



기기적 증기 재압축 시스템을 적용한 연소 후 이산화탄소 포집공정 개선 연구

정영수 · 정재흠 · †한중훈

서울대학교 화학생물공학부

(2015년 12월 7일 접수, 2016년 2월 1일 수정, 2016년 2월 2일 채택)

Improvement of Post-combustion CO₂ Capture Process using Mechanical Vapor Recompression

Yeong Su Jeong · Jaeheum Jung · †Chonghun Han

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received December 7, 2015; Revised February 1, 2016; Accepted February 2, 2016)

요약

기후변화의 가장 큰 원인 중 하나로 지목되는 이산화탄소의 배출량을 절감하기 위해 제안된 Carbon Capture and Storage (CCS) 전체공정의 에너지 및 비용저감이 시급한 현 시점에서 효율적인 연계공정의 도출이 중요하며 본 연구에서는 연소 후 습식아민 공정을 이용한 포집공정과 압축공정의 간의 연계를 통해 에너지를 저감할 수 있는 방법을 제안한다. 이는 기기적 증기 재압축 시스템을 적용하여 압축기에 사용되는 전기에너지를 열에너지의 형태로 변환함으로써 포집공정에 필요한 리보일러의 에너지 사용량을 감소시키는 방법이다. 본 공정개선안은 압축기에 필요한 추가적인 투자비용 및 전기에너지를 고려하더라도 고압의 이산화탄소를 생산함과 동시에 전체적인 에너지 사용량을 절감시키는 장점이 있다. 또한 본 연구에서는 실제 Test Bed의 운전 결과를 통한 모델을 활용함으로써 보다 신뢰성 있는 절감 효과를 제안하고자 한다.

Abstract - In order to reduce the anthropogenic emission of greenhouse gases, CCS technology has emerged as the most promising and practical solution. Among CCS technology, post-combustion CO₂ capture is known as the most mature and effective process to remove CO₂ from power plant, but its energy consumption for chemical solvent regeneration still remains as an obstacle for commercialization. In this study, a process alternative integrating CO₂ capture with compression process is proposed which not only reduces the amount of thermal energy required for solvent regeneration but also produces CO₂ at an elevated pressure.

Key words : post-combustion CO₂ capture, mechanical vapor recompression, carbon capture and storage, process integration

1. 서론

연소 후 이산화탄소 포집공정은 기술적 완성도가 높고 기존의 화력발전소와의 연계성이 탁월하다는 점에서 가장 상용화에 근접한 기술로 평가받고 있

다. 하지만 흡수제의 재생에너지가 발전소의 출력 효율에 직접적인 영향을 미치기 때문에 재생에너지의 저감을 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 새로운 흡수제의 개발과 관련된 연구와 더불어 공정 개선에 대한 연구 역시 병행되어 진행되고 있는 추세이다. [1-2]

본 연구는 기기적 증기 재압축 시스템 (Mechanical Vapor Recompression; MVR)을 적용하여 연소 후

†Corresponding author: chhan@snu.ac.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

습식아민 CO₂ 포집공정의 흡수제 재생에너지를 저감하는 공정 개선안을 제안하며 이 개선안의 기술적, 경제적 측면을 고려한 저감효과를 보이고자 한다. 기존의 연구에서 사용된 방법론의 경우 시뮬레이션을 기반으로 한 공정개선 효과를 소개하는 경우가 대부분이나 본 연구에서 사용된 포집공정은 실제 CO₂ 포집설비에서 얻은 운전결과를 기반으로 모델링되어 신뢰성을 확보할 수 있었다. [3-6] 본 공정개선안의 경우 포집공정의 개선뿐만 아니라 포집공정과 압축공정을 잇는 CCS 전체의 연계 측면에서 기여할 수 있는 점에서 연구의 가치가 있는 것으로 판단된다.

