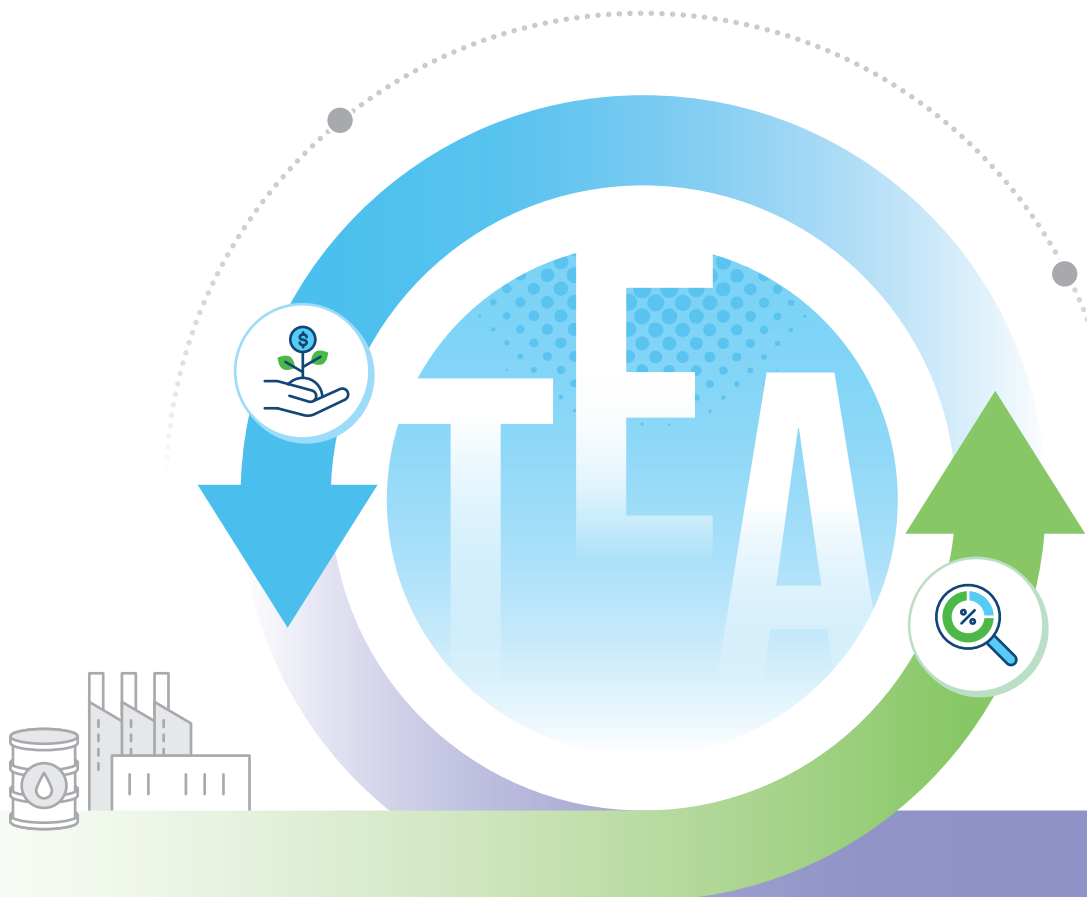


(기술·연구·표준) 동향

기술경제성평가(TEA) 개론 및 바이오연료 적용 사례



요약	3
제 1장 공정개념설계 및 공정흐름도	4
공정 개념 설계	4
PFD (공정흐름도)	5
제 2장 기술경제성평가 방법	7
제 3장 미세조류로부터 HBO/SAF 생산공정 흐름도	9
제 4장 TEA 결과 및 민감도 분석	11
제 5장 참고문헌	12

요약

바이오연료 전주기 기술 교육에서 바이오연료 공정에 대한 기술경제성 평가에 (techno-economic analysis; TEA) 대한 개론과 미세조류로부터 수첨바이오디젤 (hydrogenated bio-diesel; HBO) 및 항공기유 (sustainable aviationfuel; SAF) 생산공정의 사례에 대하여 다음 순서로 교육을 진행한다.

