

도시가스 용 바이오 가스 정제 시스템 개발

이현진 · 고상욱 · 이인동 · 정인희 · †고재욱

광운대학교 화학공학과

(2019년 2월 18일 접수, 2019년 4월 21일 수정, 2019년 4월 22일 채택)

Development of Biogas Purification System for City Gas Supply

Hyunjin Lee* · Sang-Wook Ko · In-Dong Lee · In Hee Jung · †Jae-Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

(Received February 18, 2019; Revised April 21, 2019; Accepted April 22, 2019)

요약

우리나라는 천연가스 수입국으로 2018년 미국이 수출한 물량의 20%를 수입할 정도로 많은 양을 수입하고 있다. 이에 가스 수요를 만족시키며, 기후변화 대응에 효과적으로 대응할 수 있는 바이오가스는 대체제가 될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 바이오가스의 생산량의 20%만이 판매되고 있고, 이 역시 효율이 좋지 못해 활용하기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 바이오가스를 도시가스로 공급 할 수 있는 최적의 정제 시스템을 개발을 목적으로 하였다. 시스템 선정을 위한 바이오가스에 대한 분석, 시스템 설계를 위한 사례 발굴, 시나리오 구성, 비용편익 툴을 개발하고 사례 적용하여 최적의 시스템을 개발하고자 하였다.

Abstract - Korea is natural gas importer which imports a lot quantities which 20% of the volume of US exports in 2018. Biogas which can satisfy gas demand and respond effectively to climate change, will be an alternative. However, only 20% of biogas production is sold, which is also not efficient and difficult to use. The purpose of this study develops an optimal purification system for supplying biogas as city gas. We develop an optimal system by analyzing biogas for system selection, finding cases for system design, developing scenario, and developing a cost - benefit tool.

Key words : biogas, desulfurizer, purification, city-gas

I. 서론

우리나라는 천연가스(LNG) 수입국으로 2018년 미국이 수출한 물량의 20%를 수입할 할 정도로 많은 양을 수입하고 있다. 에너지경제연구원 자료에 따르면 2010년의 경우 전년에 비해 10% 이상의 양을 순수입할 정도로 급격히 증가하였다.

독일의 경우 2009년 시간 당 10,000m³의 바이오가스를 도시가스로 공급하며, 스웨덴은 2000년에 시작하여 지속적으로 확대해 가고 있다[1].

가스 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 또한 기후변화 대응으로 신재생 에너지의 활용이 요구

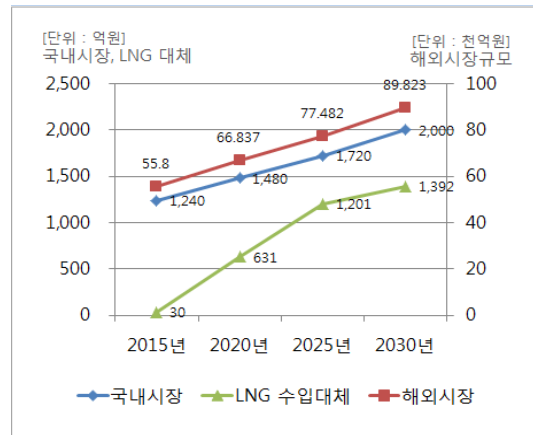


Fig. 1. Biogas market in the world [10]

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

되고 있어 바이오가스의 활용은 천연가스를 대체할 수 있는 수단으로 주목을 받고 있다.

바이오 가스 시장의 성장성은 Fig. 1과 같이 매우 높음을 알 수 있으며, 높은 순도의 바이오메탄을 정제하는 기술을 개발할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 바이오매스 기반의 저급에너지를 고질화하여 연료전지, 수송용 및 도시가스용으로 활용이 가능한 바이오가스로 정제하는 시스템을 개발하고자하며, 한국형 바이오메탄 제조시설 개발의 최적화를 목적으로 한다.

II. 이론 및 기술 분석

바이오 가스 정제 기술은 바이오메탄을 농축하기 전 불순물을 처리하는 공정으로 Fig.2와 같이 구성되어 표시한 부분의 영역이다.

2.1 황화수소 제거 기술

황화수소는 금속의 부식을 일으킬 수 있고, 메탄 정제 시스템에 영향을 줄 수 있기 때문에 황화수소를 제거하는 기술은 조건에 맞게 선정하여야한다.