II. 공정 개요 및 설명

본 연구에서 사용되는 연소 후 포집공정은 가장 보편적으로 사용되는 습식아민 흡수제인 모노에탄올아민 (Monoethanolamine; MEA) 흡수제를 사용하는 공정이다. 모델링을 위해 제공된 데이터는 2011년에 KEPCO E&C 사에서 수행한 보령화력발전 내 0.1 MW CO₂ 포집설비의 실제 운전 데이터이며 이 설비는 보령화력 7, 8호기에서 발생하는 배가스 중 하루 2톤의 CO₂를 90%의 제거율로 회수하는 설비에 해당한다. 포집공정의 모델링은 상용 시뮬레이터인 Aspen Plus (V7.3)을 사용하였으며 경제성 평가는 Aspen Process Economic Analyzer (APEA V7.3)을 사용하여 수행하였다.

III. 포집공정의 모델링 및 검증

3.1. MEA 포집공정의 모델링

연소 후 포집공정의 경우 크게 흡수탑과 탈거탑 2개의 컬럼과 두 컬럼 사이의 열교환기로 설명할 수 있으며 이 외에 펌프, 냉각기 등의 부수적인 장치들을 포함한다. 흡수탑의 경우 컬럼 하단에서 유입되는 배가스와 컬럼 상단에서 유입되는 아민이 화학적 발열반응을 통해서 결합되는 반응을 포함하며 탈거

탑의 경우 CO₂를 포함하는 리치아민이 리보일러에서 공급되는 열을 통해 CO₂와 린아민 상태로 분리되는 반응을 포함한다. 이때 두 컬럼 사이에는 주 열교환기가 위치하여 린아민과 리치아민 사이의 열교환을 통해 현열을 회수한다.

Aspen Plus에서 제공하는 Rate-based 모델은 물질전달현상을 기반으로 하는 CO₂와 아민흡수제간의 화학반응을 잘 묘사하는 것으로 알려져 있기 때문에 많은 선행연구에 사용된 바 있다. 또한 Electrolyte Non Random Two Liquids (ELECNRTL) 모델이 기본 열역학방정식 모델로 사용되었다. [7] 반면 포집된 CO₂를 압축시키는 공정모델에는 Soave-Redlich-Kwong (SRK) 열역학 모델을 사용하였다. [8]

두 개의 컬럼 모두 Tray 대신 Packing 형태의 충전물을 가지며 흡수탑은 약 17 m, 탈거탑은 약 12 m의 충전물 높이를 가진다. 충전물의 종류는 Random Packing의 일종인 IMTP이다. 기타 포집공정 모델의 주요 입력값을 표 1에 정리하였다.

3.2. 포집공정 모델의 검증

모델의 검증을 위해서 2개 컬럼의 내부 온도 Profile을 분석하였다. 컬럼 내부의 온도 Profile은 주요 물질 및 열전달 관계식 및 파라미터의 변화를 통해 조절할 수 있기 때문에 실제 운전결과에서 얻은 컬럼의 온도값을 기반으로 하여 근사한 온도 Profile 매칭 결과를 그림 1과 2에 각각 도시하였다. [9] 두 컬럼 모두에서 Hanley-IMTP 물질전달 관계식과 Chilton-and-Colburn 열전달식을 사용하였으며 흡수탑에서는 Countercurrent, 흡수탑에서는 VPlug flow 모델을 적용하여 보다 정확한 온도 Profile을 얻을 수 있었다.

Table 1. Input data for capture process model

	Value
Flue gas inlet flow	350 Nm ³ /hr
Solvent circulation rate	1,235 l/hr
Absorber operating pressure	1.01 bar (atm.)
Stripper operating pressure	1.5 bar

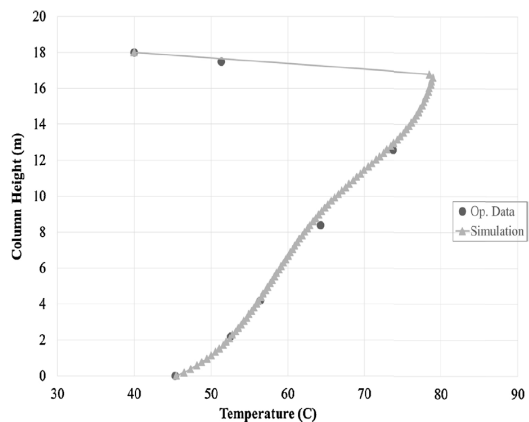


Fig. 1. Temperature profile of the absorber column.

