

# LNG 기지에서의 하절기 최소 BOG 재액화율 설정을 위한 방안 연구

김동혁, 홍성호, 홍영수\*, 최건희\*\*, 변재일\*\*\*

한국가스공사 LNG기술연구센터, 인천 LNG 기지\*, 평택 LNG 기지\*\*, 통영 LNG 기지\*\*\*

## A study on determination of minimum BOG mixing rates for summer season in LNG receiving terminal

D. H. Kim, S. H. Hong, Y. S. Hong\*, K. H. Choi\*\*, J. I. Byun\*\*\*

LNG technology research center Korea Gas Corporation

In-cheon LNG receiving terminal\*, Pyoung-taek LNG receiving terminal\*\*

### 1. 서론

국내 천연가스의 경쟁력을 제고(提高)를 위해 한국가스공사에서 운영중인 LNG (Liquified Natural Gas) 기지에 대한 안전 및 환경을 고려한 경제적인 LNG 기지 운전의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 이에 대한 최적 운전모드를 제시하기 위한 개선방안 연구가 절실히 필요한 상태로서 각 LNG 기지에서는 현장 공정개선을 통한 기지운영 안정화와 운영비용 감소에 많은 노력을 기울이고 있다.

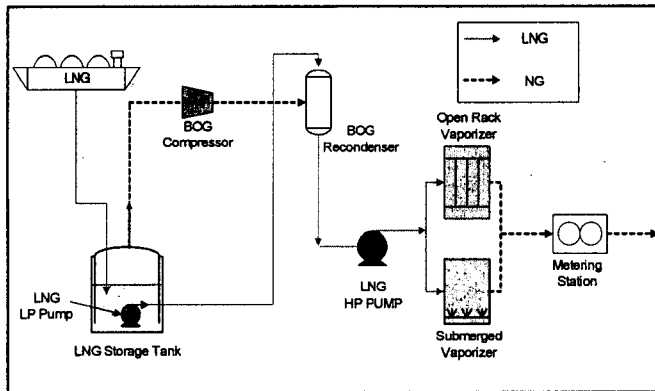


Fig. 1. LNG 기지 공정 개요도

Fig. 1은 LNG 기지에 대한 개략도로써 메탄가스가 주성분인 LNG는 물질의 특성상 상온에서는 액화되지 않고, 약  $-158^{\circ}\text{C}$  ( $1.13\text{kg}/\text{cm}^2, \text{abs}$ )로 온도를 낮추어야만 액화될 수 있다. 따라서 수입된 LNG는 극 저온 상태에서 탱크에 저장되고, 각 수요처로 공급될 수 있는 추진력을 얻도록 저압(LP : Low Pressure) 및 고압(HP : High Pressure) LNG 펌프를 통해 가압된다. 가압된 LNG는 해수 고압기화기 및 연소식 고압기화기에서 기화과정을 거쳐, 주배관 공급망을 통해 전국 수요처에 공급된다. LNG 기지 내 저장탱크는 LNG 극저온 상태를 유지하기 위해 단열재를 사용하여 기화를 최대한 억제하나, 외부 상온 온도에 의한 불가피한 열유입으로 저장탱크 내에서 LNG는 증발가스인 BOG(Boil-off gas)가 발생된다. 발생된 BOG 처리공정은 Fig. 1에서와 같이 BOG 압축기에서 압축되어 BOG 재액화기(BOG Recondenser)로 보내지며 이 재액화기 내에서 BOG는 LNG 저압펌프에서 송출된 LNG와 혼합되어 재액화된다. 재액화된 LNG는 LNG 고압펌프로 공급된다.

BOG 처리공정의 경우 천연가스 수요가 많은 동절기의 경우에는 문제점이 없으나 천연

가스 수요가 급감하는 하절기의 경우에 기지 운영상 어려움이 따른다. 그러한 이유는 BOG 재액화기 내로 공급되는 LNG는 하절기 수요감소로 그 공급량이 감소하고 따라서 재액화된 LNG의 온도는 상승하게 되며, 온도가 상승된 LNG는 LNG 고압펌프에서 공동화(Cavitation) 현상을 유발시킬 수 있기 때문이다. 따라서 하절기 안정적인 LNG 기지운영을 위하여 국내 세 LNG 기지에 대한 각각의 운영특성과 기기조건을 고려한 BOG 재액화기에서의 최소 LNG : BOG 혼합을 설정을 위한 실제 TEST와 분석작업이 수행되었다.