- 공정개념설계 및 공정흐름도
- TEA 방법 (Class 4)
- 미세조류로부터 HBO/SAF 생산공정 흐름도
- TEA 결과 및 민감도 분석

TEA는 주어진 생산공정에 대하여 공정흐름도(PFD; process flow diagram)를 구축하여 공정의 기술적 측면을 고려하는 동시에, PFD의 물질 및 에너지수지식 계산에서 도출된 흐름선 정보(온도, 압력, 유량, 조성)를 이용하여 공장건설을 위한 총투자비(TCI; total capital investment), 총생산비용(TPC; total production cost) 등을 산출하는 경제성 평가를 포함한다. 본 강의에서는 이러한 TEA에 대한 방법, 그리고 활용 사례를 교육한다.



제 1장 공정개념설계 및 공정흐름도

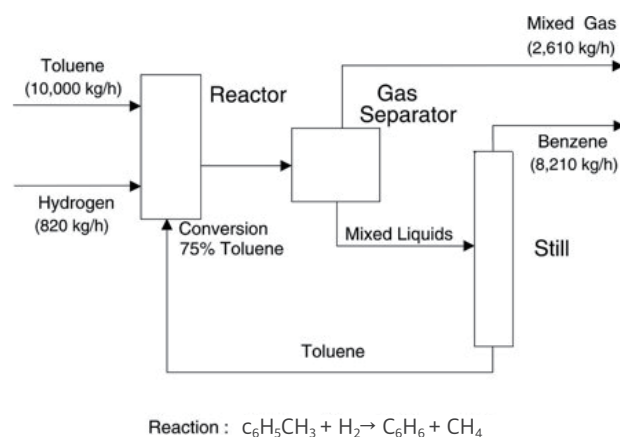
본 교재는 Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes (Turton et al., 5th ed. 2018)¹⁾를 기반으로 작성되었으며, 1장에서는 공정흐름도 (process flow diagram; PFD) 및 공정개념 설계 (process conceptual design)에 관하여 다룬다.

✎ 공정 개념 설계

공정설계에서 많이 쓰이는 공정 흐름도는

- Block Flow Diagram (BFD)
- Process Flow Diagram (PFD)
- Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)

등이 있다. BFD 는 전체 공정의 개괄적인 공정흐름도를 보여주고, 원료 및 생성물 등이 표시된다. 예로서 톨루엔으로부터 벤젠을 생산하는 공정의 BFD는 다음과 같다.



<Fig. 1.1> BFD for the production of benzene from toluene¹⁾

이를 보면서 다음과 같은 BFD 질문을 생각할 수 있고, 해당 질문에 대한 정보를 얻을 수 있다.

- Mass balance is met?
- What is the conversion 75% toluene?
- What about the recycle (toluene and H_2)?
- What component does the flue gas include?
- How to design the separation unit of the flue gas?
- If we use the distillation column, 3 columns are needed because 4 components exist in the flue gas.
- Let's calculate the flow rate of the recycle stream.
- How much is the excess H_2 flow rate?
- We have to consider the recycle of H_2 .
- Think about the environmental issues.

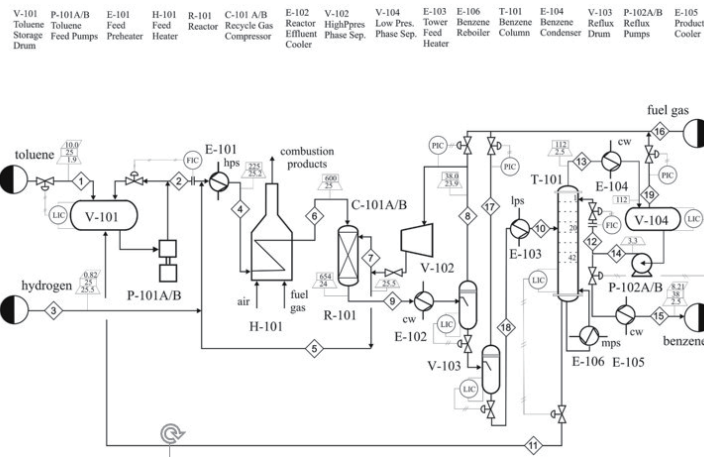
Excel을 이용하여 이 공정에 대한 mass balance 를 세워보면 다음과 같다. 이 계산으로부터 재순환 흐름선의 유량을 얻을 수 있다.

