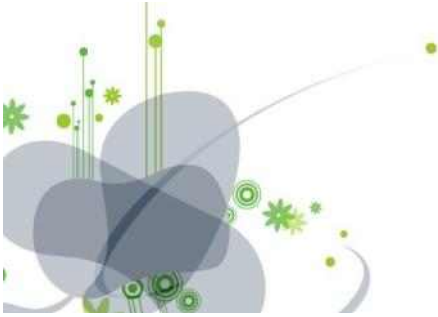


국내외 자원순환 기술 및 연구 동향 자료집

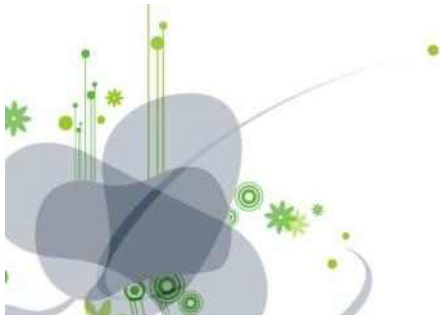


2016. 4



일 러 두 기

1. 본 자료집은 자원순환형 매립지 관리 및 폐자원에너지화 관련 국내·외 기술·연구 동향을 분야별로 조사하여 SL공사 내 관련 사업을 지원하기 위해 제작 되었습니다.
2. 자료의 활용을 위해 자료집 파일은 수도권매립지관리공사 그룹웨어 (커뮤니티 > 지식공유방 > 환경기술동향 서비스)에 게시되어 있어 이용하실 수 있습니다.
3. 자료집에 기술된 인용자료 및 관련 자료는 인터넷에서 검색하시거나 연구개발처에 요청하시면 이메일로 받아보실 수 있습니다.
4. 본 자료집의 자료를 인용시 출처를 명기하시고 자료의 무단 사용을 금하여 주시길 바랍니다.



목 차

자료집 요약	1
--------------	---

I. 매립지 관리 분야

1. 매립지 내부 화재 사례	1
-----------------------	---

※ 매립지 내부 화재 발생 원인, 지표, 사례 및 방지·진압 방법

II. 침출수 처리 분야

1. RO 시설 국내외 사례	49
-----------------------	----

※ RO 일반 기술, 국외 RO 침출수 처리 사례, 국내 RO 침출수 처리 사례,
국외 RO 폐수 처리 사례, RO 농축수 매립지 장기간 재순환 지속가능성

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례	83
----------------------------	----

※ 뉴욕 Seneca Meadows 매립지 RO 침출수 재순환 현황, 포르투갈
매립지 침출수 RO 처리 및 농축수 재순환 평가, 침출수 RO 농축수
매립지 재순환 실험연구

III. 폐자원에너지화 분야

1. SRF 시설 국외 사례 119
※ 벨기에, 영국, 독일, 이탈리아 MBT 플랜트 운영 사례
2. 유럽 폐기물 성장 및 MBT 시설 특성 143
※ 유럽 폐기물 처리 현황, 유럽 폐기물 성장, 소각시설 대비 MBT 시설의 장단점, MBT 시설 법적 기준, MBT 시설 사례(오스트리아, 독일)
3. 해외 폐자원에너지타운 관련 사례 173
※ 독일 윤데, 마우엔하임, 오스트리아 뮌헨, 슈피텔라우, 귀싱, 일본 오가와마치, 마이시마, 쿠즈마키 폐자원에너지화 타운 에너지 활용현황 및 지원정책
4. 일본 음식물 바이오가스화 사례 189
※ 일본 지바, 도쿄, 고베, 오사카, 히타치, 히타, 도야마, 가이세이, 오키, 다이센 바이오가스화 시설 사례

IV. 하수슬러지 분야

1. 하수슬러지 건조 기술 · 사례 211
※ 슬러지 건조 기술 및 에너지 효율, 하수슬러지 열적건조 기술사례, 하수슬러지 태양열 건조 기술 사례, 하수슬러지 생물학적 건조 기술사례