본 논문은 수행되었던 세 LNG 기지에 대한 혼합을 설정 TEST 및 분석 중 한 기지에 대한 TEST, 전산 시뮬레이터인 ASPEN PLUS를 이용한 공정분석 및 하절기 최소 혼합을 결정에 대해 분석하였다.

## 2. BOG 재액화기 LNG : BOG 혼합을 분석 조건

### 2-1 BOG 재액화 공정 설명

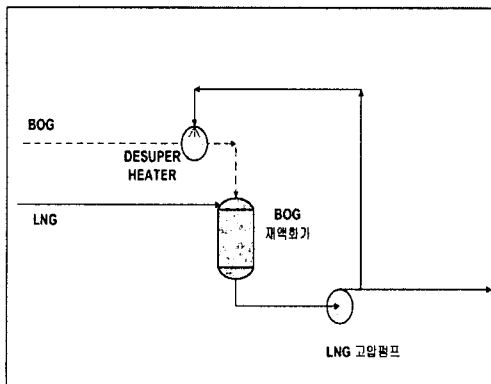


Fig. 2 LNG 기지에서 BOG 재액화 공정 개요

상기 그림은 LNG 기지에서 BOG 재액화에 대한 개략적인 공정도이다. BOG 압축기에서 토출된 BOG(35~55℃, 8.55kg/cm<sup>2</sup>g)는 BOG 사전냉각기(Desuperheater)에서 냉각되어(20℃) BOG 재액화기로 공급되는 데 냉각방식은 LNG 고압펌프에서 토출된 LNG를 혼합하여 온도를 낮추는 방식이다. 또한 LNG 저압펌프에서 토출된 LNG(-156.5℃, 11.8kg/cm<sup>2</sup>g)도 BOG 재액화를 위한 냉열 공급용으로 재액화기로 공급된다. BOG 재액화기 내에서 BOG와 LNG는 혼합에 의하여 BOG는 재액화 되며 재액화 압력은 8.25kg/cm<sup>2</sup>g 정도이다. 재액화된 LNG는 LNG 고압펌프에서 송압과정을 거친다.

BOG 재액화기의 제작사양서에서 제시된 최소 LNG : BOG의 혼합율은 7.33 : 1 즉 BOG 30Ton/h 기준일 때 LNG 최소 공급량은 220Ton/h이다. 이 기준에서 재액화되어 토출된 LNG의 온도조건은 -128.4℃이며, BOG 사전냉각기에서 토출된 BOG의 온도조건은 -1.2℃이다.

제작사양서에서 제시된 최소 혼합율인 7.33 : 1 조건이나 실제 이 조건이 하절기 기지 운영상에서 적절한 혼합비율인지 그 조건이 아니면 실제 운영상 문제가 발생되지 않은 최소 혼합비율점은 얼마인지를 TEST와 분석을 통하여 결정하는 것이 분석의 주 목적이다.

### 2-1 분석 조건

본 분석에서 사용한 공정해석 시뮬레이터는 ASPEN PLUS이며, 여기서 사용된 열역학 상태 방정식은 천연가스에 가장 적합한 Peng-Robinson 식을 적용하였다. 아래와 같이 나타낸 Peng-Robinson식에서 P, Pc는 시스템 압력과 임계압력, T, Tc는 시스템 온도와 임계온도, R는 기체상수를 나타내고 있다.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b) + b(v-b)}$$

$$\text{여기서, } a(T) = 0.45724R^2 \frac{T_c^2}{P_c} a(T)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\sqrt{a} = 1 + x \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right)$$

$$x = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

본 연구에서 이용할 LNG 및 BOG의 조성은 아래 <Table 1>과 같이 가장 평균적인 수치를 가르키는 조성값을 이용하였다.