stream name	stream num	feed-tol	feed-H2	after Rx	flue gas	after flash	prod-ben	recycle
toluene	1	10000	820	14153	2341.701	11811.3	8478.049	3333.25
H2	2	0	820	603	603	0	0	0
benzene	3	0	0	8.478	8.478	8.478	8.478	0
CH4	4	0	0	1.733	1.733	0	0	0
conversion			0.750					
theoretical H2 flow rate/kg/h			217	250				
excess H2 ratio			3.8	2.8				

<Fig. 1.2> Calculation of recycle flow of a benzene production process using MS Excel²⁾

PFD (공정흐름도)

PFD는 전체 공정의 장치 및 장치간 흐름선 정보를 제공한다. PFD는 원료, 생성물, 흐름선 정보 (온도, 압력, 유량), 장치명, 그리고 공정제어 개념도를 포함한다. 예로서 톨루엔으로부터 벤젠을 생산하는 공정의 PFD는 다음과 같다.



<Fig. 1.3> PFD for the production of benzene via the hydrodealkylation of toluene¹⁾

장치명은

- XX-YYZ-A/B

형식을 취하며, X는 장치 약어, Y는 unit number, Z는 장치번호, 그리고 A/B는 여분의 장치 존재 여부를 표시한다. 예로서 P-301 A/B 는 pump, 3번 unit에서 1번째 장치로서 A/B 2개 장치를 교대로 사용함을 의미한다. PFD에는 공정흐름도 외에 흐름선 정보를 포함하며, 흐름선 정보는 다음 사항을 포함한다.

Essential Information

Stream Number
 Temperature (°C)
 Pressure (bar)
 Vapor Fraction
 Total Mass Flow Rate (kg/h)
 Total Mole Flow Rate (kmol/h)
 Individual Component Flow Rates (kmol/h)

Optional Information

Component Mole Fractions
 Component Mass Fractions
 Individual Component Flow Rates (kg/h)
 Volumetric Flow Rates (m³/h)
 Significant Physical Properties
 Density
 Viscosity
 Other
 Thermodynamic Data
 Heat Capacity
 Stream Enthalpy
 K-values
 Stream Name

PFD는 또한 장치에 대한 운전조건, 재질, 크기 등의 정보를 포함한다. 예로서 vessel 의 장치정보는 다음과 같다.

Table 1.4 Equipment summary (Vessel) ¹⁾

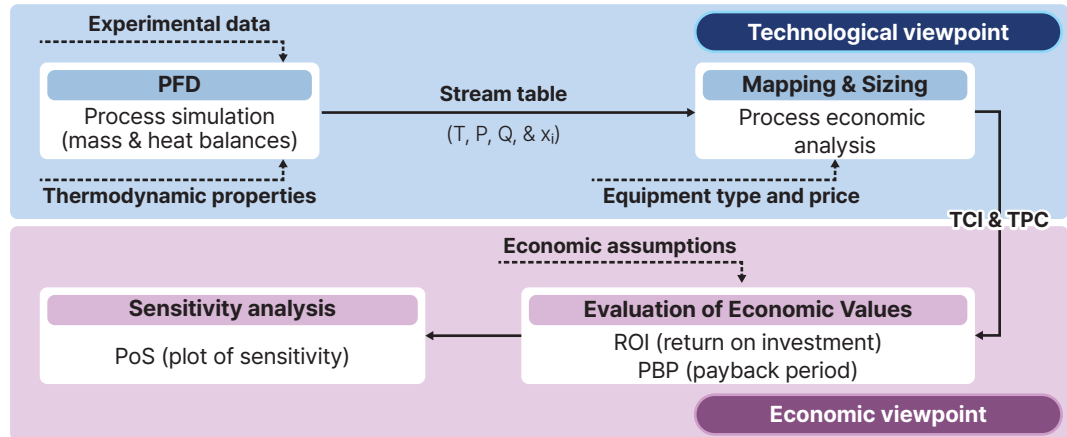
Vessel	V-101	V-102
Temperature (°C)	55	38
Pressure (bar)	2.0	24
Orientation	Horizontal	Vertical
MOC	CS	CS
Size		
Height/Length (m)	5.9	3.5
Diameter (m)	1.9	1.1
Internals		s.p. (splash plate)

* MOC: materials of construction / CS: carbon steel

PFD가 완성이 되고, 흐름선 정보가 계산되면, 기술경제성 평가를 위한 기초 정보가 완성된다.

제 2장 기술경제성평가 방법

Techno-economic analysis (TEA)는 기술적 측면과 경제성 측면을 모두 고려하면서, 해당 공정의 경제적 타당성을 검토하는 기법이다. 아래 그림은 TEA의 전체적인 개념을 보여준다.



