

## 유기성 폐기물에 대한 병합 혐기성 소화 (CO-DIGESTION)

### 1. 병합 소화(CO-DIGESTION) 공정의 배경

#### 병합 소화란?

신재생에너지 확충과 기후변화 협약에 대한 적극적인 대응이 요구됨에 따라 단순 매립되던 폐기물을 에너지로 전환하여 처리하는 방식이 각광받았으며 정부 계획 하에 적극적으로 추진되고 있습니다.

이는 에너지 잠재력이 큰 하수찌꺼기, 분뇨, 음식물폐기물 등을 혐기성 소화공정으로 처리하여 바이오 가스(메탄 함량 약 60%)를 생산하거나 활용하는 방식입니다. 국내의 현황으로는 환경부에서 공고한 “2022년 유기성 폐기물의 바이오가스화에 대한 정책 방향”을 통해 더욱 자세히 확인 가능합니다. 이는 환경부 홈페이지를 통해 볼 수 있습니다.

### 2. GPS-X 를 통한 CO-DIGESTION 모델링

#### GPS-X를 통한 통합 소화 모델링의 장점

GPS-X는 운영상의 주요 영향 인자들을 동적(dynamic state), 정적(steady state)으로 모사할 수 있는 폐수 처리장의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램입니다.

사용자는 GPS-X를 통해 운영 중인 처리시설과 신설 처리시설의 다양하고 복잡한 운영조건 및 데이터를 수집 분석한 것을 토대로 시뮬레이션하여 최적의 운전 효율을 달성할 수 있습니다. 또한, 비용 절감 및 운영의 안정성을 확보하는데 있어 의미가 있겠습니다.

GPS-X를 통한 통합 소화(CO-DIGESTION) 모델링을 통해 다음을 알 수 있습니다.

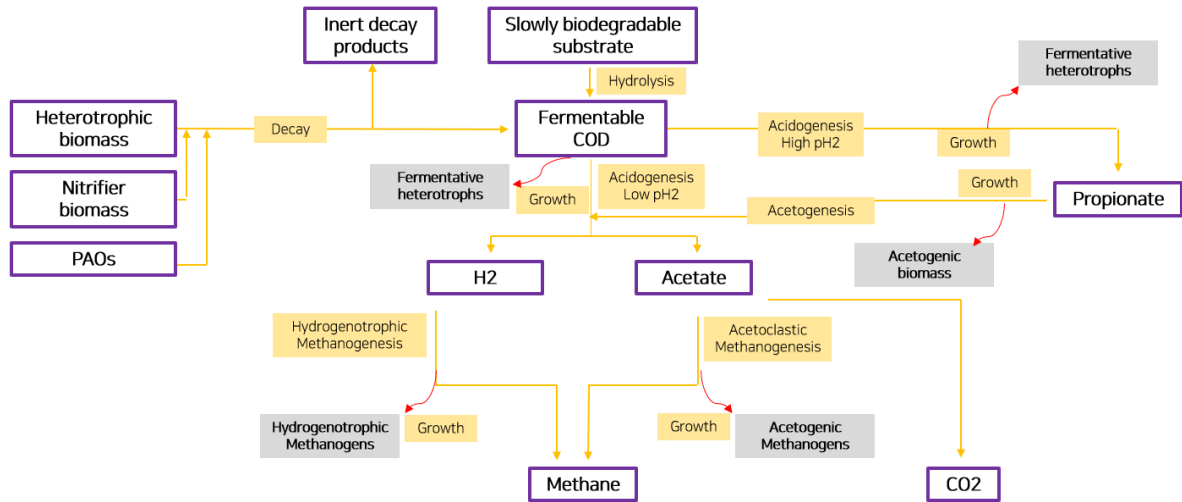
1. 초과되는 소화조 용량 결정
2. 에너지/영양소 회수 가능성 평가
3. 폐수 흐름 공정에 미치는 영향에 대한 위험도 평가
4. 경제성 분석

#### 혐기성 소화조란?

환경 문제를 해결하는 동시에 화석연료 대체에너지를 생산하기 위해 “혐기성 소화조”가 사용됩니다. 혐기성 소화조를 통해 유기물은 슬러지의 분해 과정을 거쳐 “메탄”으로 변화됩니다. 유기물의 COD가 가스상태의 메탄으로 변함으로써 실질적으로 유기물의 제거가 이루어진 것입니다. 이번 챕터에서는 이러한 혐기성 소화조의 원리에 대해 간략히 설명 드립니다.

## GPS-X의 Mantis 2 모델

혐기성 소화조의 모델링을 위해 Mantis2 모델이 사용됩니다. 이는 Hydromantis에서 개발한 GPS-X의 여러 모델 중 하나입니다. Mantis2 모델에서 혐기성 소화 공정의 개략도는 다음과 같습니다.



