지열을 이용한 매음리 지역난방에 관한 에너지 및 엑서지 분석

김진상†
한국지열에너지기술지원센터

Energy and Exergy Analysis of Maeeum-Ri Geothermal District Heating System

Jinsang Kim†
Korea Technical Center for Geothermal Energy 192-1 Hyoja-Dong, Chuncheon, 200-701, Korea

Abstract

This study describes energy and exergy analysis of the Maeeum-Ri Geothermal District Heating System(MGDHS) of Ganghwa Island, Incheon, Korea. Design data are used to assess the performance of the geothermal district heating system. Geothermal resources of MGDHS are found to be low quality with specific exergy index of 0.029. Exergy losses occur in the pumps and heat exchangers as well as in the geothermal fluid and direct discharge. As a result, the total exergy losses accounts for 5.2% in pumps, 47% in the discharge, and 3.3% in heat exchanger based on the total exergy input to the entire MGDHS. The overall energy and exergy efficiencies of the system are found to be 28.8% and 44.5%, respectively.

Key words : Geothermal energy(지열에너지), District heating(지역난방), Exergy Analysis(엑서지 분석), Direct use(직접이용)

기 호 설 명

E : 에너지 [kJ]
Ex : 엑서지 [kJ]
$\dot{E}$: 에너지율 [kW]
$\dot{Ex}$: 엑서지율 [kW]
$\dot{I}$: 비가역율 [kW]
$\dot{m}$: 질량 유량 [kg/s]
P : 압력 [kPa]
$\dot{Q}$: 열전달율 [kW]
s : 비엔트로피 [kJ/kgK]
$\dot{S}$: 엔트로피율 [kW/K]
$\dot{W}$: 일율 [kW/K]
T : 온도 [℃/K]

그리스 문자

η : 에너지 효율
ε : 엑서지 효율
ψ : 유동 엑서지 [kJ/kg]

† Corresponding author
Tel: +82-33-251-9600; fax: +82-33-251-9680
E-mail : kim6755@nate.com
접수일 : 2009년 10월 27일
채택일 : 2009년 11월 21일

상첨자

CH : 화학적(chemical)
KN : 동적(kinetic)
PH : 물리적(physical)
PT : 포텐셜(potential)

하첨자

d : 직접 배출
$dest$: 파괴
e : 전기
gen : 생성
HE : 열교환기
i : 입구
k : 위치
o : 출구
tot : 전체
w : 관정

1. 서 론

1.1 지열 자원

지열에너지는 지구가 보유하고 있거나, 생성하는 에너지를 말한다. 일반적으로 지표를 구성하는 토양 그리고 암석에 저장된 열에너지와, 암석 내에 존재하는 공간이나 균열 사이를 채우고 있는 유체에 저장된 열에너지를 말한다.

지구의 내부는 고체 내핵, 마그마로 이루어진 외핵, 멘틀, 그리고 지각으로 구성된 층상구조를 가지고 있다. 지열의 근원은 지구 내부에서 발생하는 방사선 붕괴에서 기인하는 것으로 생각되고 있다. 지구상에 있는 대부분의 지역에서 지구 내부로부터 확산 전달된 지열에너지는 지표까지 전달된다. 지역 별로 다른 지질활동을 거치면서, 어떤 지역에서는 지표에서 가까운 지역에서 고온의 지열자원을 용이하게 얻을 수 있는 반면에, 다른 지역에서는 고온의 지열자원을 얻기가 매우 어려우며, 지역 별로 이용할 수 있는 지열의 온도와 깊이 등에서 지역 편차가 심하다.

지열자원은 일반적으로 온도에 따라서 저온, 중온, 그리고 고온 지열자원으로 구분해왔으며, 이를 저엔탈피, 중엔탈피, 그리고 고엔탈피 지열자원으로 명칭으로 부르기도 한다. 지열자원을 구분하는 온도에 관하여 여러 가지의 기준이 제안되어 있는데, 90℃와 150℃를 기준으로 구분하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 온도 또는 온도와 압력으로 지열자원을 분류하는 방법은 지열자원의 유용성을 평가에서 일관성이 떨어지는 점을 보완하기 위하여, 엑서지에 의한 지열자원의 분류를 제안하기도 하였다. 엑서지를 통한 지열자원의 분류를 위하여 비엑서지 지표(specific exergy index, SExI)를 도입하고, 지열자원의 지표값에 따라 0.05, 0.5의 두 값을 기준으로 저품질 지열자원, 중품질 지열자원, 그리고 고품질 지열자원으로 구분한다.[1]

본 연구의 목적은 석모도 지열지역난방 시스템에 관한 에너지와 엑서지 분석을 수행하는 것으로서, 이를 통하여 발생하는 손실을 최소화하여 시스템 효율을 극대화하는 것이다.