<Fig. 2.1> Procedure of TEA³⁾

화학공정의 기술경제성평가(TEA)는 공정 개발 단계에서 기술 및 경제적 타당성을 예비적으로 검토하는 것에 초점을 두고 있다. TEA는 기술의 성숙도가 부족하더라도, 전체적인 공정흐름도를 구성하여 상용화 규모에서의 경제성을 분석함으로써 투자 가능성을 예비적으로 판단할 수 있는 근거를 제시한다. 위 그림에서 보여주듯이, 기술경제성 평가는 크게 기술성 측면과 경제성 측면으로 나누어 볼 수 있다.

기술적인 측면에서는 실험값, 열역학적 물성값, 열화학적 모델식, 알려진 지식 등을 바탕으로 공정 흐름도(PFD: process flow diagram)를 완성하고, 공정모사를 통하여 모든 단위 공정과, 유입/유출 흐름선에서의 질량 및 에너지 수지식을 계산한다. 공정모사 후, 각 단위공정 및 흐름선에서의 온도(T), 압력(P), 유량(Q), 그리고 조성(x_i)이 정해지며, 이들 정보를 바탕으로 각 단위공정에 대한 장치종류 및 크기를 결정한다. 이러한 mapping & sizing을 거친 후, 각 장치의 구입비를 산출하고, 장치구입비에 적절한 인자를 적용하여 최종적으로 총투자비(TCI: total capital investment)를 구한다. TPC(total production cost)는 운전비, 고정비, 에너지비용 등을 합산하여 구한다. 즉, 기술적 측면에서는 기술적 타당성을 확보하고, TCI와 TPC를 구하는 것이 주된 목적이다.⁵⁾

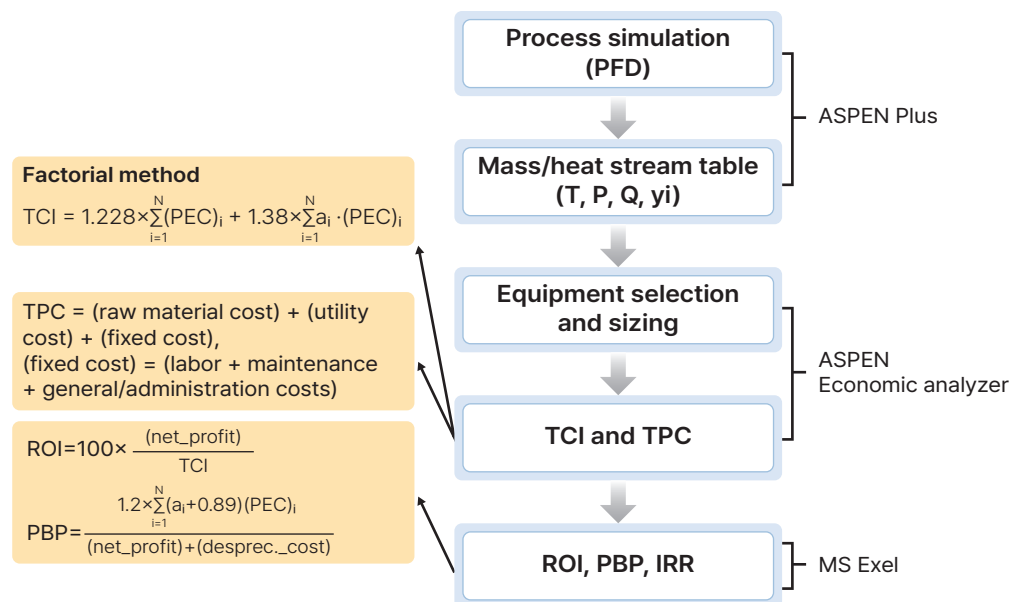
TCI는 산출하는 방법에 따라 5개의 등급으로 구분되며⁴⁾(Fig. 2.2참조), 본 교육자료에서 설명하는 방법은 예측 투자비 대비 실제투자비가 -20%에서 +30% 범위의 정확도를 갖고, PFD의 주요장치에 대하여 factorial method 혹은 stochastic method를 사용하는 Class 4(Study or Feasibility)이다.