<Table 1>Compositions of LNG and BOG

Components	Composition (mol%)	
	LNG	BOG
Methane	89.26	99.64
Ethane	8.64	0.02
Propane	1.44	-
iso-Butane	0.27	-
n-Butane	0.35	-
iso-Pentane	-	-
n-Pentane	-	-
Nitrogen	0.04	0.34
Carbon dioxide	-	-

### 3. LNG 기지 하절기 최소 LNG : BOG 혼합율 TEST

#### 3-1 TEST 개요

TEST는 BOG 재액화기로 인입되는 BOG 라인의 유량, 온도, 압력 조건을 고정시키고 재액화기 내로 인입되는 LNG 유량을 변경하여 원하는 BOG 재액화 혼합율에 도달시킨다. LNG 기지의 BOG 온도, 압력상태는 인입 전단에 위치한 BOG Desuperheater에 의해 하절기 운전상태와 동일하게 유된다. 재액화된 LNG 토출온도, BOG 재액화기 운전상태, LNG 고압 PUMP 운전 상태에 대한 데이터 확보한다.

TEST는 BOG 혼합율이 감소됨에 따라 즉 운전상황이 열악해 짐으로 인한 BOG 재액화기 및 LNG 고압펌프 운전 불안정성 발생이 보이려는 시점에서 종료한다. TEST에서 얻어진 데이터를 기초로 하여 LNG 기지 재액화 시스템 전산모델 구성하고, TEST시 수집된 자료를 이용한 재액화 LNG 토출온도 변화에 따른 BOG 재액화 시스템 실제 운전성능 분석, BOG Desuperheater 공급 LNG 유량 분석, 인천, 통영기지 실제 운전성능을 기초로한 재액화 LNG 토출온도 및 적정 재액화 비율 수립을 실시한다.

### 3-2 TEST 수행 내용

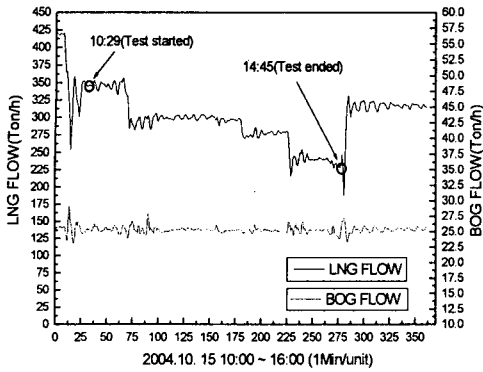


Fig. 3 재액화기 인입 LNG 및 BOG 유량

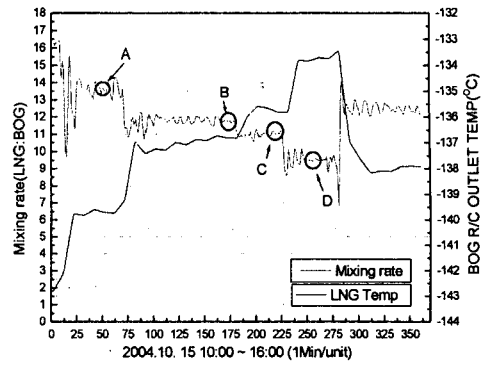


Fig. 4 혼합율 및 재액화기 토출 LNG 온도분포

분석 대상 LNG 기지의 TEST는 2004년 10월 15일 10시 29분 ~ 14시 45분에 걸쳐 실시되었다. Fig. 3은 TEST 기간에서의 재액화기로 인입된 LNG 및 BOG의 유량 변화사항을 보여주고 있다. X축은 10시 00분부터 16시 00분까지 1분 단위로 나타낸 것이다. LNG 유량은 재액화율 변화에 따라 유량이 변화하고 있으나, BOG 유량은 평균 25.25Ton/h 정도의 일정한 유량을 보이고 있음. 또한 TEST 기간에서의 BOG 인입온도 또한 20.2℃ 정도의 일정한 경향을 보이고 있었다.

Fig. 4는 TEST 기간에서의 LNG : BOG의 혼합율과 재액화기 내에서 토출되는 LNG의 온도변화를 보여주고 있다. TEST에서 시도된 재액화 혼합 비율점은 4개로 Fig. 4에서와 같이 A, B, C, D점이다.

Fig. 4에서 D점을 나타내는 혼합율 9.4~9.6:1(토출온도 -133.7~-133.8℃)은 14시 06분(X축 247)에 정상 상태로 도달된 후 14시 25분까지(X축 266) 유지되었다. 이후 혼합율을 9:1로 진입을 시도하였는데 이 때를 전후로 하여 운전상에 문제가 발생되었다.