1.2 지열지역난방 시스템

지열자원의 이용은 고온인 경우에는 지열발전 시스템을 이용하여 전력을 생산하는 용도로 주로 활용된다. 반면에 온도가 아주 낮은 지열은 히트펌프를 이용하여 냉방이나 난방에 필요한 온도로 변환하여 이용하는 방식으로, 지역적인 제한이 없이 광범위한 지역에서 건물의 냉난방과 급탕 등에서 널리 사용되고 있다.

지열발전에 이용되는 사례에 비하여 온도가 낮은 경우에는 전력을 생산하는 대신에 열을 이용하여 난방이나 급탕 그리고 산업공정등 다양한 용도에 활용하는데 이를 직접이용이라 부른다. 지열자원의 직접이용은 그 이름이 뜻하는 바와 같이 발전기나 히트펌프를 사용하지 않고 지열수가 가진 열을 변환 없이 열의 형태로 이용하는 것을 의미한다. 예를 들면, 건물의 난방, 산업 공정에 이용, 온실, 양식장, 그리고 온천 등을 들 수 있다. 직접이용은 대략적으로 38℃에서 150℃사이의 지열자원을 이용하며, 전 세계적으로 널리 보급되어 있다.

지열을 이용한 지역난방 시스템은 지열의 직접이용에서 가장 널리 사용되는 이용방식이다. 지열

지역난방시스템의 가장 대표적인 사례는 아이스랜드나 프랑스로서, 도시 전체를 대상으로 적용하는 것으로 널리 알려져 있다. 유럽이 지열지역난방이 가장 활발한 대륙으로서, 아이슬랜드나 프랑스 이외에, 독일을 비롯한 여러 나라에서 활발하게 이용되고 있다. 북미에서 오레곤주 Klamath Falls나 네바다주 리노 등지에서 주택 지열난방에 지열지역난방이 활용되고 있다. 터키는 지열지역난방이 1987년에 도입된 이래, 보급이 증가해오고 있다. 동아시아에서는 중국과 일본에서 활용되고 있으며, 특히 중국에서는 최근 북경올림픽을 전후로 북경지역에 지열지역난방 시스템이 널리 보급되었다.[2, 3, 4]

1.3 엑서지 분석

새로운 에너지원을 검토하거나 이를 활용하는 시스템을 검토할 때, 최초로 수행하는 일은 이용가능한 최대 에너지량을 산정하는 것이다. 그러나, 이를 이용하는 발전소나 시스템의 타당성을 검토하는 경우에, 에너지량 정보만으로는 불충분하다. 이를 위하여 필요한 정보는 단순한 에너지량이 아니라, 가용한 에너지의 양으로서 이는 에너지원에서 유용한 일로 이용 가능한 에너지양으로서, 나머지 에너지는 폐열로서 버려지게 된다. 유용한 에너지량을 엑서지라고 부르며, 가용성이나 가용한 에너지로 불린다.[5, 6]

엑서지는 유용한 에너지량을 나타내는 척도로서 에너지 시스템의 열역학적 분석에서 유용한 도구로서 사용된다. 엑서지를 계산하기 위해서는 기준이 되는 환경이 정해져야 하며, 어떤 주어진 상태에서 주어진 양의 에너지 중에서 유용한 잠재일이 얼마인지를 계산할 수 있게 한다. 엑서지 분석으로 검토 대상 공정에서 열역학적인 결함을 발견하고 원인을 평가하는 역할을 수행한다. 그러므로 엑서지 해석은 검토 대상 공정의 열역학적 개선가능성을 평가하는 동시에, 개선으로 인한 이익을 검토하는 경제성 분석을 병용한다.[3]