2.1.1 생물학적 고정법

황을 산화시키는 박테리아가 포함되어 있는 필터를 이용하여 황산을 황으로 변환하여 제거한다.

이 방법은 2000~3000ppm의 황산을 50~100ppm으로 제거 가능하고 암모니아가 같이 제거되는 장점이 있다. 하지만 가스 내 농도가 50ppm 이상이기 때문에 도시가스 품질 기준을 상회하여 활용하기 적합하지 않다.

2.1.2 염화철 방식

염화철을 소화조에 넣어 소화조 내에서 황화수소를 제거할 수 있으며, 농도를 2000ppm에서 100ppm까지 낮출 수 있으나, 어느 정도의 염화철을 주입해야하는지 파악하기 어려워 과주입하는 단점이 존재한다[1][3][4],

2.1.3 활성탄 방식

황화수소를 활성탄에 흡착시켜 제거하는 방식으로 요드화칼륨 또는 황산을 첨삭하여 반응속도를 증가시킨다. 하지만 공기 주입이 필요하고 반응이 진행됨에 따라 질소가 농축되는 단점이 존재한다.

2.1.4 수세식

황화수소가 물에 녹는 것을 이용하여 흡수탑에서 향류로 접촉하여 제거한다. 이산화탄소도 같이 제거할 수 있는 장점이 있으나, 황화수소에 의해 부식되어 배관을 막아버릴 수 있어 물의 산도 조절을 같이 진행해야하는 단점이 존재한다[7][8].

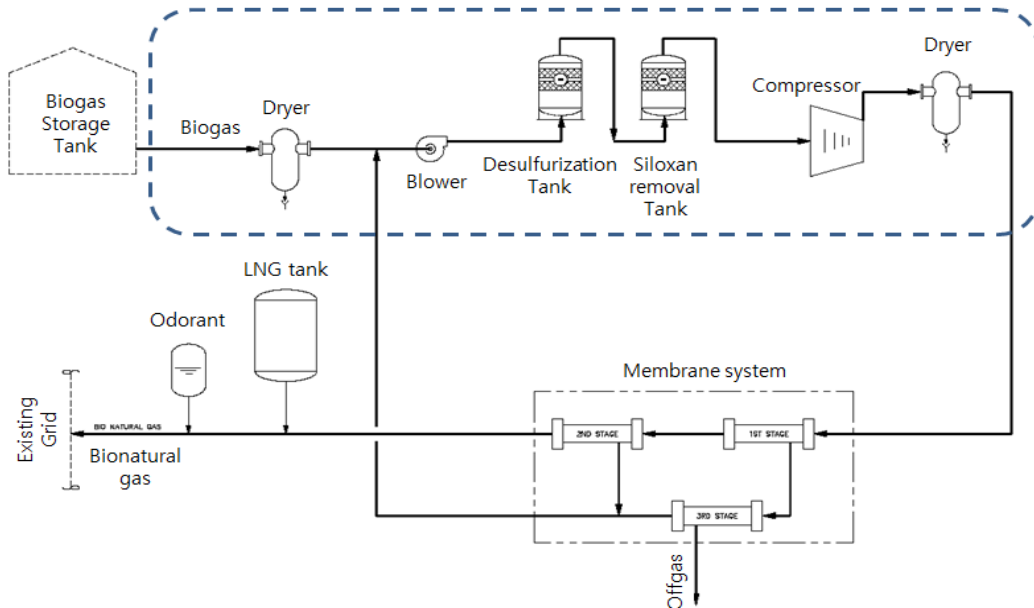


Fig. 2. Process schematic diagram of biogas purification

2.1.5 산화철 방식

산화철이 도포되어 있는 층을 통과하며 반응시켜 제거하는 방식이다. 투자비가 작고 운영비가 저렴하다는 장점이 존재한다[5][6][7].

2.1.6 가성소다법

가성소다 용액에서 바이오 가스가 기포를 형성하면서 황화수소는 황화나트륨 또는 황화수소나트륨을 형성한다. 폐수가 발생하고 재활용이 불가능하고, 지속적으로 수산화나트륨을 공급해야한다[2][3].