V. 기타 분야

1. 전시회 및 세미나 기술동향 267
※ 제37회 국제환경산업기술 & 그린에너지전 기술동향, 폐자원에너지화 핵심기술과 최근 사업동향 교육 심포지엄

[축약어]

ATEX(Equipment for potentially explosive atmospheres) 유럽지역에서 사용되는 모든 방폭기기에 대한 안전 인증제도

BFB(Bubbling Fluidized-Bed) 기포 유동층 보일러

BOD(Biochemical Oxygen Demand) 생화학적 산소요구량

CAPEX(Capital Expenditures) 미래의 이윤을 창출하기 위해 지출된 비용

CE(conformite europeenne) EU시장 내 안전에 관련된 통합 인증마크

CFR(Code of Federal Regulation) 미국 연방 정부 법률

CHP(Combined Heat and Power Generation) 열병합발전

CO(Carbon Monoxide) 일산화탄소

COD(Chemical Oxygen Demand) 화학적 산소요구량

Countywide RDF(Recycling and Disposal Facility) Countywide 폐기물 재활용 처분 시설

DS(Dry Solids) 건조 고형물

DT(Disc Tube) 디스크 튜브

EC(Electric Conductivity) 전기 전도도

EEG(Erneuerbare Energien Gesetz) 독일 재생에너지법(Renewable Energy Sources Act)

EPA(Environmental Protection Agency) 미국 환경부

EVOH(Ethylene Vinyl Alcohol) 에틸렌비닐알코올

FGD(Flue Gas Desulfurization) 배연탈황석고

FIT(Feed In Tarrif) 발전차액지원제도

FML(Flexible Membrane Liner) 합성차수막

GIW(Gas Injection Well) 가스주입정

HDPE(High Density Polyethylene) 고밀도 폴리에틸렌

HOV(Higher Operativ Value) 고성능 운전 기준

IPPC(International Plant Protection Convention) 국제식물보호협약

LCA(Life Cycle Assessment) 전과정평가

MBR(Membrane Bioreactor) 멤브레인 바이오리엑터

MBS(Mechanical-Biological Stabilisation) 기계적·생물학적 안정화 전처리시설

MBT(Mechanical Biological Treatment) 폐기물 전처리시설

MF(Microfiltration) 정밀여과

MEK(Methyl Ethyl Ketone) 메틸에틸케톤

MGD(Million Gallons per Day) 백만 gal/일

MLD(Million Liters/Day) 백만 L/일

MPS(Mechanical Physical Stabilisation) 열풍건조 폐기물 전처리시설

MPS(Multi Pass System) 다중 흐름 시스템
MRF(Materials Recovery Facility) 물질회수시설
NCV(Net Calorific Value) 순발열량
NF(Nanofiltration) 나노여과막
NSPS(New Source Performance Standard) 미국 EPA가 규정한 신설 도장공에서의 용제 사용량의 규제
OU(Operable Units) 운영 구역
PLC(Programmable Logic Controller) PLC 컨트롤러
pg-TEQ/L(Toxicity Equivalency) 다이옥신 단위
POTW(Public Owned Treatment Works) 공공처리시설
RDF(Refuse Derived Fuel) 폐기물 고형연료(성형)
RO(Reverse Osmosis) 역삼투압
RPF(Refuse Plastic Fuel) 플라스틱 고형연료
RPS(Renewable Portfolio Standard) 신재생에너지 의무할당제
RTO(Regenerative Thermal Oxidizer) 축열식 소각로
SBR(Sequential Batch Reactor) 연속배치형반응기
SCA(Svenska Cellulosa Aktiebolaget) 스웨덴 제지기업
SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 집중원격감시제어시스템
SOP(Standard Operating Procedures) 표준운전절차
SPDES(State Pollutant Discharge Elimination System) 오염물질 배출통제계획
SRF(Solid Refuse Fuel) 폐기물 고형연료
TC(Total Carbon) 총탄소
TDS(Total Dissolved Solids) 총용존고형물
TEDA(Tianjin Economic-Technological Development) 텐진경제개발지역
T-N(Total Nitrogen) 총질소
TKN(Total Kjeldahl Nitrogen) 총킬달질소(유기질소 + 암모니아성 질소)
TOC(Total Organic Carbon) 총유기탄소
T-P(Total Phosphorus)총인
TS(Total Solids) 총고형물
TSS(Total Suspended Solids) 총부유고형물
UF(Ultrafiltration) 중공사막
UTC(United Technologies Company) **Power** 미국 연료전지 회사
VOC(Volatile Organic Compound) 휘발성 유기 화합물
VS(Volatile Solid) 휘발성 고형물