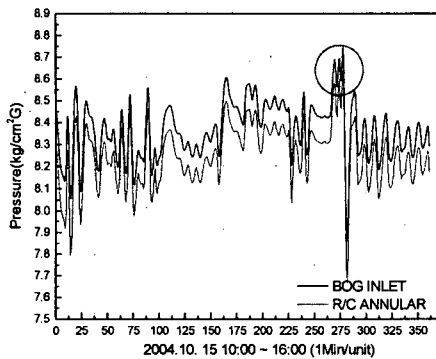


Fig. 5 재액화기 인입 BOG 압력 및 재액화기 운전압력

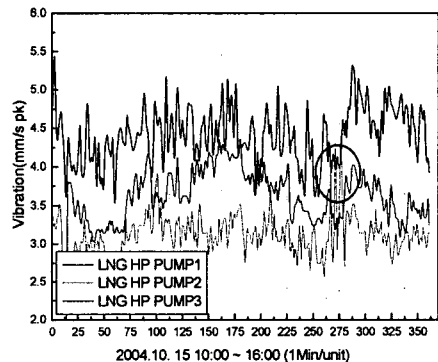


Fig. 6 LNG 고압펌프 진동측정

Fig. 5는 각각 Fig. 3,4와 동일한 기간에서의 BOG 재액화기로 인입되는 BOG 압력과 재액화기 운전압력(ANNULAR PRESSURE)을 나타낸 것이며, Fig. 6은 동일한 기간내에 대하여 가동중인 LNG 고압펌프의 진동 수치를 나타낸 것이다. TEST시 가동중이었던 3대의 LNG 고압펌프는 기존 펌프 운전시 양호한 성능을 보였던 기종이었다.

혼합비율 9.5:1 도달 후 정상적인 운전상태를 보이다가 정상상태 도달 약 19분이 경과한 후 혼합비율 9:1로 진입할 때 Fig. 5에서와 같이 재액화 운전압력이 상승하면서 이 결과로 재액화기 인입 BOG 압력 또한 상승하는 현상을 보였다. 재액화기 운전압력이 상승한다는 것은 혼합비율 감소에 의한 LNG 공급량 감소로 재액화속도가 저하된다는 것을 의미하며, 이러한 경우 운전압력 조절을 위하여 재액화기 내의 BOG를 BOG 압축기 인입 헤더로 재 공급하는 데 이 혼합비율 상태에서는 개방밸브를 100% 개방하여도 재액화기 내의 정상 운전압력 도달이 어려운 상태로 접어들었다. 즉 정상적인 재액화기 운전이 어려웠다.

또한 Fig. 6에서와 같이 9.5:1에서 9:1로 혼합을 감소시 운전 중이었던 LNG 고압펌프(LNG HP PUMP2)에서 급격하게 진동수치가 증가하며 또한 소음이 급격하게 발생하는 CAVITATION 징후현상을 보이기도 하였다. 다른 운전 PUMP에서는 이 혼합율에서 특이점을 보이지는 않았으나 TEST시 선정되었던 세대의 LNG 고압펌프의 경우 사전에 별다른 이상현상을 보이지 않았던 정상적인 펌프였다는 점을 고려한다면 이러한 혼합율에 따른 펌프 운전시 잠재적인 CAVITATION 위험요소를 갖고 있다고 판단되었다. 따라서 이러한 혼합비율 상태에서는 정상적인 BOG 재액화기 운전이 어렵다고 판단되었고 이 시점에서 TEST를 종료하였다.