지열을 이용한 지역난방 시스템의 검토에서도 엑서지 분석이 활발하게 활용되고 있다. 특히 터키에 소재한 지열지역난방 시스템에 관한 엑서지 분석이 활발하게 수행되었다.[2, 3, 4, 7, 8, 9]

2. 매음리 지열지역난방 시스템

지열지역난방 시스템이 검토되는 매음리지역은 인천광역시 강화군에 속하는 석모도에 위치하며 지도에 표시하면 Fig. 1과 같다. 석모도에 온천으로 개발된 지열정(Geothermal Well)은 70℃의 온수를 일일 6,000톤 이상 생산할 수 있으며, 그 후에 개발된 다른 지열정은 74℃의 온수를 일일 10,000톤 정도 생산할 수 있는 용량을 보유하고 있다.

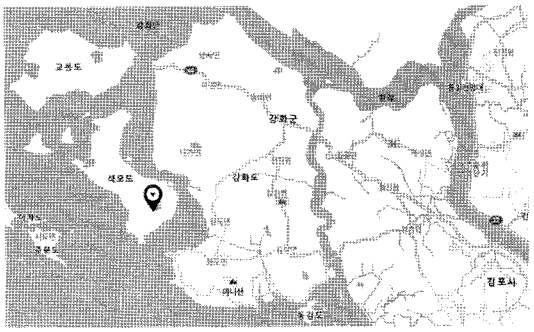

Fig. 1 매음리 위치 (출처: 네이버 지도)

고온의 지열수를 온천수로 사용하기 위하여 건설 중인 온천시설로 보내지면, 온천시설 내에서는 온천 이용객에 적합한 온도인 45℃ 이하로 낮추어서 이용된다. 온천 시설내에서 온천수 원수 보다 낮은 온도로 사용하기 위하여 자연냉각을 위한 저수조 또는 냉각탑을 설치하여야 한다. 온천수 냉각시설에서는 온수의 온도를 70℃ 이상에서 30℃ 이하의 냉수로 식혀서 시설내로 공급하며, 이 냉수는 함께 공급된 고온 온천수와 혼합되어서 온천 시설내에서 이용객에 적합한 40℃ 내외로 사용된다.

지열정이 위치하고 온천시설이 설치되고 있는 매음리 인근에 약 300세대의 농가주택이 분포되어 있다. 현재 건설중인 온천시설에서 대기중으로 방출될 예정인 폐열을 인근 주택 300세대의 난방 및 급탕에 이용하는 것을 목적으로 매음리 지열지역난방 시스템을 설계하였다. 지열정에서 나온 온수는 열교환기에서 열교환을 수행하여 낮은 온도로 냉각된 후에 온천시설로 보내지며, 추가 냉각이 필요한 경우에는 온천시설에서 추가로 냉각

한다. Fig. 2에서와 같이 열교환된 순환수가 매음리 지열지역난방시스템에서 300세대의 농가주택으로 열을 공급하게 된다.

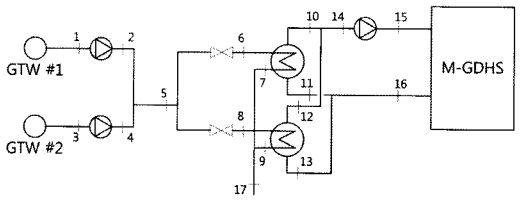

Fig. 2 매음리 지열지역난방시스템 계통도

2개의 지열정에서 나온 지열수는 혼합된 다음에 두 개의 열교환기로 나누어서 공급되어 열교환된 이후에는 온천시설로 보내지는 경로를 통과한다. 지열수는 Fig. 2의 왼쪽에서 보여진 것과 같이 지열정에서 열교환기 사이에서 순환한다. 지역난방 순환수는 Fig. 2의 오른쪽에서 열교환기와 지역난방 대상지 사이를 순환하며, 열교환기에서 얻은 에너지를 지역난방 시설로 이송한다.