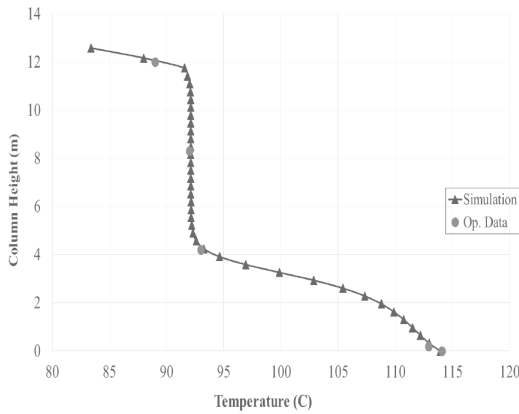


Fig. 2. Temperature profile of the stripper column.

IV. 기жек 증기 재압축 시스템의 적용

4.1. MVR 시스템의 개요

일반 연소 후 포집공정의 경우 탈거탑 상단에서 발생하는 가스가 응축기를 거쳐 CO₂와 환류스트림으로 분리된다. 이때 상대적으로 고온인 상단 가스에서 회수 가능한 열이 버려진다. MVR 시스템은 이 열을 회수하기 위해 가스를 응축기로 보내는 대신 바로 압축기를 거쳐 가압시킨 후 고온의 스트림으로부터 스팀의 현열 및 잠열을 회수하는 공정이다. 회수된 열은 리보일러와의 열교환을 통해 MEA 흡수제의 재생에너지를 크게 감소시킬 뿐만 아니라 MVR을 통해 최종으로 생성되는 CO₂는 고압상태이기 때문에 별도의 압축공정 없이 액화 이후 바로 이송 가능한 형태의 CO₂를 생산할 수 있다는 장점이 있다. MVR 공정의 일반적인 구동 원리를 그림 3에 도시하였다.

4.2. MVR 시스템의 설계

MVR 시스템에서 압축기로 유입되는 스트림의 조성은 Mole 기준 약 49%의 CO₂와 나머지의 물로 이루어진다. 이 포화증기 스트림은 2단 압축을 통해 20 bar 로 가압되며 압축단 사이에서 열교환기를 통해 열을 회수하여 리보일러로 공급한다.

MVR 시스템의 설계 시에 고려해야 할 변수로는 탈거탑의 운전압력, 최종 가압된 CO₂의 압력, 리보일러와 열교환기 사이의 최소 온도 접근값을 들 수 있다. 먼저 포집공정의 가장 중요한 변수 중 하나인 탈거탑 운전압력의 경우 탈거탑의 상부 및 하부 리보일러의 온도를 결정하며 운전압력이 높을수록 흡수제 재생에너지를 감소시킨다. [4,10] 또한 탈거탑의

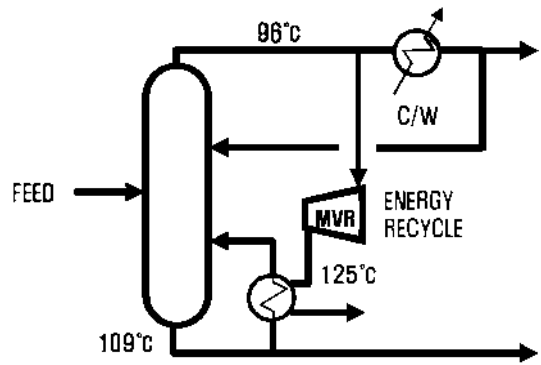


Fig. 3. Example of the MVR system.

높은 압력은 압축공정으로 유입되는 포화증기의 압력과 동일하기 때문에 MVR에서 필요로 하는 압축 에너지 또한 줄어드는 장점이 있다. 하지만 탈거탑의 압력 및 리보일러의 온도가 너무 높을 경우 흡수제의 열화와 같은 운전상의 문제가 발생하기 때문에 상한선이 존재한다. 본 연구에서 사용되는 MEA 흡수제의 경우 120~130°C 이상에서 열화가 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 탈거탑을 2 bar 이상의 압력으로 운전하는 것은 현실적으로 어렵다.