### 3. TEST 결과분석

#### 3-1 TEST 포인트에서의 전산 시뮬레이션 분석

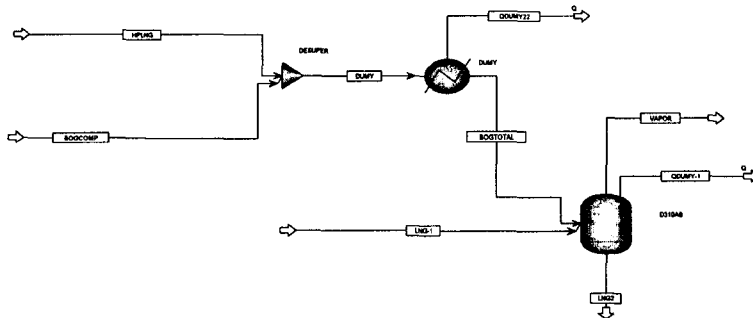


Fig. 7 LNG 기지 재액화시스템 전산모델 플로우 쉬트

<Table 2> LNG 기지 TEST D 점 전산시뮬레이션 분석

	HPLNG	BOGCOMP	BOGTOTAL	LNG-1	LNG2	VAPOR
Temperature C	-130.5	35	20.2	-156.5	-132.594	
Pressure kg/sqcm(Gage)	80.50	8.550	8.350	11.80	8.250	8.250
Vapor Frac	0	1	1	0	0	
Mass Flow kg/hr	1057	24193	25250	241000	266250	0
Volume Flow cum/hr	2.557865	4043.928	4074.006	533.7304	644.9511	0
Enthalpy Gcal/hr	-1.27107	-26.6024	-27.873	-295.379	-323.252	
Density kg/cum	413.2353	5.982549	6.197832	451.5388	412.822	
Mole Frac						
NITROGEN	0.0004	0.0034	0.003287	0.0004	0.000701	0
METHANE	0.8926	0.9964	0.992484	0.8926	0.903002	0
ETHANE	0.0864	0.0002	0.003452	0.0864	0.077762	0
PROPANE	0.0144	0	0.000543	0.0144	0.012957	0
I-BUTANE	0.0027	0	1.02E-04	0.0027	0.002429	0
N-BUTANE	0.0035	0	1.32E-04	0.0035	0.003149	0

Fig. 7은 재액화 혼합물 TEST를 분석하기 위해 ASPEN PLUS로 제작한 재액화 시스템에 대한 전산모델 플로우 쉬트이다. 또한 <Table 2>는 실제 TEST에서 얻어진 운전 데이터를 이용하여 전산모델로 분석한 TEST D점에 대한 재액화 시스템에 대한 결과물이다. 전체 TEST 점에 대한 분석 결과는 지면상 생략한다. 각 라인에 대한 설명은 아래와 같다.

HP LNG(BOG Desuperheater로 인입되는 고압 LNG 라인), BOGCOMP(BOG 압축기에서 토출된 BOG 라인), BOGTOTAL(BOG 재액화기로 인입되는 BOG 라인), LNG-1(BOG 재액화기로 인입되는 LNG 라인), LNG-2(BOG 재액화기에서 토출된 재액화 LNG 라인)

위 <Table 2>에서 VAPOR 라인은 재액화기 내에서 미액화된 LNG 발생 즉 BOG가 액화되지 못하고 증기상태로 남아있는 지를 알고자 하는 일종의 ALARM 장치로서 분석상의 의미는 없다.