[자료집 요약]

I-1. 매립지 관리 분야 : 매립지 내부 화재 사례

□ 내부화재 요인

- 산소 유입 : 복토 기능 취약, 매립가스 포집정 진공 발생
- 폐기물의 화학적 산화 : 자발적 연소(페인트, 용매제, 밧데리, 화학물질, 기름기 있는 덮개), 발열 반응(알루미늄 폐기물, 폐기물 재, 석회, 철), 과산화물(셀룰로즈, 플라스틱 산화)

□ 내부화재 발생 지표

- 일산화탄소 농도 1,000 ppm 이상 상승
- 매립가스 포집정 가스온도 60℃ 이상, 매립지 온도 77℃ 이상, 침출수 온도 38℃ 이상상승
- 매립가스 발생량·성상 변화, 침출수 발생량·수질 변화, 온도 상승, 악취, 침하 발생

□ 내부화재 발생 사례

- 미국 West Lake 매립지 : 매립가스 포집 시스템이 과도하게 포집되어 산소 농도 증가(11%)로 내부 화재 지속됨
- 미국 Countywide RDF 매립지 : 매립된 알루미늄 폐기물에 침출수가 재순환되어 발열반응으로 내부 화재 발생

□ 내부화재 방지 및 진압 방법

- 산소 유입 방지 : 매립가스 포집시스템 적정운전(진공 방지), 압밀, 복토
- 폐기물 “watch list” 관리 : 재(ash), 산업용 슬러지, 먼지 등
- “watch list” 폐기물이 매립된 구역에 응축수 및 침출수 재순환 금지
- 내부화재 발생시 매립지 표면 살수, 매립지 내부에 액체 또는 불활성 가스 주입, 연소 폐기물 굴착, 매립지 표면에 투수계수가 낮은 토양이나 FML 커버 적용, 거품제(foam) 적용

II-1. 침출수 처리 분야 : RO 시설 국내외 사례

□ RO 침출수 처리 개요

- 침출수 처리수 기준 및 구성에 따라 RO 공정을 1~3 단계로 구성하여 방류수 기준 준수
- 침출수 처리로 COD 98% 이상, 중금속 99% 이상 제거 가능
- RO 원수의 75~80%를 투과수로 회수하여 지표수로 방출하거나 도로청소, 차량세차, 조경용수로 사용
- RO 농축수는 매립지에 재순환하거나 증발 및 건조로 처리하여 플라이 애쉬나 슬러지 형태로 고형화하여 매립

□ RO 침출수 처리 사례

- 미국, 독일, 일본, 루마니아, 국내에서 침출수 처리에 RO 시스템이 성공적으로 운영되고 있음
- RO 전처리 시스템으로 균등화조, pH 조정(황산), 모래·카트리지 필터, 생물학적 처리조(폭기), UF 시스템(콜로이드 고체 및 오일 제거) 적용
- RO 후처리 시스템으로 최종 pH 조절 및 염소화 적용