2.2 실록산 제거기술

화장품, 탈취제 등에서 발생하는 실록산은 주로 매립지, 하수슬러지의 바이오가스에서 발견된다. 황성탄, 탄화수소 화합물 수용액에 흡수하여 제거할 수 있으며, 가스를 냉각하여 응축수를 배출함으로 가능하지만 효과적이지 못하다[5][6].

2.3 기타 오염물질 제거기술

2.3.1 수분

수화조의 바이오가스는 수분이 포화되어 있어 35℃에서 약 5%가 포함되어 있다. 수분은 황화수소와 마찬가지로 부식을 일으킬수 있으며, 주요 공정을 오염시켜 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 냉각법, 흡착법, 흡수법이 존재하며 품질기준을 준수하기 위해 대체로 냉각법을 사용한다.

2.3.2 암모니아

음식물 폐기물에서 발생하는 암모니아의 농도는 낮은 수준이고 제거할 필요는 없지만 물에 녹여 제거하거나 냉각시켜 배출시킨다.

2.3.3 방향족 화합물

음식폐기물에서 발생하며, 식품공장 등에서 배출된 폐기물이 한꺼번에 소화조로 투입될 경우 오염될 수 있어 관리가 필요하며, 황성탄으로 제거가 가능하다.

2.3.4 산소와 질소

매립지가스에서 공기의 혼입으로 발생하며, 정상적인 조건에서는 발생하지 않으며 공기의 누설량에 의해 농도가 결정된다. 산소와 질소는 메탄과 특성이 유사하기 때문에 제거하기 어려워 최대한 흡입을 방지해야한다.

III. 정제시스템 설계

3.1 바이오가스 성분 분석

설계 전 데이터를 얻기 위해 적용할 대상의 성분을 분석하였다. 기본적인 탈황을 활용하여 바이오 가스를 사용하고 있으며, 방식은 습식탈황법이다. 탈황 후 성분은 Table 1에서 확인가능하다.

3.2 설계주요인자 도출

Table 1, Table 2.의 바이오가스 성분분석에서 확인한바와 같이 공정에 영향을 주는 성분은 수분이다. 이는 수분을 제거하는 설비를 설치해야 한다는 것을 의미한다. 또한 공급되는 수분은 바이오

Table 1. Result of biogas component analysis

Test Items	Unit	Results	Uncertainty
		After Repair	
Methane	mol %	60.97	0.4
Ethane	mol %	No detect	
Propane	mol %	No detect	
n-Buthane	mol %	No detect	
CO2	mol %	29.88	0.6
N2	mol %	0.04	0.3
O2	mol %	-	0.01
CO	mol %	No detect	-

Table 2. Water content with biogas temperature

Biogas Temp(℃)	Partial pressure (mmaq)	Water content (vol %)
10.0	125.2	1.21
15.6	199.4	1.93
21.1	255.3	2.47
26.7	356.6	3.45
32.2	491.1	4.75
37.8	667.7	6.46

Table 3. Biogas compositions from different process of sewerage waste water treatment

Test Items	unit method	C1-1 digester	wet desulfuration inlet	A1-2 digester	2nd desulfuration inlet	2nd digester
CH4	mol % (NDIR)	59.1	61.1	63.3	59.6	59.2
CO2	mol % (NDIR)	30.4	31.9	33.2	40.3	40.7
N2	mol % (GC/TCD)	4.54	3.10	1.33	0.04	0.89
O2	mol % (GC/TCD)	1.00	0.75	0.08	0.01	0.45
H2S	ppm (GC/PFPD)	294.4	212.0	18.5	1436.5	392.1

Table 4. Biogas composition from sewerage before and after desulfuration

Test Items	unit method	C-1 digester	dry desulfuration		wet desulfuration	
			inlet	outlet	inlet	outlet
CH4	mol % (NDIR)	60.7	61.6	61.4	62.9	62.6
CO2	mol % (NDIR)	30.5	30.7	30.7	31.1	31.2
N2	mol % (GC/TCD)	4.10	3.56	3.51	2.71	2.74
O2	mol % (GC/TCD)	0.91	0.87	0.84	1.17	0.79
H2S	ppm (GC/PFPD)	298.0	142.6	66.3	3.1	0.2

가스의 온도와 압력에 따라 결정되어진다. Table 2에서 온도별 포화되어 있는 수분의 양을 확인할 수 있다[9].