경제적인 측면에서는 앞서 구한 TCI와 TPC를 이용하여 투자 결정의 기준이 될 경제성 인자를 도출한다. 경제성 판단기준으로는 TCI 대비 연간 순수익금의 비를 표현하는 투자수익률(ROI: return on investment)과 투자회수기간(PBP: payback period) 등이 있다.(Fig. 2.3 참조). 이러한 기술경제성 평가에서는 여러 경제성 가정들이 포함되며, 사용된 가정들의 불확실성으로 인하여 민감도 분석을 수행한다. Plot of sensitivity (PoS)는 경제성 가정값들의 변화에 따른 ROI와 PBP의 영향

을 보여주는 그래프로서, 경제성 가정값들의 상대적 변화율을 x축에 적용하여 무단위로 통일함으로써 모든 가정값들을 동시에 비교할 수 있는 장점을 갖는다.

Table 2.2 Cost estimate classification matrix for the process industries⁵⁾

	Primary Characteristic	Secondary Characteristic		
ESTIMATE CLASS	MATURITY LEVEL OF PROJECT DEFINITION DELIVERABLES Expressed as % of complete definition	END USAGE Typical purpose of estimate	METHODOLOGY Typical estimating method	EXPECTED ACCURACY RANGE Typical variation in low and high ranges
Class 5	0% to 2%	Concept screening	Capacity factored, parametric models, judgment, or analogy	L: -20% to -50% H: +30% to +100%
Class 4	1% to 15%	Study or feasibility	Equipment factored or parametric models	L: -15% to -30% H: +20% to +50%
Class 3	10% to 40%	Budget authorization or control	Semi-detailed unit costs with assembly level line items	L: -10% to -20% H: +10% to +30%
Class 2	30% to 75%	Control or bid/tender	Detailed unit cost with forced detailed take-off	L: -5% to -15% H: +5% to +20%
Class 1	65% to 100%	Check estimate or bid/tender	Detailed unit cost with detailed take-off	L: -3% to -10% H: +3% to +15%



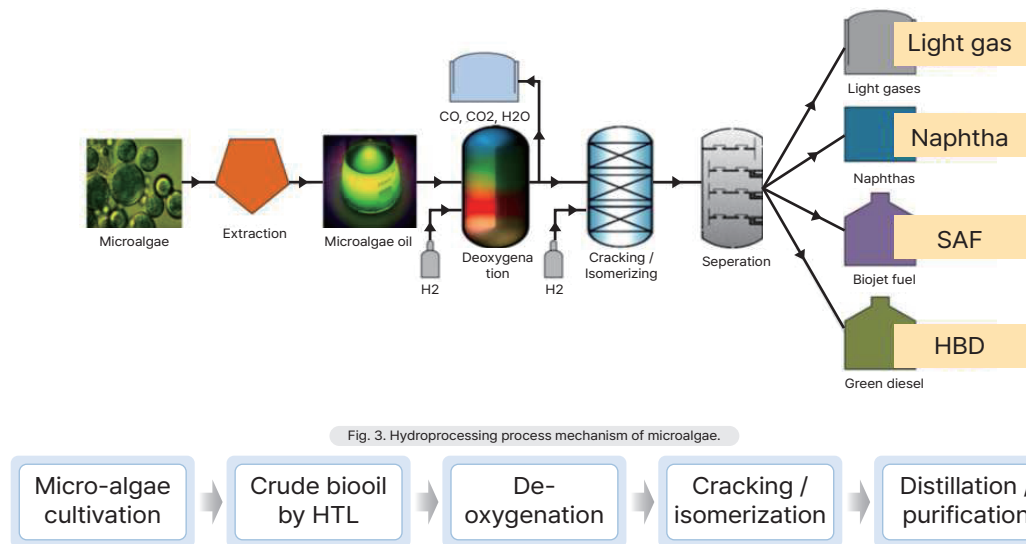
<Fig. 2.3> Methodology of TEA: evaluation of economic values⁴⁾

제 3장 미세조류로부터 HBO/SAF 생산공정 흐름도

미세조류로부터 HBO(hydrogenated bio-diesel) 와 SAF(sustainable aviation fuel)를 생산하는 공정의 공정흐름도는 아래와 같다 (Lim et al., 2021).