첫 번째 과정은 “가수분해” 과정으로 미생물이 가진 체내외 효소에 의해 고분자 물질이 저분자 물질로 분해되는 과정이며, 두 번째 과정은 휘발성 유기산(volatile fatty acid; VFA) 및 H<sub>2</sub> 가스로 분해되는 “산생성” 과정이고, 마지막 세번째 과정은 두번째 과정에서 생성된 산물을 이용하여 메탄을 생성하는 “메탄생성” 과정입니다. (Briones et al., 2009)

중요한 것은 각 단계에서 다양한 미생물학적 메커니즘에 따라 혐기성 소화조는 안정적이고 지속적인 운전이 가능하다는 점입니다. 따라서, 이러한 구조를 이해할 필요가 있겠지만, 모든 과정을 설명하기에는 내용이 많습니다. 본 자료에서는 메탄 생성 과정만을 집중적으로 설명합니다.

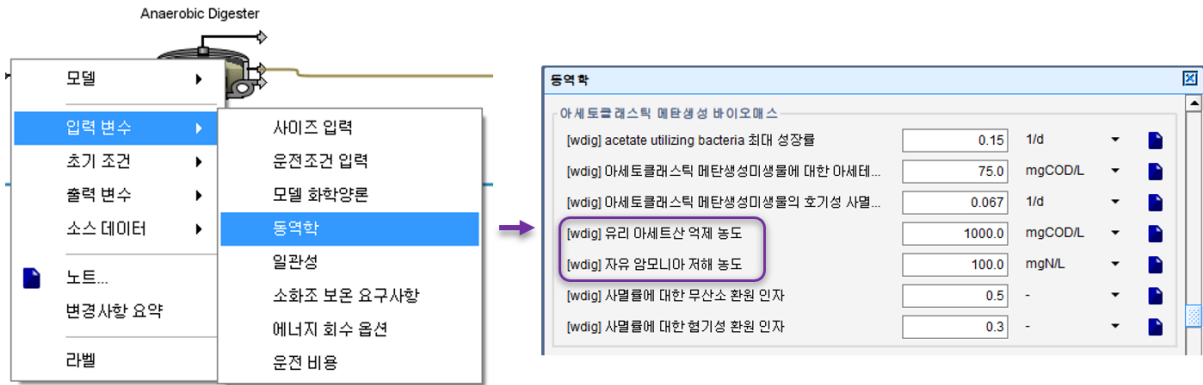
### 메탄 생성이 저해되는 이유

혐기성 소화조에서 가수분해 및 산생성반응이 메탄생성반응 보다 빨리 진행된다면, 아세테이트 등 중간 생성물이 소화조내 축적되어 pH가 낮아지고, 비 이온화된 유기산의 농도가 높아져 결국 메탄생성균 (Acetogenic Methanogens)의 성장에 저해를 일으키게 됩니다. 즉, 혐기성 소화공정의 성공적인 운전은 이와 같은 일련의 혐기성 반응들의 동력학적인 균형에서 찾을 수 있습니다. 메탄생성 과정은 기본적으로 산생성 과정보다 성장 속도가 느리기에 메탄생성균 성장 환경 요건에 맞추어야 합니다.

### 메탄 생성을 저해하는 “중간 생성물”

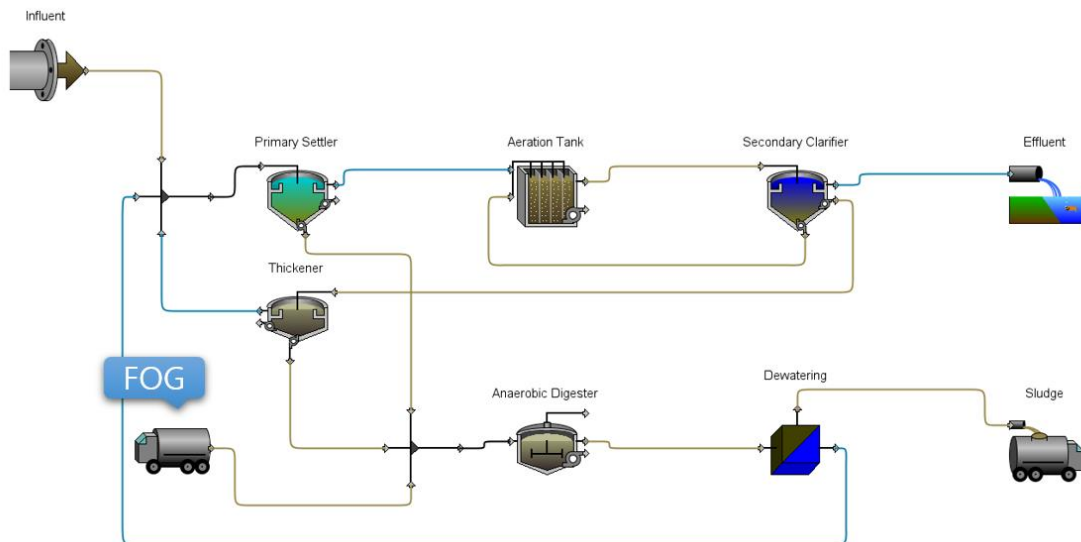
중간 생성물로 불리는 휘발성 유기산(volatile fatty acid; VFA)은 소화조 운전의 전반적 상황을 나타내는 지표입니다. 유기산은 축적될 시 소화조의 pH를 저하시키고 소화 효율을 감소시킵니다. 따라서, 이후 시물레이션에서는 휘발성 유기산 중 대표적인 하나인 “아세테이트”의 양에 따라 소화조 운전 상태를 평가해보고자 합니다.