Table 5. Major facilities of biogas purifying

Major design factor	Design Technology	Capacity Decision	Stanby Decision
H2O Removal	Coolant	Needed	100% x 1
Desulfurization	Needed	Needed	Needed
Siloxane Removal	Activated Carbon	Needed	Needed
Dust Removal	Physical Filter	Needed	100% x 1

공급되는 시설의 문제점을 고려해야하기 때문에 공급처의 시설별 바이오가스를 측정해보았고 Table 3, Table 4에서 탈황설비를 통과하기 전의 황화수소는 200ppm에서 1500pp까지의 농도로 발생하고 있어 탈황시설이 필요함을 알 수 있다.

Table 4에서는 정제 공정이 적용 될 하수처리장에서 생성되는 바이오가스의 탈황설비 전 후를 분석한 데이터로 건식 탈황설비 후단의 황화수소 농도가 높은 것으로 확인이 되고, 습식의 탈황설비 전 후로는 낮은 농도로 유지됨을 알 수 있다.

Table 4에서는 하수처리장의 소화조에서 생성되는 바이오가스를 분석한 데이터로 Table3과 비교해 볼 때 질소와 산소가 C1-1 소화조에서 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 소화조에서 공기가 혼합되고 있는 것으로 추측이 되어진다.

위의 분석을 통해 얻을 수 있는 주요 설계 인자는 Table 5에서 확인 할 수 있다.

3.3 운전 시나리오 작성

시나리오 작성은 설계 주요인자 도출을 통하여 수분 및 먼지를 제거할 수 있는 설비, 탈황설비, 실록산 설비의 구성에 대하여 진행하였다.

본 연구 대상의 바이오 가스는 100ppm이하의 저농도의 황화수소가 포함되어 도시가스로서 활용할 때는 산화철 방식 혹은 활성탄 방식으로 탈황을 진행하는 것이 적절함으로 판단된다.

시나리오는 용량과 수량에 따라 설정, 유지보수 기간 및 운전정지 일수 등을 포함, 보수에 사용되는 비용을 산출하였다.

용량은 탈황과 실록산을 처리하기 위해 필요한 여재를 6개월마다 교체하고 1년에 1회 교체하는 두 가지를 설정, 100% 1기, 100% 2기 설치의 두케이스로 나뉘, 총 4케이스로 분류하였다. 각 케이스 별 작성된 시나리오는 Table 6와 같다.

3.4 비용편익 틀 개발

바이오가스 정제 후 바이오 천연가스를 제조하고 도시가스로 공급하는 것과 LNG를 공급하는 것과의 비용편익을 분석하였다. 각각 케이스의 투자비, 운전비 등은 3.3의 운전시나리오를 기반으로 하여 진행하였다.

매출은 도시가스 판매하는 부분이며, 원가에는 원료비, 전기비, LPG 구입비, 등이 있다.매출 추정은 도시가스 평균 도매 단가를 적용하고, 제조원가 구성의 총합이 바이오 천연가스 제조원가가 된다.

$$PLNG - MSUM = E \text{ -----(식 1)}$$

PLNG은 LNG 평균 구매단가 이고, MSUM은 평균 제조단가로서 원료 바이오가스당 제조원가를 구성하는 각 원료비의 합이고, E는 비용 편인 단가가 된다.

연구에서는 할인현금수지 분석법을 통하여 정확한 분석을 진행하였다. Table 7에서 비용편익의 주요 변수를 정리하였다.

할인현금수지 분석법을 통하여 투자회수기간법, 내부수익율법, 순현재 등을 산출하였다. 투자회수기간법은 투자비의 회수를 기간 내에 가능한지 이해 할 수 있으며, 내부수익율은 현금흐름과 순자산가치의 합을 "0"으로 만들어주는 할인율을 의미한다. 순현재가법은 사업기간 동안 발생한 할인현금 흐름의 총합을 활용하여 사업성을 확인하는 것이다.

개발된 비용편익 틀은 케이스별로 분석이 가능하며, 시나리오 별로 운영 데이터를 달리하여 입력값에 등록할 수 있도록 개발하였다.