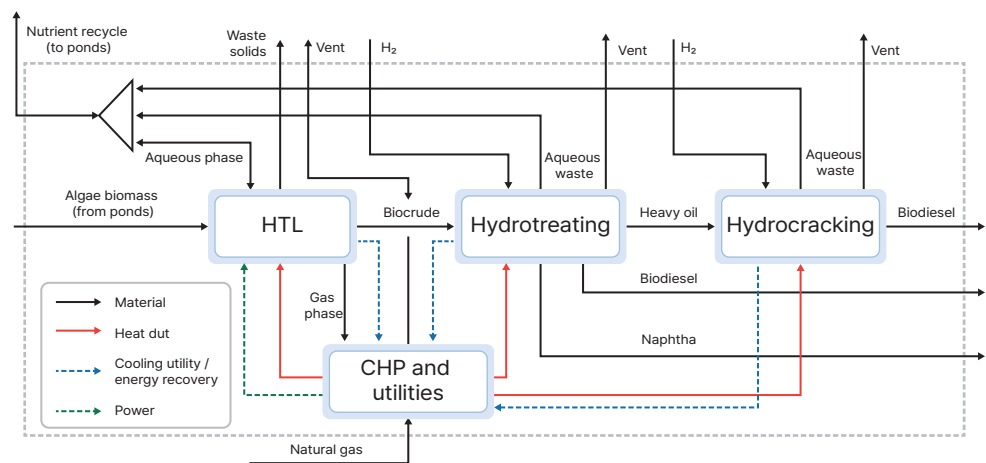
J.H.K. Lim et al.

Renewable and Sustainable Energy Reviews 149 (2021) 111396



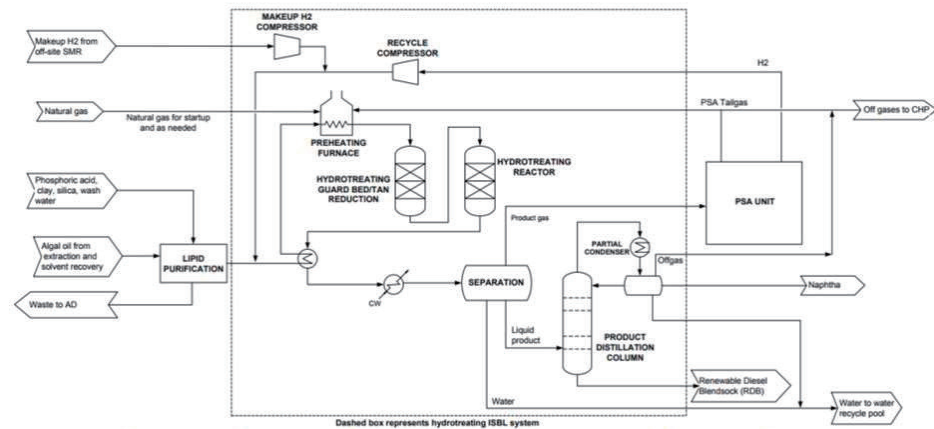
<Fig. 3.1> Hydro-processing from microalgae to produce HBD and SAF ⁶⁾

제안되는 전체 공정의 흐름도는 아래와 같이 제시되었다 (Peter et al., 2021).

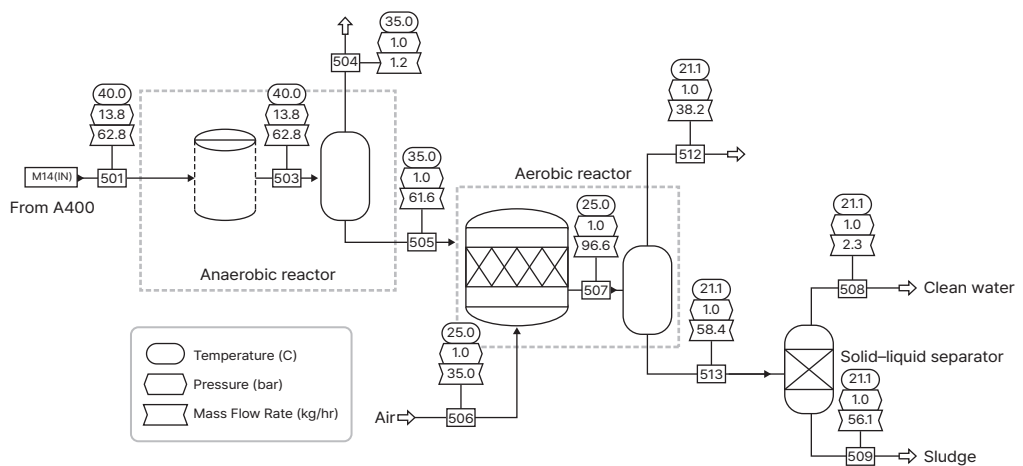


<Fig. 3.2> HBD/SAF production process from microalgae ⁷⁾

HBD/SAF 생산 공정의 각 unit별 공정흐름도는 Fig. 3.3 - Fig.3.5에서 각각 보여준다.