참고로, 메탄 생성을 저해하는 대표적인 중간 생성물로 자유 암모니아(free ammonia)와 유리 아세트산(free acetic acid)이 있으며, 이에 대한 “농도”는 공정 객체의 입력 변수에서 설정할 수 있습니다. 그 외에도 미생물 작용에 관여하는 농도 또는 계수들을 동역학과 화학양론 메뉴를 통해 확인하고, 조정하시기 바랍니다.

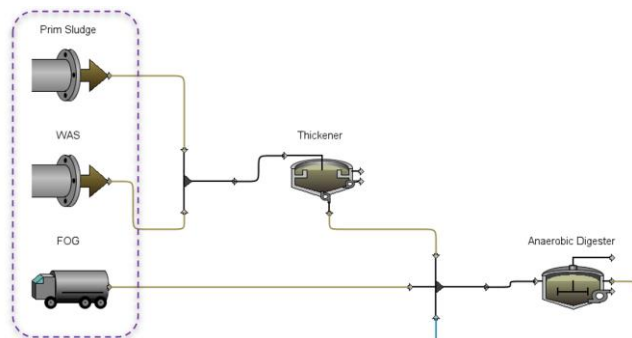


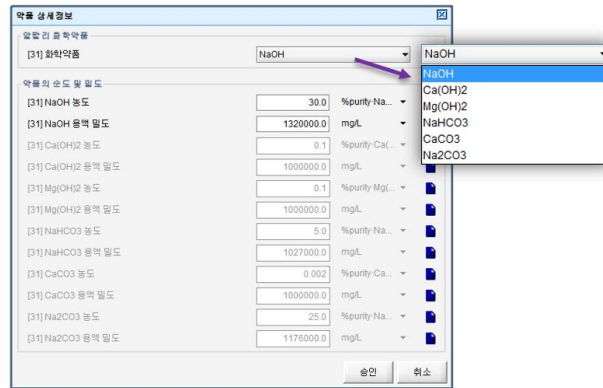
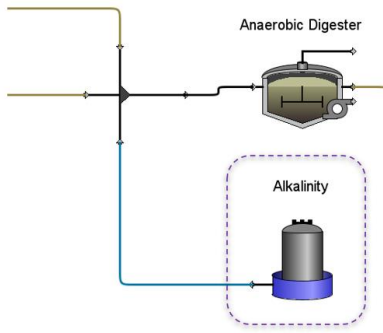
### 병합 소화(CO-digestion)의 레이아웃

이번 챕터에서는 기본적인 활성슬러지 공법의 레이아웃을 작성하였고, “폐수 흐름”과 “슬러지 흐름”을 모두 표현하였습니다. 여기에 FOG(지방, 오일, 기름)가 처리될 수 있도록 공정을 추가하였습니다.



물론 사용자는 단순화를 위해 “슬러지 흐름”만을 별도로 표현하여, 음식 폐기물, 분뇨 등을 추가하여도 좋습니다. 또한, 혐기성 소화조의 pH조절을 하고자 하거나 미생물의 활발한 활성을 위해 알칼리도를 유지하고 싶다면 “아칼리 주입” 객체를 추가하셔도 좋습니다.





### 3. 유입 폐수의 성상 결정하기

#### 유입수 조연자 설정하기

통합 소화조 모델링에 있어 가장 중요한 것은 “하수처리과정 흐름의 특성화”입니다. 적절한 화학양론의 확인을 위해 유입수 조연자 설정 방법을 이번 챗터에서 소개합니다.

음식폐기물에 대한 유입수 성분은 특정 산업에 따라 다르며, COD와 질소 비율(COD/nutrient ratio) 또한 매우 다양합니다. 비활성 COD 분율(Inert COD fraction)은 바이오 가스 생산에 중요한 영향을 끼치지만, 어떠한 음식에서 나온 폐기물인지에 따라 많은 차이가 있습니다.

경험적으로 Hydromantis에서 제안하는 유입수 조연자 특성화 방법과 기준은 다음과 같습니다:

- ✓ 알고 있는 농도를 입력하고, 문제가 발생할 수 있는 변수를 확인하여 수정합니다.
- ✓ COD, 암모니아, 인은 일반적으로 도시의 폐수 농도의 100 배에서 1000 배 사이입니다.
- ✓ COD의 대부분은 느리게 그리고 쉽게 생분해 가능한 기질의 조합에 따라 특성화 됩니다.
- ✓ 음의 농도를 피하기 위해 “질소 분율”을 줄이는 것이 일반적입니다.
- ✓ pH는 일반적으로 유입 폐수보다 낮습니다.