< 침출수 RO 처리시설 사례 - 공정 및 처리 효율 >

국 가	매립지 명	RO 전처리	RO 처리	RO 후처리	처리 용량	회수 율 ^{*1}	제거 효율 ^{*2}	RO 농축수 처리	RO 처리수 활용	운전 시기
미 국	뉴욕 Seneca Meadow	pH 조정, 모래·카트 리지 필터	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 농축수 처리 3단계 : 투과수 처리	pH 조정	523 m ³ / 일	약 60%	98%	매립지 재순환, 플라이애 쉬· 슬러지 고형화	도로청소, 차량세차, 조경용수	2011년 부터 운전
	펜실 베니아 Lanchest -er	균등화조, 예비필터	1단계 : UF처리 2단계 : RO처리	pH 조정, 염소 처리	37.8 m ³ / 일	-	98%	-	방류	5년 이상 성공적 운영
독 일	Ihlenberg	폭기식 라군조, 침전조 (황산), 모래·카트 리지 필터	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리 3단계 : 농축수 처리(NF)	-	1,199 m ³ / 일	-	98%	고형화 매립	방류	1993년 운전 시작
	Wischha -fen	-	1단계 : UF처리 2단계 : RO 처리	-	-	-	-	매립지 재순환 (침출수 염도 상승)	-	1998년 운전 1년 후 제거
	Vorketzin	생물학적 처리조 (폭기), 침전조 (황산), 모래·카트 리지 필터	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리 3단계 : 농축수 처리	-	430 톤/ 일	94%	-	하수 처리장 분산 이송처리	방류	2004년 부터 운전

*1 회수율(%) = 막투과수량/막공급수량 × 100

*2 제거효율 항목 : BOD, COD, 암모니아, 총질소, 총인, 총부유고형물, 총용존고형물 등

국 가	매립지 명	RO 전처리	RO 처리	RO 후처리	처리 용량	회수 율	제거 효율	RO 농축수 처리	RO 처리수 활용	운전 시기
일 본	클린파 크비단	응집침전 처리	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리 3단계 : 농축액 처리 4단계 : 농축액 처리	중화, 소독	70 m ³ / 일	-	99% 이상	증발고화 처리 (고화물로 반출)	방류	1999년 운전
	9개의 마지막 정원	응집침전 처리	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리	중화, 소독	10 m ³ / 일	-	95% 이상	증발고화 처리, 매립지 재순환	방류	2000년 운전
루 마 니 아	Tutora	모래·카트 리지 필터	1단계: 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리	-	-	-	94~ 96%	처리 공정 으로 반송	-	2009년 운전
중 국	Changsh engqiao	pH조정, 모래·카트 리지 필터	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리	탈기	500 m ³ / 일	80%	98%	매립지 재순환	방류	2003년 운전
한 국	수도권 매립지	모래·카트 리지 필터	1단계 : 침출수 처리 2단계 : 투과수 처리	-	300 톤/일	75%	98% 이상	매립지 재 순환 고려	방류	2005년 준공

II-2. 침출수 처리 분야 : 침출수 RO 농축수 재순환 사례

□ 뉴욕 Seneca Meadows 매립지 RO 침출수 처리 운전 주요 결과

- 뉴욕 Seneca Meadows 매립지는 2014년 기준 생활폐기물은 일 6,000 톤, 연간 220~240만 톤 매립되고 있음
- 연간 침출수 발생량은 증가되고 있어 2013년 초부터 침출수를 RO 시스템으로 처리하고 있음
- RO 농축수 농도는 침출수 원수 농도보다 보통 2~3배 높고 RO 농축수 재순환시 암모니아 농도 증가가 관찰됨
- RO 농축수 암모니아는 매립지에서 분해되지 않아 총용존고형물 농도가 높아질 가능성 있어 RO 농축수 재순환은 장기적 처리방법이 아님
- RO 농축수 처리를 위해 RO 농축액 부피 저감 및 암모니아 제거 위한 3개 기술의 파일럿 테스트를 실시하고 있음
- 향후 RO 최적화, RO 농축수 처리 위한 RO 시설 확장 진행 중임