Table 6. Operating scenario of purifying system

Standby plan	100% x 1기		100% x 2기	
	6 month	1 year	6 month	1 year
Capacity				
Time required for media replacement	2 days	1 day	2 days	1 day
Time required for preparing operation	2 days	1 day	2 days	1 day
Emergency stop	1 day	1 day	-	-
Sum	5 days	3 days	4 days	2 days

3.5 최적 시스템 개발

여제 교체주기를 통해 장비의 용량을 선정하고 선정된 장비의 여제량을 계산하고, 비용을 산출하였다.

다음과 같이 경제성 분석의 주요가정을 활용하여 비용편익 계산 결과를 산출하였다. (Table 7)

* 경제성 분석의 주요가정

- 사업기간 : 15년
- 법인세율 : 22%

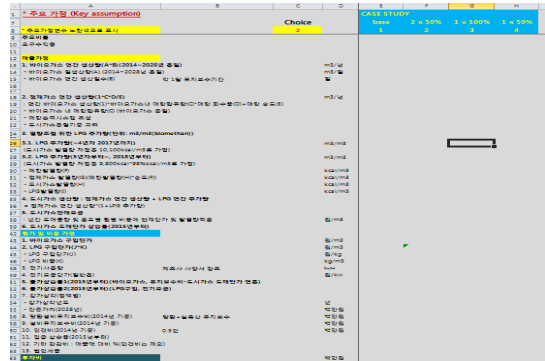


Fig. 3. Cost-benefit calculation tool for purifying system

Table 7. Major variable of cost-benefit analysis

No.	Major variable	Index	Remark
1	Availability factor	Fermenter operation, Maintenance etc.	
2	Amount of biogas purchase	1st Index, Amount of Biogas production	From biogas supplier
3	Amount of biomethane production	2nd Index, CH4 purity and yield	Plant efficiency
4	Electric consumption	Plant characteristic and design composition	
5	LPG consumption	3rd Index, CH4 purity, Monthly mean caloric value of natural gas	Korea Gas Corporation
6	Maintenance cost	Plant characteristic	
7	Laber cost	Plant characteristic	

Table 8. Result of cost-benefit calculation for purifying system

Results	100% x 1 unit		100% x 2 units	
	6 month	1 year	6 month	1 year
Investment cost (million₩)	X + 190	X + 266	X + 272	X + 426
IRR	16.58%	16.36%	15.52%	15.26%
NPV (million₩)	Y + 492	Y + 470	Y + 88	Y + 75
Payback period (year)	7.5	7.2	7.8	7.9

- 현금할인율 : 5%
- 메탄순도 : 97.1%
- 바이오가스 중 메탄함량 : 60%
- 메탄회수율 : 각 시스템별 회수율 적용
- 가스판매단가 : 2014년 9월 가스공사 평균도매요금 적용
- 전기요금 : 2014년 9월 산업용 전력 고압 A 선택 II 적용
- LPG요금 : 2014년 9월 소매단가 적용
- 기타 : 시스템별 특성에 따른 적용

투자비가 가장 적은 6개월에 교체 1기 설치시 경제성이 가장 높게 나왔고, 투자비가 컸던 설치시 경제성이 낮게 나와 투자비가 경제성에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 비용편익 분석의 결과는 큰 차이가 나지않아 플랜트 운영의 형태에 따른 장비의 선정이 중요한 것을 알 수 있다.

IV. 시스템 적용

4.1 시스템 구성 사례

개발된 시스템은 “D”물재생센터에서 발생하는 하수슬러지로부터 발생하는 바이오가스를 대상으로 실시하였다.

설치된 사례의 계통은 가스홀도에서 바이오가스를 배관으로 이송하고 전처리에서 탈황과 실록산 및 수분을 제거한다. 자동 운전을 위하여 운전로직에 대한 설계를 완료하였고, 로직은 기동운전, 정상운전, 비정상운전, 정지모드 및 비상정지 모드로 구성되어 있다.