유입수 조연자 - 라이브러리: mantis2lib - 유입수 모델: codstates - 생물학적 모델: mantis2

사용자 입력	유입수 구성	단위	값
	cod	총 COD	gCOD/m3 430000
	tkn	총 TKN	gN/m3 2089.0
	tp	총인	gP/m3 100.0
	- 질소 화합물		
	snh	암모니아성 질소	gN/m3 389.0
	snoi	마질산염	gN/m3 0.0
	snoa	질산염	gN/m3 0.0
	- 인 화합물		
	sp	오르토인산	gP/m3 14.0
	xpp	PAO에 저장된 다인산염	gP/m3 0.0
	- 유입수 분율		
	ivstotss	VSS/TSS 비율	gVSS/gTSS 0.75
	- 유기물 분율		

변수	단위	값
so	DO	gO2/m3 0.0
+ 기타 용해성 가스		
+ 기타 용해성 유기 변수		
+ 기타 입자성 유기 화합물		
- 질소 변수		
snh	암모니아성 질소	gN/m3 389.0
snoi	마질산염	gN/m3 0.0
snoa	질산염	gN/m3 0.0
- 기타 질소 변수		
snd	용해성 유기 질소	gN/m3 -2110
xns	느리게 생분해하는 기질에서 질소	gN/m3 -493
- 인 변수		
sp	오르토인산	gP/m3 14.0

알고 있는 농도 입력

여기가 발생한 상태 변수 확인

- 유기물 분율			
frsi	총 COD의 용해성 비활성분율	-	0.1
frss	총 COD의 생분해성 분율	-	0.15
frxi	총 COD의 입자성 비활성 분율	-	0.1
frscol	느리게 생분해하는 COD의 콜로이드 분...	-	0.15
- 질소 분율			
frsnh	용해성 TKN의 암모니아 분율	-	0.9
inxi	용해성 비활성 물질의 N 함량	gN/gCOD	0.001
inxi	비활성 입자성 물질의 N 함량	gN/gCOD	0.001
- 인 분율			
ipsi	용해성 비활성 물질의 P 함량	gP/gCOD	0.001
ipxi	비활성 입자성 물질의 P 함량	gP/gCOD	0.001
- pH와 알칼리도			
ph	pH	-	5.0
alkalinity	탄산염 알칼리도	gCaCO3/m3	250.0
- 무기 화합물			

적절한 매개변수의 조정

“사용자 입력 변수”는 유입수 객체를 어떤 모델로 설정하였는지에 따라 다릅니다. 모델들의 종류와 포함된 변수들 그리고 유입수 조연자의 특수한 기능은 “튜토리얼 매뉴얼” 또는 “사용자 매뉴얼”을 통해 확인해 보시기 바랍니다.

#### 4. 시뮬레이션 실행 및 운전 결과 보기

##### 정상 상태 시뮬레이션

앞서 FOG를 위한 고농도의 유입 폐수 성상 적용이 완료되었습니다. 이제 정상 상태 시뮬레이션을 통해 혐기성 소화조의 동작을 확인해 보겠습니다. 결과는 “퀵 디스플레이 패널”과 “그래프”를 통해 확인하겠습니다. 퀵 디스플레이 패널은 GPS-X에서 사용자가 각 공정 객체에 대해 가장 궁금해할 정보를 모아둔 결과 창입니다. 그래프는 확인하고자 하는 정보를 미리 설정해 두었고, 과정은 생략합니다.

이제 FOG가 유입이 되었을 때 혐기성 소화조의 운전 방향을 확인해 보겠습니다. 먼저 FOG의 유입이 없다는 가정하에 운전하기 위해 유량 값을 “0” m3/d로 설정하였습니다. 이 후, FOG의 유량을 “10”m3/d로 증가시켜 정상 상태 시뮬레이션을 다시 실행한 결과입니다.

gas : 2143 m3/d  
15 : 83.65 m3/d  
wdig : 83.65 m3/d  
na4 : 0

Simulation Results

	15	wdig	na4
유량	m3/d	93.65	93.65
TSS	mg/L	48370	23730
VSS	mg/L	35040	10250
COD	mg/L	82440	22130
암모니아성 N	mgN/L	65.69	1104
용해성 PO4-P	mgP/L	7.869	76.43
TP	mgP/L	422.6	422.6
리도	mgCaCO3/L	233.3	4015
DO	mgO2/L	5.91	7.069
		0.0	0.0

FOG 유량 적용 후

	wdig	gas
수리학적 체류 시간	d	47.82
유효 HRT	d	47.82
VSS 부하율	kgVSS/(m3.d)	0.557
VSS 파괴	%	69.07
제거되는 VSS 질량당 가스 생성량	m3/kgVSS	1.393
총 가스 유량	m3/d	2143
CH4 함량	%	54.68
CO2 함량	%	44.95