최종 가압된 CO₂의 압력과 같은 경우 압축에 필요한 단수를 결정하기 때문에 중요한 요소이다. 일반적으로 알려진 수송 및 파이프라인을 이용한 CO₂ 수송의 경우 삼중점 근처인 7 bar, -50°C 혹은 20 bar, -20°C 정도의 상태로 이송되며 본 연구에서는 후자의 조건을 가정하였다. [11] 일반적인 가스 압축의 경우 단일 압축기의 압축비가 약 4 정도까지 가능한 것으로 알려져 있으나 [12] 압축되는 가스에 물이 포함되는 경우 압축비를 2.5~3 수준으로 낮게 가져가는 것이 일반적이다.

끝으로 리보일러와의 최소 온도 접근값 (Minimum Temperature Approach; MTA)은 압축단 사이의 Intercooling 온도를 결정함으로써 MVR 시스템으로 회수 가능한 총 열량을 결정하는 변수이다. 리보일러의 온도는 탈거탑의 운전 압력을 통해 결정되기 때문에 본 연구에서는 5K의 MTA값을 가정하여 압축단 사이의 온도를 결정할 수 있었다.

V. 결과 및 고찰

5.1. 시뮬레이션 결과

MVR의 효과를 정량적으로 비교하기 위해 포집공정에서 포집된 CO₂가 20 bar까지 가압되는 공정과 MVR을 적용하여 20 bar의 CO₂를 생산하는 공정을

비교하였다. MVR이 적용된 공정의 Aspen flow-sheet는 아래 그림 4와 같다. 흡수제의 재생에 필요한 스팀의 열에너지와 압축기에 필요한 전기에너지를 정량적인 수준으로 비교하기 위하여 보령화력발전에서 사용되는 터빈의 효율인 46.44%를 적용하여 총 에너지 사용량을 평가하였다. 또한 탈거탑의 압력을 실제 CO₂ 포집설비에서 실험되었던 최대 탈거탑 운전압력인 1.8 bar로 증가시킨 경우 MVR 공정에 대한 에너지 사용량을 계산하였다. 시뮬레이션을 통한 계산결과를 표 2에 정리하였다.

위 결과에서 알 수 있듯이 MVR을 적용하는 경우 탈거탑 리보일러에서 필요한 스팀의 사용량이 각각 18%, 16% 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 문헌에서 보고된 유사 MVR 공정에서 보고하는 수치에 비해서는 낮지만 이는 기본 포집공정 모델이 이미 최적화 되어 있기 때문에 MEA 흡수제를 사용함에도 불구하고 문헌에서 보고되는 값에 비해 재생에너지가 상대적으로 낮게 계산되기 때문이라고 판단된다.

MVR 압축기에서 회수 가능한 총 열에너지량은 압축기의 전력사용량과 비례하며 열에너지에 비해

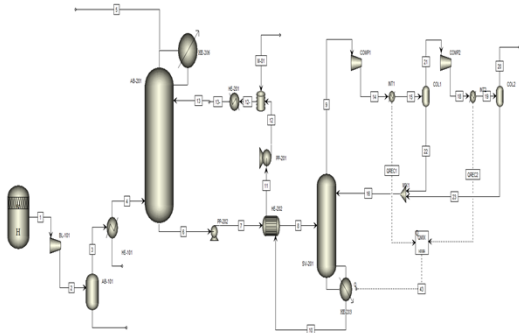


Fig. 4. Process flowsheet of the MVR process.

Table 2. Results of the Aspen Plus simulation

	Base Case	MVR (1.5 bar)	MVR (1.8 bar)
Solvent regeneration energy [GJ/ton CO ₂]	3.42	2.80	2.86
Heat recovered using MVR [KJ/hr]	-	50.66	37.51
Electrical energy for compression [kW]	6.60	9.56	8.80
Total energy [GJ/ton CO ₂]	4.02	3.69	3.68

전기에너지의 에너지적인 가치가 높음을 고려하였을 때 1.8 bar에서 MVR을 운전하는 경우 총 에너지 사용량이 약 8.4% 감소함을 확인할 수 있었다.