□ 포르투갈 매립지 침출수 RO 처리 및 RO 농축수 재순환 주요 결과

- 포르투갈 5개 위생매립지 침출수 수질을 4~5년(2002~2006년) 동안 분석하여 침출수 특성 및 RO 농축수 매립지 재순환 영향 평가
- RO 농축수가 매립지에 재순환된 경우(매립지 1, 2, 3, 5) COD, NH₃-N, 황산염, 염소이온, 전도도가 문헌 예상값보다 많이 높음
- 매립지에 RO 농축수를 재순환함으로써 침출수 오염물 부하량이 높아 문제가 됨

□ 실험연구 주요 결과

- RO 농축수 재순환으로 폐기물 분해가 촉진되어 매립가스 생산량이 높아지고 매립지 사후관리 기간이 단축될 수 있음
- 반면 RO 농축수 매립지 재순환으로 침출수 염이 축적되어 침출수 RO 처리시 부하 발생 예측

III-1. 폐자원에너지화 분야 : SRF 시설 해외 사례

□ 벨기에 IOK MBT 시설

- 대규모 상용시설에 생물학적 건조(사전 건조)로 SRF 수율이 55%까지 높게 달성되어 SRF 생산시설에 생물학적 건조시설 적용이 매우 유용한 것으로 판단됨
- 미생물 활동을 이용하여 저비용으로 폐기물을 건조함으로써, 후속 공정의 선별율을 높임
- 반입폐기물 중 음식물류폐기물 등 약 35%정도의 유기물 포함

□ 영국 런던 Southwark MBT 시설

- 파쇄 및 트롬멜 선별 후 생물학적 건조
- 매립률은 2008년 대비 2014년에 90%이상 감소
- 생물학적 건조 적용 공법 : 네덜란드 콘크리트 터널형
- 수분 : 반입폐기물 40% → 건조후 폐기물 20~25%
- MBT시설을 거친 잔재물의 최종 매립량은 1.5% 수준임

□ 독일 Dresden MBT 시설

- 폐기물 파쇄 후 200 mm 미만 폐기물을 생물학적 건조하여 선별하고 SRF 연료 생산
- 배치(batch) 유형의 폐쇄형 컨테이너에서 생물학적 건조
- 박스별로 제어가능하여 홀(hall) 방식을 이용하는 경우보다 성능이 우수함

□ 이탈리아 Montanaso MBT 시설

- 반입폐기물을 200~300 mm로 파쇄 후 생물학적 건조하고 선별하여 SRF 생산
 - 폐쇄된 홀(hall) 형태로 크레인을 통해 폐기물 투입 및 배출
 - 배출 공기의 온도에 따른 공기 흡입량 조절
 - 생물학적 건조 운영기간은 평균 12~15일, 최적 온도범위 55~70℃ 수준

□ 독일 Rügen MBT 시설

- 반입폐기물 파쇄 후 생물학적 건조하고 선별하여 SRF 생산 및 잔류물 매립
- 컨테이너 1기에서 7일 동안 약 6톤 폐기물 건조 처리
- 부분적으로 배출 공기를 컨테이너 하부를 통해 공급하여 순환함

□ 영국 MBT 플랜트 사례

- 2010년 폐기물 시설 보고서에 따르면 영국에 19개 MBT 시설이 설치되어 매년 약 273만톤이 처리되고 있음
- New Earth 지역에서 2011년 9월 MBT 시설 운전이 시작되어 연간 20만톤 처리용량으로 5개 지역의 폐기물을 처리함
- Greater Manchester 10개 도시 중 아홉 곳에서 협의하여 5개 MBT 시설을 설치하여 4개 혐기성 소화시설에서 폐기물 45만 톤 처리
- 연간 5개 시설에서 매년 SRF를 27만5천톤 생산하여 열병합발전소에 연료로 공급