가스 생성량

	wdig	gas
수리학적 체류 시간	d	42.71
유효 HRT	d	42.71
VSS 부하율	kgVSS/(m3.d)	0.8203
VSS 파괴	%	70.74
제거되는 VSS 질량당 가스 생성량	m3/kgVSS	1.756
총 가스 유량	m3/d	4077
CH4 함량	%	54.46

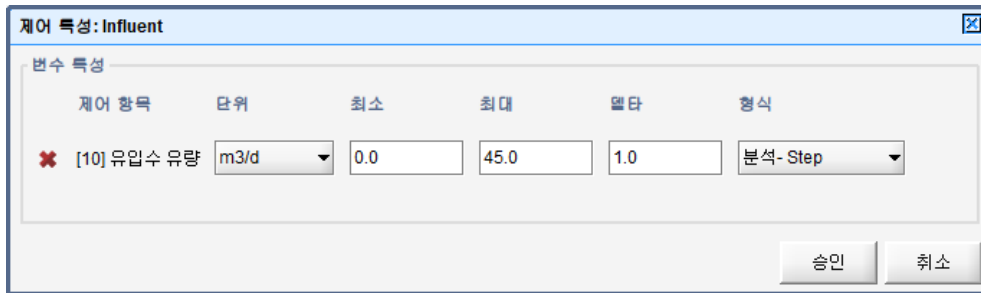
Mass Flows

	15	wdig	na4	gas	총 In	총 Out
TSS	kg/d	3111	1571	0.0	3111	1571

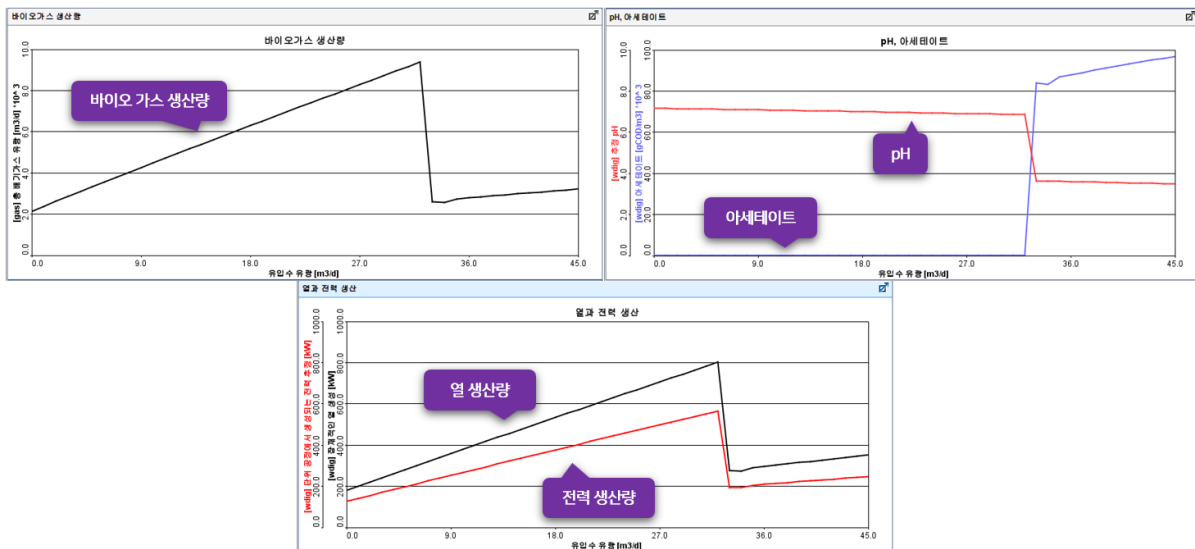
pH는 약 "7.2"에서 "7.1"로 감소하였으며, 총 가스 유량은 "2,143" m3/d에서 "4,077" m3/d로 대폭 증가하였습니다. FOG는 풍부한 에너지를 갖고 있으므로 혐기성 소화조 내 메탄 생성이 활발히 이루어 졌습니다. pH 또한 혐기성 소화조 동작에 따라 감소하는 방향으로 움직였고, 아직은 적정의 pH 수준입니다. (혐기성 공정의 적정 pH는 6.5~7.5)

**민감도 분석을 통한 최적의 FOG 유입 유량 산정**

이번에는 "민감도 분석"을 통해 FOG 유량에 따른 혐기성 소화조의 운전 상태 변화를 보겠습니다. 시뮬레이션을 초기 상태로 돌린 상태에서 다음을 수행하였습니다.



FOG의 유입수 유량이 최소 "0" m3/d에서 최대 "45" m3/d까지 단계별로 "1"씩 증가하며 운전 결과가 나타도록 설정하였습니다. 결과에서 사용자는 X축이 FOG의 "유입수 유량"으로 설정된 것을 확인할 수 있습니다.