5.2. 경제성 평가 결과

MVR 시스템의 최적 운전 조건을 확인하기 위해 경제성 평가를 함께 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 계산된 공정의 설비비용 및 공정에서 사용되는 유틸리티 양을 기반으로 계산한 운영비용을 계산하는 방법을 채택하였다. 먼저 APEA에서 계산된 장치비용 (Capital Expenses: CAPEX)을 표3과 같이 정리하였으며 단위는 미국달러(USD)가 사용되었다. 하지만 장치비용에 비해 운전비용 (Operating Expenses: OPEX)의 경우 연간 발생하는 비용을 기준으로 계산되기 때문에 연간등가 (Equivalent Annualized Cost: EAC)를 계산하여 비교하였다. EAC의 계산은 식(1)을 사용하였으며 본 연구에서는 경제적 감가율 (r)을 5%로, 공장의 수명(t)을 30년으로 가정하였다. [12]

$$EAC = \frac{NPV}{A_{t,r}}, \quad \text{where } A_{t,r} = \frac{1 - \frac{1}{(1+r)^t}}{r} \quad (1)$$

표에서 볼 수 있듯이 MVR이 적용되는 경우 탈거탑에 원래 포함되는 응축기가 없기 때문에 장치비용이 소폭 감소함을 확인할 수 있다. 또한 1.5 bar에 비해 1.8 bar 에서부터 20 bar까지 압축하는 것이 더 유리하기 때문에 압축기 가격에 차이가 발생함을 볼 수 있다.

운영비용의 계산에는 유틸리티에 해당하는 냉각수, 저압스팀 및 전기를 포함하였으며 각 단위 가격은

Table 3. Comparison of the CAPEX (EAC-base)

	Base Case	MVR (1.5 bar)	MVR (1.8 bar)
CO ₂ Absorber	121,800	121,800	121,800
CO ₂ Stripper	89,800	64,300	64,300
HX & Pump for Capture model	63,800	63,800	64,100
CO ₂ Compressor	1,721,600	2,016,600	1,736,600
HX & Pump for Compression model	67,320	38,200	38,200
Total equipment cost (USD)	2,064,320	2,304,700	2,025,000
EAC (USD/yr)	134,291	149,928	131,733

Table 4. Comparison of the OPEX (utility-base)

	Base Case	MVR (1.5 bar)	MVR (1.8 bar)
Cooling Water	160	-	-
LP Steam	5,157	4,102	4,194
Electricity	3,756	5,442	5,008
Total Cost (USD/yr)	9,073	9,544	9,202

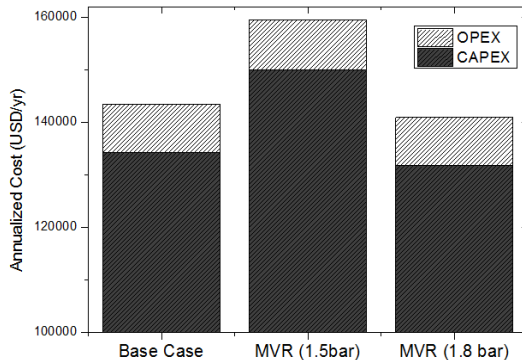


Fig. 5. Results of the economic analysis.

문헌값을 참고하였다. 냉각수의 경우 m^3 당 \$0.013, 50 psig 기준의 저압스팀은 $1,000kg$ 당 \$5.50, 전기는 kWh 당 \$0.01365을 사용하여 계산하였다. [13] 계산된 결과를 아래 표4에 정리하였다. 표에 정리된 냉각수의 경우 탈거탑의 응축기에 필요한 냉각수만을 포함하기 때문에 MVR을 적용했을 경우에는 냉각수 사용량이 거의 없는 것으로 계산되었다.

EAC로 환산된 투자비용과 운영비용의 합을 아래 그림 5에 나타내었다. 경제성 측면에 있어서 탈거탑을 1.8 bar에서 운전하는 MVR 적용 케이스의 경우에 소폭 감소함을 확인할 수 있으며 그 이유는 압축공정에서 발생하는 비용절감 효과가 크기 때문이다.