3. 시스템 모델링

엑서지 분석은 비교적 최근에 주목을 받고 있는 개념으로서 에너지 시스템이나 다양한 분야의 산업공정에 적용되고 있다.[10, 11] 에너지와 엑서지 분석을 통하여 발생하는 손실을 최소화함으로서, 시스템의 효율을 최대화하고 이로 인한 경제적 이익을 극대화하는데 활용된다. 최근에 엑서지 분석이 지속가능성(sustainability)를 정량적으로 평가하는데 유용한 도구로 인식되고 있다.[12]

3.1 질량, 에너지 및 엑서지 균형식

정상 상태인 시스템에서는 질량, 에너지, 그리고 엑서지에 관한 세 가지 균형식이 성립하며, 이 세 개의 균형식에 따라서 에너지량, 엑서지량 및 효율 등이 결정된다.

질량 균형을 시간에 대한 변화율인 질량유량의 형태로 표시하면 식 (1)과 같다.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \tag{1}$$

여기서 $\dot{m}$은 질량 유량을 나타내며, 하첨자 i와 o는 입구와 출구를 표시한다.

에너지 균형은 시스템으로 들어오는 에너지의 합계는 총 에너지 출력과 동일함을 의미하며, 이를 식으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_o h_o \tag{2}$$

여기서 $\dot{Q} = \dot{Q}_{net,i} = \dot{Q}_i - \dot{Q}_o$와 $\dot{W} = \dot{W}_{net,i} = \dot{W}_i - \dot{W}_o$는 총에너지 입력과 총 일량 출력을 나타나며, h는 엔탈피를 나타낸다.[3]

보존되는 특성을 갖는 질량과 에너지와 달리 엑서지는 보존되지 않는 개념이다. 엑서지는 비가역성에 의하여 엔트로피가 생성되며, 엔트로피의 생성에 따라서 엑서지는 소비되거나 파괴된다. 시스템의 총 엑서지 Ex는 4개의 요소로 구분되며 이는 물리적 엑서지, 동적 엑서지, 포텐셜 엑서지, 그리고 화학적 에너지로 나눌 수 있으며, 이를 식으로 표시하면 식 (3)과 같다.[4]

$$Ex = Ex^{PH} + Ex^{KN} + Ex^{PT} + Ex^{CH} \tag{3}$$

본 연구에서는 물리적 엑서지만을 고려한다. 지열지역난방 시스템에서 화학 반응이 발생하지 않으며, 동적 에너지나 포텐셜 에너지에서 변화가 거의 없으므로 여기서는 이를 무시하고 물리적 엑서지만 존재하는 것으로 가정한다. 이때 엑서지률의 균형을 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\dot{Ex}_{heat} - \dot{Ex}_{work} + \dot{Ex}_{mass,i} - \dot{Ex}_{mass,o} = \dot{Ex}_{dest} \tag{4}$$

비가역성이나 엑서지 파괴는 엔트로피 생성을 먼저 계산하고 이를 이용하여 식(5)와 같이 계산한다.

$$\dot{I} = \dot{Ex}_{dest} = T_0 \dot{S}_{\geq n} \tag{5}$$

3.2 에너지 및 엑서지 효율

에너지 효율은 열역학 제1법칙 효율이라도 부르며, 입력 에너지에 대한 출력 에너지의 비를 나타내면 다음 식(6)과 같다.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{output}}{\dot{E}_{input}} \tag{6}$$

여기서 하첨자 output은 출력은 대부분 유용한 일을 의미한다.

엑서지 효율은 열역학 제2법칙 효율이라고도 부르며, 일반적으로 식 (7)과 같이 표시한다.

$$\epsilon = \frac{\dot{E}x_{output}}{\dot{E}x_{input}} \tag{7}$$

3.3 비엑서지 지표(SExI)

지열자원은 일반적으로 자원의 온도에 따라 저온, 중온 그리고 고온 지열자원으로 구분하는 것이 일반적이다. 그러나 온도 만으로 지열자원을 평가하는 것은 물론이고, 온도와 압력으로 지열자원의 유용성을 평가하는 것에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 비엑서지 지표(Specific Exergy Index, SExI)가 제안되어서 지열자원을 평가하는 방법으로 식 (8)과 같이 제안되었다.[1]

$$\mathrm{SExI} = \frac{h_w - 273.16 s_w}{1192} \tag{8}$$

위의 지표는 h-s 몰리에르 선도에서 직선으로 표시되며, SExI가 0.05보다 작으면 저품질 지열자원으로 불리며, SExI가 0.5보다 큰 경우에는 고품질 지열자원이라고 분류하며, 그 사이는 중품질 지열자원이라고 부른다.