모두 "32"m3/d 부근에서 급격한 변화가 나타났습니다. 메탄생성 과정은 산생성 과정보다 느리게 작동하기 때문에 현재 시스템에서 "32"m3/d 이상의 FOG 유입은 휘발성 지방산의 축적을 일으키고 pH가 크게 저하되었으며, 메탄생성균의 활동 저해로 가스 발생량 또한 크게 감소하였습니다. 현재 가능한 최적의 바이오 가스 생산을 위해 과부하가 발생하지 않는 적정 FOG 유입 유량을 확인할 수 있었습니다.

**참고.** 환경부의 "바이오가스화 시설의 기술지침서"를 따르면, 휘발성지방산 축적에 의해 pH가 저하된 경우에는 휘발성지방산이 완전히 분해될 때까지 슬러지 유입속도를 줄이는 방법과 라임(Ca(OH)2), NaHCO3 또는 NaOH, KOH 등을 주입하여 pH를 정상적으로 유지시키도록 제시하고 있습니다.

혐기성 소화조의 출력 변수: 해리되지 않은 물질

혐기성 소화조 운전 실패는 메탄 생성을 저해하는 해리되지 않은 물질들과 관련이 있습니다. 혐기성 소화조의 출력 변수에서 "pH와 알칼리도" 탭을 통해 해리되지 않은 암모니아, 해리되지 않은 아세테이트 등 값의 변화를 확인할 수 있습니다. (GPS-X 8.5 이상에서만 확인 가능)

pH와 알칼리도			
Undissociated Concentrations			
[3] undissociated concentration of TIC (soluble)	17.41	gC/m3	▼
[3] undissociated concentration of ammonia	0.002124	mgN/L	▼
[3] undissociated concentration of nitrite	0.0	mgN/L	▼
[3] undissociated concentration of phosphorus (solu...	0.002257	mgP/L	▼
[3] undissociated concentration of acetate	0.01238	gAc/m3	▼
[3] undissociated concentration of propionate	0.0008192	gPr/m3	▼
[3] concentration of calcium (soluble)	0.3968	gCa/m3	▼
[3] concentration of magnesium (soluble)	0.1493	gMg/m3	▼
[3] concentration of potassium (soluble)	19140	gK/m3	▼
[3] 양이온 전하 당량	1316	eq/m3	▼
[3] 음이온 전하 당량	0.01347	eq/m3	▼
Ionic Concentrations			
[3] concentration of HCO3-	42.98	gC/m3	▼
[3] concentration of CO32-	0.1192	gC/m3	▼
[3] concentration of H2PO4-	147.8	mgP/L	▼
[3] concentration of HPO42-	82.12	mgP/L	▼
[3] concentration of Ac-	4.585	gAc/m3	▼
[3] concentration of Pr-	0.2003	gPr/m3	▼
[3] concentration of PO43-	0.002171	mgP/L	▼
[3] in reactors = concentration of NH4+in reactors	0.06576	mgN/L	▼
[3] concentration of NO2-	4.243e-07	mgN/L	▼