4.2 운전결과

개발된 시스템의 상황 별 데이터를 예측하여 비

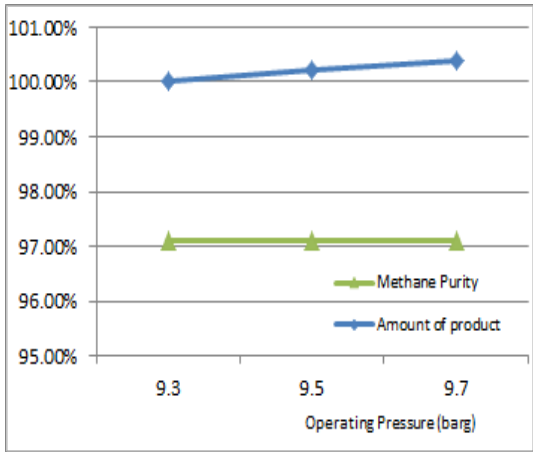


Fig. 4. Expected amount of product gas with operating pressure

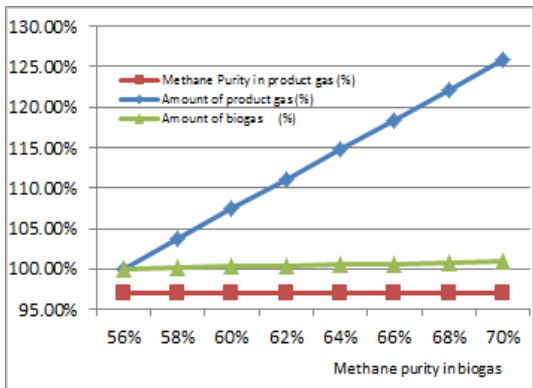


Fig. 5. Expected results with biogas purity

교하여 검증을 진행하였다.

데이터 예측은 운전 압력 및 바이오가스 품질을 기준으로 진행하였고, 플랜트의 운전 모드 별 예상 결과는 다음과 같다.

Fig. 4에서 순도가 97.1%의 바이오 메탄을 생산할 때 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

순도가 증가함에 따라 처리량을 다소 증가하고 있고, 생산량은 25% 이상까지 증가한다. 광범위한 조건에도 순도는 지속적으로 유지하고 있고, 회수율도 높다.

V. 결론

연구를 통하여 바이오 가스의 정제를 통해 도시 가스로 공급하는 시스템을 개발하였다. 바이오 가스

품질을 분석하여 정제해야할 성분을 분석하고 이를 바탕으로 하여 정제 시스템의 주요 설계인자를 도출하였다. 주요 인자를 통해 케이스별 시나리오를 작성하였고, 최적 설계를 판단하기 위해 비용편익률을 개발하여, 평가 가능하도록 진행하였다.

개발된 시스템을 통해 사례에 적용하여 도시가스로 활용하기 충분한 바이오메탄을 안정적으로 생산하고 있으며, 고순도와 고 회수율을 통해 최고의 바이오 가스 기반의 도시가스 공급 시스템을 판단하였다.

개발된 시스템은 바이오 가스를 도시가스로 활용하여 바이오 가스의 활용 방안을 확대하는데 기여하였고, 낮은 이용효율을 해결함으로써 생산 증대를 진행할 수 있는 중요한 동기가 부여 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원받았습니다(No. 2015001950003).

REFERENCES

- [1] "Biogas upgrading and utilization", Task 24-Energy from biological conversion of organic wastes, IEA Bioenergy (1999).
- [2] "Feasibility Study - Biogas upgrading and grid injection" in the Fraser Valley, British Columbia 62 Prepared by: Electrigaz Technologies Inc Final Report June (2008)
- [3] "Evaluation of upgrading techniques for biogas", Swedish Gas Center, Report SGC 142, Persson M (2003)
- [4] "Biogas upgrading-Review of commercial technology", Swedish Gas Center, Report SGC 270, Fredric Bauer, Christian Hulteberg, Tobias Persson, Daniel Tamm (2013)
- [5] "Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection", IEA Bioenergy, Task 37-Energy from Biogas and Landfill Gas, Persson M, Jonsson O, Wellinger A (2006)
- [6] "Technical and economic feasibility of upgrading dairy manure-derived biogas for natural gas pipeline", Master's thesis, Cornell University, Saikkonen K A (2006)
- [7] "Biogas upgrading technologies-developments and innovations, Anneli Petersson, Arthur Wellinger (2009)
- [8] "Process Modeling of a Water Scrubbing System for Upgrading of Biogas to Grid Injection Standards - Model Development and Process Optimization". Swanson, C, Lund University, (2011)
- [9] "Characterization of biogas from anaerobically digested dairy waste for energy use", Kimberly Lynn Bothi (2007)
- [10] Roadmap of biomass energy, 2012 Korea institute of energy technology evaluation and planning