<Fig. 3.3> Hydrotreating unit in HBD/SAF production process ⁸⁾



제 4장 TEA 결과 및 민감도 분석

위에서 보여준 PFD를 바탕으로 얻은 stream table 은 다음과 같다.

Stream	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	M31			
Temperature (°C)		20.2	20.0	20.0	25.0	40.0	16.0	40.0	25.0	-21.4	-37.1	20.0	274.0	25.0	25.0	106.5	100.0	100.0	100.0	100.0	252.8	-13.6	181.0	20.0	274.0	20.0	-118.0	-38.3	-1.4	16.0			
Pressure (bar)		1.0	2.0	1.0	1.0	38.0	20.0	27.6	20.0	1.0	13.8	27.6	19.9	58.6	19.8	1.0	5.5	19.6	19.6	19.6	19.6	5.5	10.0	1.0	58.6	1.0	1.0	27.6	6.9	81.0			
Total flow (kg/h)		416.7	757.7	341.0	2,188.7	394.3	1,103.4	240.4	48.6	677.0	418.4	10.0	0.6	162.1	839.1	13.8	2.9	775.8	19.8	8.4	11.4	43.4	3,364.4	36.0	36.0	587.9	750.0	775.8	252.8	3,364.4	1,533.9		
Enthalpy (kW)		-480.5	-1,995.4	-1,515.0	-78.2	-1.2	-1,781.8	-1.1	-13.5	-736.7	-1,036.8	-21.5	-0.3	-590.0	-1,444.7	-61.2	-4.1	-1,393.1	-10.5	-4.7	-5.8	-16.0	-7,161.1	-131.7	-160.1	-2,139.1	-3,332.2	-1,496.1	-38.8	-7,122.1	-12.8		
Component flow rate (kg/h)																																	
H ₂ O		0.000	341.000	341.000	20.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	162.138	1.306	13.800	0.000	1.306	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	36.031	36.031	587.863	750.000	1.306	0.000	0.000	0.000		
N ₂		0.000	0.000	0.000	1,663.275	17.238	28.359	223.041	0.001	27.955	0.339	0.000	0.000	0.000	27.955	0.000	0.285	27.955	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	27.955	221.944	0.000	1,422.996	
O ₂		0.000	0.000	0.000	505.037	376.918	0.000	17.360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.217	0.000	110.759		
H ₂		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	39.489	0.000	0.000	39.440	0.019	0.000	0.000	0.000	37.437	0.000	0.000	26.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	26.920	0.006	0.000	0.000	
CO		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	555.771	0.000	0.010	553.240	1.747	0.000	0.004	0.000	303.178	0.000	0.000	224.346	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	224.346	0.242	0.000	0.000	
CO ₂		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	469.643	0.000	0.392	48.239	407.429	0.000	0.032	0.000	441.136	0.000	0.000	441.136	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	441.136	13.315	0.000	0.000	
C		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14.679	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CH ₄		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.120	0.000	0.001	7.854	0.235	0.000	0.000	0.000	7.854	0.000	0.000	54.126	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	54.126	0.020	0.000	0.000	
Phenol		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.691	0.000	23.128	0.000	0.000	0.000	0.574	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
H ₂ S		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.376	0.000	0.004	0.036	1.496	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.054	0.002	0.000	
NH ₃		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
C ₁₂ H ₂₂		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
AIR		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
NO ₂		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Argon		0.000	0.000	0.000	0.300	0.185	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.100	
Methanol		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.188	7.150	10.000	0.000	0.000	0.188	0.000	2.395	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3,364.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Wax		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Gasoline		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Diesel		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Coal		416.700	416.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ash		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.377	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