혐기성 소화조의 에너지 회수 옵션

에너지 회수 옵션

에너지 회수 옵션

CH4의 에너지 회수

[wdig] 보일러의 CH4%  %

[wdig] 보일러의 열효율  -

[wdig] CHP의 CH4 %  %

[wdig] CHP 열 회수율  -

[wdig] CHP의 전력 회수  -

[wdig] CH4 전이율

[wdig] 소각기 효율  %

메탄 회수에 따른 열/에너지 생성 결과

메탄 회수에 따른 열/에너지 생성 결과

CH4 회수로 인한 열 생성

[wdig] 보일러의 잠재적 열 생성  kW

[wdig] CHP의 잠재적 열 생성  kW

[wdig] 잠재적인 열 생성  kW

[wdig] 잠재적인 열 부족  kW

[wdig] 잠재적인 연료 결감  m3/d

CH4 회수로 인한 전기 생성

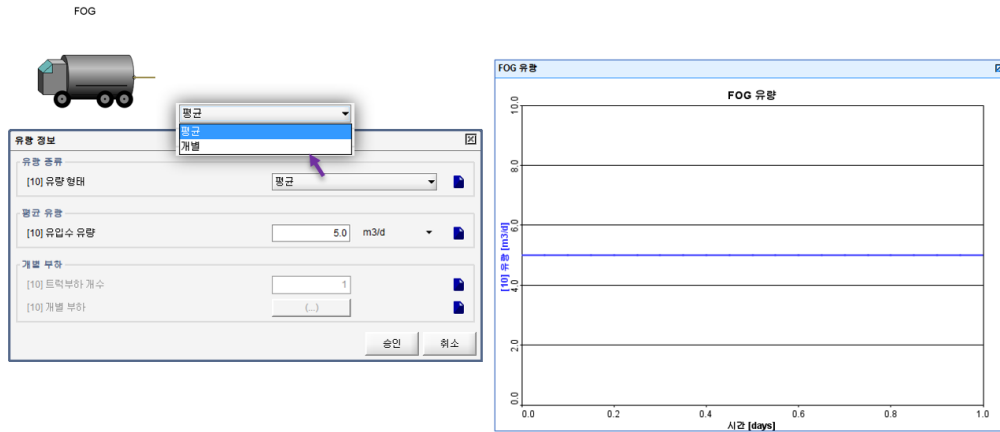
[wdig] 단위 공정에서 생성되는 전력 추정  kW

혐기성 소화조의 에너지 회수 옵션을 통해 사용자는 바이오 가스가 보일러를 위해 사용되는 열이나, 열병합발전(CHP)을 통해 전기와 열을 모두 생성할 것인지 선택할 수 있습니다. 또한, 혐기성 소화조의 운전을 위해 필요한 열의 부족 양을 확인할 수 있습니다.

이는 블로그에 업데이트된 "온실가스 모델링을 위한 시뮬레이션 검토"([링크](#))에서 이미 설명 드린 바 있습니다. 동일한 내용으므로 추가적으로 설명하지 않겠습니다.

## 5. 음식 폐기물 동적 운반 (DYNAMIC LOADING) 설정

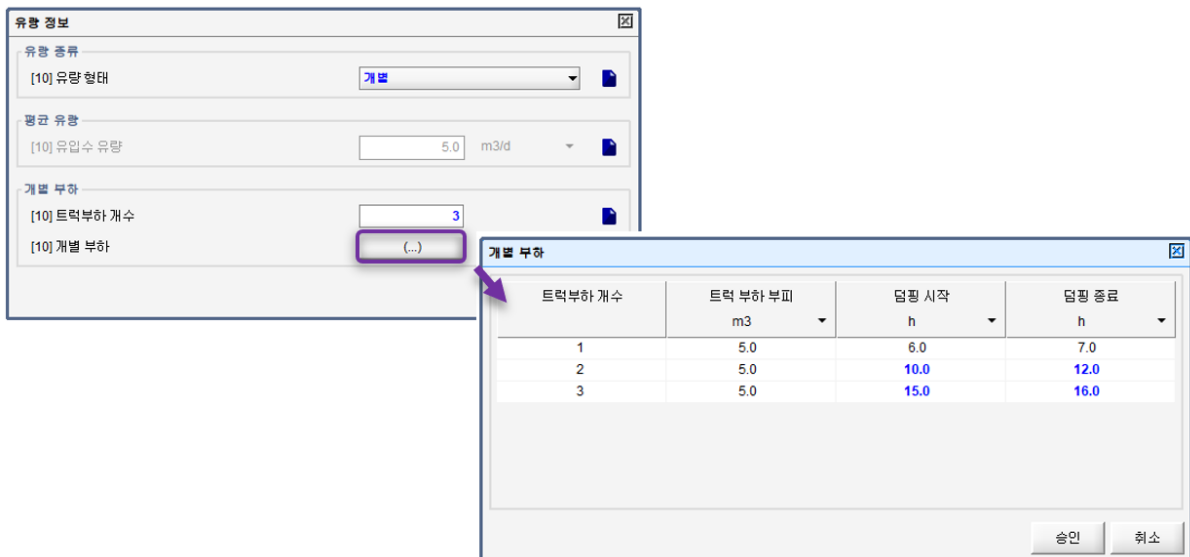
### Batch 유입 객체 설정



Batch 유입 객체를 클릭하고, **유량 정보** 탭에 접근하여 위와 같은 메뉴를 확인할 수 있습니다.

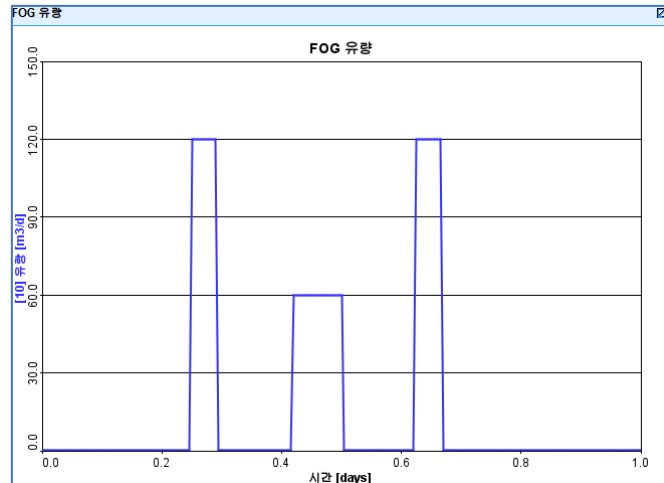
유량 형태는 기본 값인 “평균”으로 적용되어 있습니다. 이는 직접 유입수 유량 값을 입력하고 이를 하루 동안 일정하게 분배되도록 합니다. 위 그림에서 유입수 유량이 “5”m3/d로 설정되었고, 그에 따른 시뮬레이션 결과 그래프가 보입니다.