□ 독일 MBT 플랜트 사례

- 독일에 45개 MBT 시설의 처리용량은 5,300만톤/년임
- 이중 12개 시설은 바이오가스를 생산하는 혐기성 소화시설이고 다른 14개 시설은 MBS(호기성 생물학적 건조) 플랜트임
- 2004년에 건설된 호기성 생물학적 처리 MBT 시설은 터널형 퇴비화 플랜트로 연간 47,000 톤의 폐기물을 처리함
- 2006년 설치된 생물학적 건조 MBT 시설에서 연간 135,000톤 폐기물이 처리됨
- 2008년도 설치된 2단 중온 습식 소화 및 습식 산화 MBT 시설에서 연간 133,000톤 폐기물 처리됨

III-2 폐자원에너지화 분야 : 유럽 폐기물 성상 및 MBT 시설 특성

□ 유럽 폐기물 처리 및 특성

- 2011년 EU 27개국에서 37% 매립, 23% 소각, 40% 자원화 처리됨
- 스웨덴, 벨기에, 네덜란드, 독일, 덴마크, 오스트리아, 스위스, 노르웨이는 매립율이 3% 이하임
- 유럽 폐기물의 30~40%는 생분해 가능한 주방 및 정원 폐기물임
- 유럽 대부분 국가에서 음식물폐기물을 포함한 생분해 가능한 폐기물을 분리수거하고 있음
- 유럽 폐기물 평균 저위발열량은 2,150 kcal/kg이고, 수분은 30~40% 정도임
- 영국 폐기물 수분 함량은 약 31%이고 연소가능한 폐기물 함량은 약 45% 정도이고 불활성 폐기물 함량은 약 24% 정도임

□ MBT 시설 특성

- MBT 시설은 SRF 연료, 바이오가스, 재활용 가능 물질 회수가 가능하며 매립에 적합하게 폐기물을 처리할 수 있음
- MBT 생물학적 처리 공정에서 혐기성 소화나 호기성 분해에 의해 유기물이 50~75% 분해됨
- MBT 설계는 폐기물 구성에 따라 달라짐
- 생물학적 처리 공정은 RDF, 퇴비 및 안정화된 매립물 등 생성물에 맞추어 선택할 수 있음
- 독일에서는 MBT(30개), MBS(13개), MPS(3개) 플랜트에서 연간 5,759,600톤이 처리되고 있음
- MBT 플랜트에서 생물학적 처리 공정으로 터널형 호기성 분해, 건식 소화, 습식 소화 등이 적용되고 있음
- MBS 플랜트에서 전체 폐기물이 생물학적 건조된 후 선별분리가 용이해짐

III-3. 폐자원에너지화 분야 : 해외 폐자원에너지타운 관련 사례

□ 폐자원에너지화 인센티브 현황

- 유럽지역 발전차액지원제도(FIT) 및 재생에너지의무할당제(RPS) 실시
- 일본 폐자원에너지화 시설 정비비 일부 지원 등

□ 해외 폐자원에너지화 타운과 수도권매립지 폐자원에너지타운의 차이점

- 유럽에서는 주민 참여형 사업 추진 및 주민 경제적 혜택 공유
- 수도권매립지는 주민보다 폐기물 처리회사 중심의 에너지단지 조성

< 해외 폐자원에너지타운 관련 사례 >

국가	지역	시설 종류	에너지 활용현황	지원 정책
독일	윤데	바이오가스 플랜트, 목질 보일러	열 활용 및 전기 공급·판매	전력회사 전력구입, 발전차액지 원제도
	마우엔 하임	바이오가스 플랜트, 우드칩 시설	열 공급 및 전기 생산	
오스 트리 아	뮌헨	바이오가스 플랜트, 우드칩, 바이오디젤	열 공급 및 전기 판매	국가 및 지방정부 기금 지원
	슈피텔 라우	소각장	열 공급 및 전기 판매	-
	귀싱	바이오매스 열병합 발전소	열 공급 및 전기 판매	-
일본	오가와 마치	음식물폐기물 바이오가스 플랜트	바이오가스 생산	지방정부 연간 100만엔 운영위탁금 지원
	마이 시마	소각장	전기 판매 및 비철금속 판매	-
	쿠즈 마키	축산 및 목질계 바이오매스 발전	전기생산	-