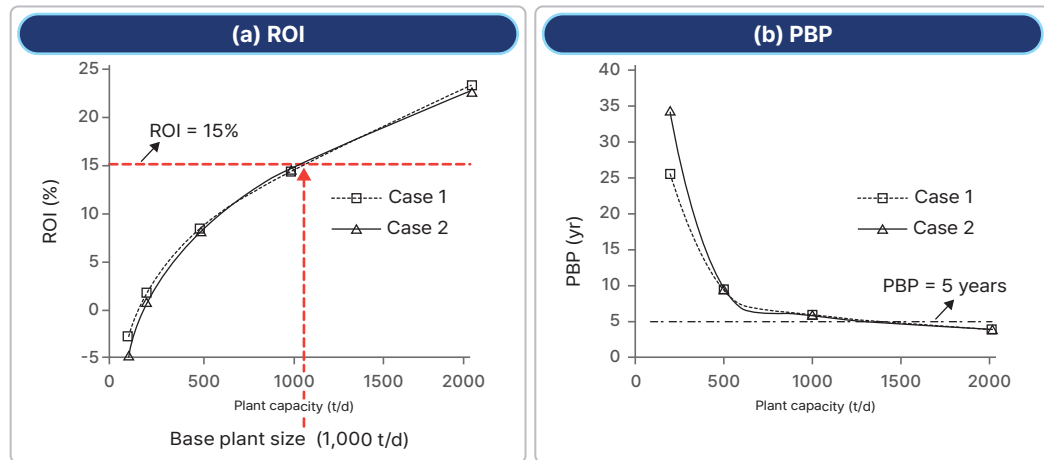
<Fig. 4.1> An example of stream table.

위에서 얻은 흐름선 정보를 통하여 TEA 과정을 거쳐 최종적으로 경제성 평가 지표 결과를 Table 4.1에서와 같이 얻을 수 있다.

Table 4.1 Economic values from TEA

		Case 1	Case 2
Financial values	TCI (Total capital investment, \$M)	64.53	44.64
	TPC (Total production cost, \$M/yr)	34.32	52.07
	ASR (Annual sale revenue, \$M/yr)	57.14	68.29
	DC (depreciation cost, \$M/yr)	3.07	2.13
	GPavg (average gross profit, \$M/yr)	19.75	14.09
	Corporate Income tax (\$M/yr)	4.34	3.10
	CFavg (average cash flow, \$M/yr)	10.48	7.40
	EP4 (\$M/yr)	9.14	6.47
Economic criteria	ROI (return on investment, %)	14.17	14.50
	PBP (payback period, yr)	5.86	5.75
	IRR (Internal rate of return, %)	23.6	23.3

Plant 용량별 ROI와 PBP의 민감도 분석 결과는 다음과 같다.



<Fig. 4.2> Results of sensitivity analysis

제 5장 참고문헌

- 1) Turton et al., Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, 5th ed., 2018.
- 2) 임영일, “공정설계 및 경제성 분석” 대학원 강의 자료, 한경국립대학교, 화학공학과, 2023.
- 3) -Young-Il Lim, JinSoonChoi, HeungManMoon, and KookiKim (2016), Linze-Donawitz가스로부터 일산화탄소(CO)분리를 위한 흡수 및 흡착공정에 대한 기술경제성 비교, Korean Chem. Eng. Res., 54(3), 320-331.
- 4) Chang-ho Oh and Young-Il Lim (2018), Process simulation and economic analysis of fast pyrolysis and hydro-processing biooil production process from sawdust, Korean Chem. Eng. Res., 56, 496-523.
- 5) Christensen, P. and Dysert, L. R., “Cost Estimate Classification System”, AACE (American Association of Cost Engineering) International, Practice No. 17R-97(2011).
- 6) Lim et al. (2021), Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: Challenges and perspective, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149, 111396.
- 7) Peter H. Chen, Jason C. Quinn (2021), Microalgae to biofuels through hydrothermal liquefaction: Open-source techno-economic analysis and life cycle assessment, Applied Energy, 289, 116613.
- 8) R. Davis, C. Kinchin, J. Markham, E.C.D. Tan, and L.M.L. Laurens (2014), Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Biofuels: Algal Biomass Fractionation to Lipid- and Carbohydrate-Derived Fuel Products, NREL, NREL/TP-5100-62368

(기술·연구·표준) 동향

기술경제성평가(TEA) 개론 및 바이오연료 적용 사례



한양대학교



본 이슈 리포트는 산업통상자원부의 국가 표준 기술력 향상 사업인 '수송 및 발전 분야의 바이오연료 보급 활성화 기반 조성' 과제의 수행 일환으로 제작되었습니다.