매음리의 지열지역난방 시스템에 열을 공급하는 지열정의 비엑서지 지표를 계산하면 0.029로서 0.05보다 작으므로 저품질 지열자원 또는 저엑서지 지열자원으로 분류된다.

Table 1. 설계 조건표

상태 번호	유체 종류	온도 (℃)	압력 (kPa)	유량 (kg/s)
0		5.0	101.32	-
1	GTW*	69.3	120.00	20
2	GTW	70.0	300.00	20
3	GTW	73.3	120.00	20
4	GTW	74.0	300.00	20
5	GTW	72.0	300.00	40
6	GTW	72.0	300.00	20
7	GTW	52.0	250.00	20
8	GTW	72.0	300.00	20
9	GTW	52.0	250.00	20
10	W*	65.0	200.00	26.7
11	W	50.0	250.00	26.7
12	W	65.0	200.00	26.7
13	W	50.0	250.00	26.7
14	W	65.0	200.00	53.4
15	W	65.7	500.00	53.4
16	W	50.0	250.00	53.4
17	GTW	52.0	250.00	40

* GTW는 지열수를 나타내며, W는 이차측 순환수를 나타냄

3.4 엑서지 개선 잠재량

공정이나 시스템에서 엑서지를 개선할 수 있는 최대량은 비가역성이나 엑서지 손실을 최소화함으로 얻어진다. 이를 근거로 엑서지를 개선할 수 있는 잠재량(Improvement Potential, IP)을 식 (9)와 같이 도입하여 다른 시스템을 비교 분석하는 경우에 유용하게 사용할 수 있다.

$$\mathrm{IP} = (1-\epsilon)\left(\dot{E}x_i - \dot{E}x_o\right) \tag{9}$$

이외에도 연료파괴비, 상대적 비가역성, 생산성 손실, 엑서지 인자등 여러 가지 열역학적 인자가 제안되어 사용되고 있다.[3]

4. 결 과

매음리 지열지역난방 시스템에서 Fig. 2에 표시

된 각 상태점의 설계 입력데이터는 Table 1과 같으며, NIST Standard Reference Data를 사용하여 각 상태점에서 열역학적 특성을 구하여 정리하면 Table 2와 같다.

Fig. 2에 표시된 두 개의 열교환기에서 동일한 조건에서 작동하도록 설계되어 있다. 열교환기에서 21.04kW의 엑서지가 손실되며, 에너지율은 1,675kW가 되며, 열교환기의 엑서지 효율은 92.63%에 달한다. 지열정에 설치된 펌프에서는 15.21kW의 엑서지가 손실되며, 이 때 엑서지 효율은 49.31%이다. 지역난방에 순환수를 공급하는 순환펌프에서는 36.29kW의 엑서지가 손실되어 엑서지 효율이 54.64%가 된다.

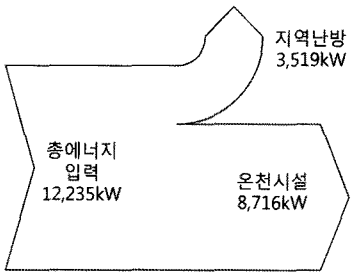

Fig. 3 MGDHS의 에너지 흐름

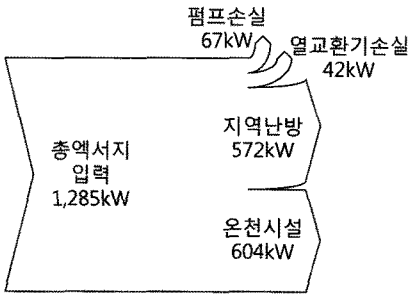

Fig. 4 MGDHS의 엑서지 흐름

매음리 지열지역난방 시스템에서 공급되는 총 에너지율이 12,235kW에서 지역난방으로 공급되는 에너지율이 3,519kW가 되므로, 에너지 효율은 28.8%가 된다. 엑서지 측면에서 보면, 시스템에 공급되는 총 엑서지는 1,285kW이며, 이 중에서 지역난방으로 공급되는 엑서지는 572kW에 달한다. 이때 엑서지 효율은 44.5%이다.