VI. 결론

본 연구에서 제안하는 MVR 시스템의 경우 이미 선행 연구들에서 제안된 바 있으나 그 효과들이 시뮬레이션을 통해서만 확인되었기 때문에 다소 과장된 경향이 있었다. 또한 선행 연구에서는 CO_2 의 포집과 압축의 연계라는 측면에서의 효과 분석결과가 미미하였다. 본 연구에서는 실제 CO_2 포집설비 Test Bed에서 얻은 운전결과를 기반으로 실제 최적 운전

조건에 흡사한 모델을 개발하여 그 기본 공정에 MVR 시스템을 적용함으로써 보다 정확한 개선효과를 평가할 수 있었으며 또한 경제성 평가를 통해 최적의 운전조건을 도출할 수 있었다. 현재 MVR 시스템의 경우 보령화력발전에서 운전 중인 10MW급 Pilot Plant 및 향후 150MW급 이상의 상용화 설비에 적용시키기 위해 기술 검토 중에 있으며 적용될 경우 흡수제 재생에너지의 저감 및 발전소 전체의 효율 유지 측면에서 기여할 수 있을 것으로 보인다. 또한 CCS 전체적인 측면으로 볼 때 포집기술과 압축·액화기술을 연계하는 인터페이스 역할을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

This study was supported by a grant (14IFIP-B085984-02) from the Smart Civil Infrastructure Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA)

사용기호

- r: Economic depreciation [%]
- t: Project lifetime [year]

REFERENCES

- [1] Yu, C. H., Huang, C. H., and Tan, C. S., "A review of CO_2 capture by absorption and adsorption" *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 745-769, (2012)
- [2] Notz, R., Mangalapally, H.P., and Hasse, H., "Post combustion CO_2 capture by reactive absorption: Pilot plant description and results of systematic studies with MEA", *International journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 84-112, (2012)
- [3] Cousins, A., Wardhaugh, L.T., and Feron, P.H.M., "A survey of process flow sheet modifications for energy efficient CO_2 capture from flue gases using chemical absorption", *International journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 605-619, (2011)
- [4] Abu-Zahra, M. R., Schneiders, L. H., Niederer, J. P. Feron, P. H., and Versteeg, G. F., " CO_2 capture from power plants: Part I. A parametric study of the technical performance based on mo-

- noethanolamine”, *International Journal of Greenhouse gas control*, 1(1), 37-46, (2007)
- [5] Le Moullec, Y., and Kanniche, M., “Screening of flowsheet modifications for an efficient monoethanolamine (MEA) based post-combustion CO₂ capture”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 727-740, (2011)
- [6] Ahn, H., Luberti, M., Liu, Z., and Brandani, S., “Process configuration studies of the amine capture process for coal-fired power plants”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, 29-40, (2013)
- [7] Plaza, J. M., Van Wagener, D., and Rochelle, G. T., “Modeling CO₂ capture with aqueous monoethanolamine”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(2), 161-166, (2010)
- [8] Coutinho, J.A., Kontogeorgis, G.M., Stenby, E.H. Binary interaction parameters for nonpolar systems with cubic equations of state: a theoretical approach 1.CO₂/hydrocarbons using SRK equation of state. *Fluid Phase Equilib.* 102(1), 31-60, (1994)
- [9] Jeong, Y. S., Jung, J., Lee, U., Yang, C., and Han C., “Techno-economic analysis of mechanical vapor recompression for process integration of post-combustion CO₂ capture with downstream compression”, *Chemical Engineering Research and Design*, 104:247-55, (2015)
- [10] Jassim, M. S., Rochelle, G. T., “Innovative absorber/stripper configurations for CO₂ capture by aqueous monoethanolamine”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(8), 2465-2472, (2006)
- [11] Aspelund, A., Jordal, K., “Gas conditioning-The interface between CO₂ capture and transport”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1 (3), 343-354, (2007)
- [12] Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., *Product & Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, (With CD)*. John Wiley & Sons, (2009)
- [13] Decarre, S., Berthiaud, J., Butin, N., and Guillaume -Combecave, J. L., “CO₂ maritime transportation”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(5), 857-864, (2010)