### 3-2 BOG 사전냉각기(Desuperheater) 공급 LNG 유량 및 최소 혼합을 분석

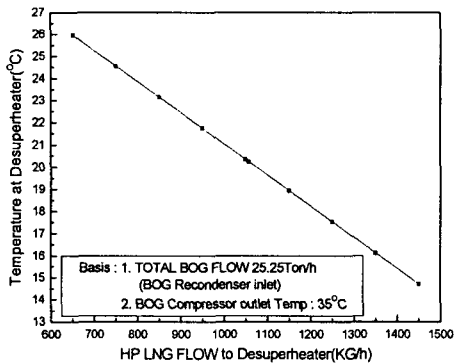


FIG. 8 BOG Desuperheater 공급 LNG 유량 분석

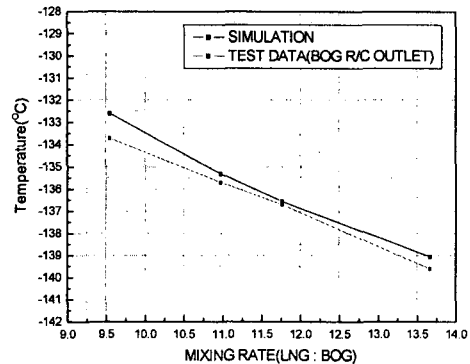


FIG. 9 BOG 재액화기 토출온도 분석

Fig. 8은 TEST 기간동안 BOG 압축기에서 토출된 BOG를 냉각하기 위해 BOG 사전냉각기에 공급된 고압 LNG 유량을 분석한 그림이다. TEST 기간동안 BOG 압축기에서 토출된 BOG의 온도는 약 35°C 조건이었으며, BOG 재액화기로 인입된 BOG의 온도 및 유량조건은 20.2°C, 25.25Ton/h이었다. 그러한 조건에서 BOG 사전냉각기로 공급된 고압 LNG 유량은 Fig. 8에서와 같이 약 1.057Ton/h로 분석되었다. 현 LNG 기지 운영에 있어서 BOG 사전냉각기로 공급되는 LNG는 전량 기화되어 BOG로서 작용하게 되며, 그 유량은 게이지 미설치로 측정할 수 없다. 따라서 그 공급 유량 확인은 전산모델 분석을 통한 간접 방식에 의해서만 분석이 가능하다.

Fig. 9는 BOG 재액화기에서 토출된 LNG 온도조건을 각 TEST 포인트(Fig. 4 A, B, C, D 점)에서 전산시뮬레이션에서 계산된 온도(검정 라인)와 실제 측정된 온도(붉은 라인)를 나타낸 그림으로서, 포인트 A점(혼합율 13.66:1), B점(혼합율 11.76:1), C점(혼합율 10.97:1), D점(혼합율 9.54:1)조건에서의 온도차는 각각 약 0.56°C, 1.4°C, 0.40°C, 1.1°C 정도 실제 측정 포인트가 더 낮게 나오고 있음을 보여주고 있다.

상기에서도 언급하였듯이 혼합율이 9.5:1 조건에서 9:1 조건으로 진입시 BOG 재액화기 운전압력 상승과 LNG 고압펌프에서 진동 및 소음이 발생한 것을 고려시, 하절기 LNG 기지 임계 혼합율은 9.5:1 조건으로 분석된다. 그러나 하절기 적용에 있어서 여러 운전변수의 변화(LNG 조성, 하절기 기온 등)에 대한 고려와 안전율을 고려시 최소 혼합율은 10.5:1

이라 판단되며, 이 혼합을 10.5:1 이상에서 운전하는 것이 적정하다고 분석된다. 혼합을 10.5:1에서의 BOG 재액화기 토출온도 조건은 Fig. 9에서와 같이 실제 계측온도 조건이  $-135^{\circ}\text{C}$ (전산 시뮬레이션 계산시  $-134.4^{\circ}\text{C}$  조건)으로 분석되었다.

#### 4. 결론

하절기 안정적인 LNG 기지운영을 위하여 국내 세 LNG 기지에 대한 각각의 운영특성과 기기조건을 고려한 BOG 재액화기에서의 최소 LNG : BOG 혼합을 설정을 위한 실제 TEST와 분석작업이 수행되었다.

본 논문은 수행되었던 세 LNG 기지에 대한 혼합을 설정 TEST 및 분석 중 한 기지에 대한 TEST, 전산 시뮬레이터인 ASPEN PLUS를 이용한 공정분석 및 하절기 최소 혼합을 결정에 대해 분석한 내용이다.

결과로서는 하절기 기지의 실제 운전특성을 고려시 BOG 재액화기의 LNG : BOG의 최소 혼합비율은 10.5:1로 분석되었다. 이 최소 혼합비율의 의미는 이 혼합비율 이상에서 운전 하려면 BOG 재액화기, LNG 고압펌프 등 관련 운전기기에 이상이 발생하지 않는 정상적인 운전 기준을 의미하는 것이다. 이 결과는 해당기지 BOG 재액화 시스템 제작사가 제시한 최소 혼합비율 점인 7.33:1과는 현격한 차이를 보이는 것으로 하절기 운전에 각별한 주의가 요망되는 점이다.

#### 참고문헌

1. 한국가스공사 운전지침서 vol 1, 2, 3, 2001
2. Tractebel engineering International, LNG terminal-Recondensing system Technical note, 1998
3. Warren L. McCabe, "Unit Operations of Chemical Engineering", 5th ed., McGraw-Hill, 1995
4. John R. Howell, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", SI ver., McGraw-Hill
5. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus User Guide ver. 2004
6. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus Unit Operation models, ver. 2004
7. Aspen Tech. Inc., Aspen Plus Physical property data, ver. 2004