본 연구의 목적은 지열지역난방 시스템에 관한 엑서지 분석을 수행하는 것으로서, 향후에 시스템의 개선을 위한 주요 설계 및 성능인자에 대한 민감도 분석과 경제성 분석을 수행하는 것이 필요하다.

Table 2. 상태 번호별 열역학적 성질

상태 번호	비엔탈피 (kJ/kg)	비엔트로피 (kJ/kgK)	비엑서지 (kJ/kg)
0	21.12	0.07625	-
1	290.20	0.94652	27.01
2	293.29	0.95497	27.75
3	306.97	0.99519	30.25
4	310.05	1.00350	31.02
5	301.67	0.97932	29.36
6	301.67	0.97932	29.36
7	217.91	0.72950	15.09
8	301.67	0.97932	29.36
9	217.91	0.72950	15.09
10	272.26	0.89355	23.81
11	209.55	0.70370	13.91
12	272.26	0.89355	23.81
13	209.55	0.70370	13.91
14	272.26	0.89355	23.81
15	275.44	0.90204	24.63
16	209.55	0.70370	13.91
17	217.91	0.72950	15.09

5. 결 론

본 연구에서는 매음리 지열지역난방 시스템의 설계 데이터를 기반으로 에너지 및 엑서지 분석을 수행하였다. SExI가 0.029인 저엑서지 지열자원을 활용하여 지역난방에 활용하며, 지역난방에서 활용한 지열수는 온천시설에서 활용하기에 충분한 조건을 갖는다. 각 상태점에서 비엔탈피, 비엔트로피, 그리고 비엑서지를 계산하고, 이를 이용하여 열교환기와 펌프 그리고 시스템에서의 에너지 및 엑서지 효율을 계산하였다. 계산 결과를 바탕으로 에너지 흐름과 엑서지 흐름 다이어그램을 Fig .3과 Fig. 4에 표시하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 엑서지 분석을 통하여 에너지 분석 결과를 보완하며, 효율을 향상시키고 손실을 절감하

는데 활용할 수 있다.

(2) 매음리 지열지역난방 시스템에서 사용되는 지열자원은 저품질 지열자원으로 분류된다.

(3) 매음리 지열지역난방 시스템에서 에너지 효율은 28.8%이고, 엑서지 효율은 44.5%이다.

참고문헌

1. Lee, K. C., 2001, Classification of geothermal resources by exergy, Geothermics, Vol. 30, pp. 431-442
2. Ozgener, L., Hepbasli, A., and Dincer, I., 2005, Energy and exergy analysis of the Gonen geothermal district heating system, Turkey, Geothermics, Vol. 34, pp. 632-645
3. Ozgener, L., Hepbasli, A., and Dincer, L., 2005, Energy and exergy analysis of geothermal district heating system: an application, Building and Environment, Vol. 40, pp. 1309-1322
4. Ozgener, L., Hepbasli, A., and Dincer, I., 2004, Journal of Energy Resource Technology, Vol. 126, pp.293-301
5. Thermodynamics, An Engineering Approach 6th ed, 2008, McGraw Hill, New York
6. Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M., 1996, Thermal Design and Optimization, John Wiley and Sons, New York
7. Ozgener, L., Hepbasli, A., and Dincer, I., 2005, Energy and Exergy Assessment of Salihli Geothermal District Heating System, Proceedings of World Geothermal Energy Congress, Antalya, Turkey
8. Ozgener, O., Hepbasli, A., Dincer, I., and Rosen, M. A., 2005, Modelling and Assessment of Ground-Source Heat Pump Systems using Exergoeconomic Analysis for Building Applications, Ninth International IBPSA Conference, Montreal, Canada, pp. 915-920
9. Ozgener, O., and Hepbasli, A., 2005, Exergy Analysis of a Solar-Assisted Ground-Source (Geothermal) Heat Pump Greenhouse Heating System, Proceedings of World Geothermal Congress, Antalya, Trukey
10. Kotas, T. J., 1995, Ther Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida
11. Kemp, I.C., 2006, Pinch Analsys and Process Integration : A Users Guide on Proccess Integration for the Efficient Use of Energy, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
12. Dincer, I., and Rosen, M.A., 2007,Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Elsevier Science, New York