이번에는 유량 형태를 “개별”로 변경하고, 트럭의 수를 설정하여 폐기물 부하량이 하루동안 동적으로 적용 되도록 하겠습니다.

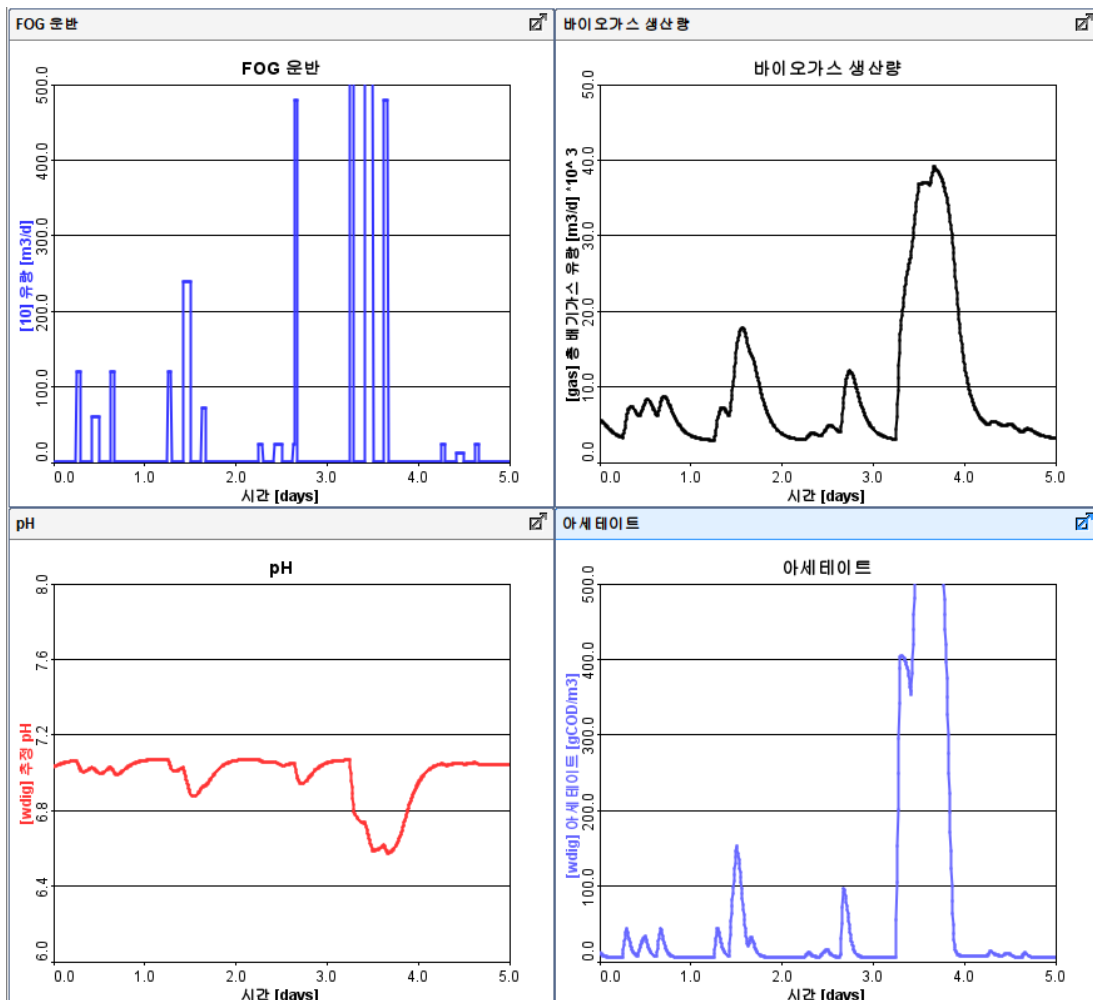


이제 1번 트럭은 5m3 부피의 양을 아침 6시에 시작하여 7시까지 운반합니다. 3 개의 트럭의 부피는 모두 같으나 2번 트럭의 운반 시간은 2 시간으로 다른 트럭들과 차이가 있도록 하였습니다. 시뮬레이션을 통한 운전 결과는 다음과 같습니다.





이번에는 5일동안 동일한 시간에 트럭의 부하 부피에 변화를 주며 혐기성 소화조의 운전에 어떠한 영향을 미치는지 분석해 보겠습니다.



앞서 매일 오전 6시, 10시, 오후 3시에 음식 폐기물이 들어온다 설정하였습니다. 1일과 2일에 부하량을 올리자 pH가 떨어졌다 시간이 지나면서 회복되는 것이 보입니다. 이후 3일 째에 부하량을 크게 높이자 혐기성 소화조에 과부하가 생기고, 중간 생성물의 큰 축적이 확인됩니다. 이처럼, 사용자는 시스템을 여러 운전 조건으로 설정해가며 과부하 이후 복구 과정을 검토할 수 있습니다.