) 바이오매스 자원의 복합적 이용을 위한 중심 역할 등을 담당해야 한다. 더 나아가 식품 위주의 농산물 가공에서 에너지와 다양한 원료물질 생산을 염두에 두어야 할 것이다.

6. 결 론

석유와 관련 산업을 기반으로 발전해 온 현대사회는 지구온난화, 지속가능한 개발의 필요성, 유가 상승 등으로 인해 커다란 변화의 시점에 이르렀다. 인류 역사 전체를 살펴볼 때 석유 및 석유화학에 의존해 왔던 기간은 매우 짧다. 특정 지역에 집중되어 있는 석유자원의 유한성을 고려할 때 바이오매스 기반 산업 및 사회로의 회귀는 필연적이라고 판단된다. 바이오매스 자원은 인류가 필요로 하는 에너지, 각종 자재 생산을 위한 원료 물질의 공급원으로서 기능을 회복할 것이다. 석유 및 석유화학산업이 현대 산업사회

에 제공하였던 많은 부분이 바이오매스에 의해 공급이 가능하다는 것은 앞에서 기술한 바와 같다. 에탄올이나 바이오디젤과 같이 최근 세계적으로 이용량이 증가하고 있는 바이오연료로부터, 친환경 수지나 화학약품 등 많은 종류의 물질 생산되고 있다.

바이오매스 자원을 효과적으로 이용하기 위해서는 복잡적이고 연속적으로 활용되어야 한다. 유효 물질을 추출하고 나머지 부산물을 후속 공정에서 다시 활용하며, 최종 부산물은 안정화하여 농지로 환원되어야 한다. 유효물질을 이용하는데 있어서 추출공정 뿐만 아니라 다양한 변환 및 가공공정이 요구된다. 기존의 가수분해, 발효, 합성 등의 기술과 신규 용제의 개발 및 적용 등에 의해 보다 다양한 물질의 생산과 합성이 이루어질 것이다. 일련의 바이오매스 복합이용 과정을 거쳐 남는 부산물은 안정화과정을 거쳐 농지에 환원하는 것이 중요하다. 부산물의 농지환원은 토양의 지속가능성을 유지하고 바이오매스의 안정적인 생산을 유지하기 위해서 중요하다.

바이오매스 자원의 수요 증가에 대응하여 바이오작물을 재배하는 면적이 증가하고, 단위 면적당 생산량을 늘리기 위한 육종 및 형질전환 등 생명공학 기술이 도입될 것으로 전망된다. 세계 곡물가격의 상승이나 수자원 이용량의 증가 등 부작용을 유발하고는 있지만 온실가스 배출량의 저감 및 석유대체 자원의 필요성을 생각하면 바이오매스 자원이 유력한 대안의 하나이기 때문이다. 앞으로 바이오매스 자원의 복합적이고 연속적으로 이용하는데 있어서 다양한 관련 요소 기술과 함께 농업 및 농촌은 더욱 더 중요한 기능과 역할을 담당하게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 과학기술부. 2000. 바이오매스 에너지 활용기술 개발 기획 연구. 한국에너지기술연구소.
2. 배재근, 2002. 음식물쓰레기의 분류 및 식물에 대한 영양

성. (<http://www.biocycle.org>)

3. 황병호, 구자운, 김윤수, 김영숙, 문성필, 문창국, 백기현, 안원영, 이병근, 이종윤, 이현중, 조남석, 1998. 목질바이오매스. 선진문화사
4. Brabeck-Letmathe, P., 2008. Biofuels are indefensible in our hungry world. The Wall Street Journal. June 13.
5. Dodds, D. R. and R. A. Gross, 2007. Chemicals from Biomass. Science. 318. pp. 1250-1251.
6. Gielen, D. J., M. A. P. C. d. Feber, A. J. M. Bos and T. Gerlagh, 2001. Biomass for energy or materials? A Western Europe systems engineering perspective. Energy Policy. 29(4). pp. 291-302.
7. Hirayama, Y., 2006. What is Biomass? - Types of Biomass and it's Availability. Why Biomass for Energy? (<http://www.apo-tokyo.org>)
8. NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2007. What is Biorefinery? (<http://www.nrel.gov>)
9. Pauly, M. and K. Keegstra, 2008. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuel. The Plant Journal. 54. pp. 559-568.
10. Ragauskas, A. J., C. K. Williams, B. H. Davison, G. Britovsek, J. Cairney, C. A. Eckert, W. J. F. Jr., J. P. Hallett, D. J. Leak, C. L. Liotta, J. R. Mienlenz, R. Murphy, R. Templer and T. Tschaplinski, 2006. The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. Science. 311. pp. 484-489.
11. Schell, C., C. Riley and G. R. Petersen, 2008. Pathways for development of a biorenewables industry. Bioresource Technology. 99. pp. 5160-5164.
12. Vågström, L., 2005. Evaluation of a handling system for ley crop used in biogas production : Capacities and costs for a centralised system. (<http://www.agroptigas.com>)