III-4. 폐자원에너지화 분야 : 일본 음식물 바이오가스화 사례

- 2010년 11월 기준 일본 286개 바이오매스 타운 중 60.4%인 162개소에서 메탄 발효로 바이오가스 생산
- 발전차액지원제도(FIT)가 2012년 7월 시행되어 2013년 10월 말까지 1년 3개월간 35건(총 5,213 kW) 바이오가스 플랜트 설비 인증 받음

< 일본 음식물폐기물 바이오가스화 사례 >

지역	반입폐기물	플랜트 용량	활용	특징
지바현	음식물폐기물	30톤/일	철강사 연료로 사용	인근 철강사, 가스화용융시설 있음
도쿄	음식물폐기물	110톤/일	전기생산 (60% 판매)	가스엔진, 연료전지 전력생산
고베	음식물폐기물, 하수슬러지, 목재	-	소화조 난방 바이오가스 판매	천연가스 차량연료 공급, 가스 그리드 주입
오사카	빌딩 음식물폐기물	-	전기, 열	도시 중심 빌딩에 설치
히타치 (이바라키현)	음식물폐기물	136톤/일	소각로 보조연료	소각로 증기 열원, 퇴비 사용
히타시 (오이타현)	돼지 배설물, 유기성 폐기물, 슬러지	80톤/일	전기, 비료, 퇴비	비료 및 퇴비를 논과 밭에 사용
도야마 (혼슈)	음식물폐기물	62톤/일	전기, 보일러 연료, 퇴비	고온 소화, 물 추가 및 혼합
가이세이 (가나가와현)	음식물폐기물	5톤/일	열병합발전 (전기, 열)	온실에서 열 사용, 비료를 논에 사용
오키 (후쿠오카)	슬러지, 음식물폐기물	41.4톤/일	전기, 열	비료(6,000톤/년) 작물 생산에 사용 가정폐기물 44% 절감
다이센 (아키타현)	돼지 배설물, 음식물폐기물	77,000톤/ 년	전기, 열	기존 소화조 활용하여 2014년부터 운전 시작

IV-1. 하수슬러지 분야 : 하수슬러지 건조 기술 · 사례

□ 슬러지 건조 일반기술

- 슬러지 건조로 감량화되어 이송비 절감, 용이한 저장, 슬러지 열량 증가, 위생처리 및 안정화가 가능함
- 프랑스 전문가에 따르면 건조슬러지를 농업용 비료로 사용하거나 폐기물 혼합 소각시 고형물 60% 이상 건조된 슬러지 사용
- 슬러지 건조시설 선택시 총비용과 시설운영 신뢰도, 운영 용이성, 저장·이송의 용이함, 친환경도를 고려해야 함
- 슬러지 열적건조는 에너지 소비 비용이 높아 화석연료 사용량을 줄이기 위해 바이오가스, 슬러지·폐기물 소각로 에너지 및 폐열 이용이 필요함
- 슬러지 알갱이화로 접촉면적을 극대화하여 건조공정의 효율화를 도모할 수 있음

□ 슬러지 건조공정 에너지 효율

- 슬러지 건조는 대류형 건조기, 전도형 건조기, 혼합형 건조기 있음
- 슬러지 건조 열원에 따라 열풍 건조, 태양열 건조, 생물학적 건조 방식이 있음
- 슬러지 건조 비용의 75%는 에너지 비용으로 에너지 비용을 줄이기 위해 설계 및 운전조건의 최적화가 필요하며 현장에 열(바이오가스, 폐열)을 사용하는 방법 있음
- 벨기에 테네빌(Tenneville) 지역에서는 슬러지 건조에 폐기물 소각장의 스팀을 열원으로 사용함
 - 건조기는 유동형 건조기로 연간 만톤이 건조되고 시간당 3.7 톤의 물이 증발되며 건조슬러지는 석탄발전소 연료로 사용함

< 하수슬러지 열풍 건조기 사례 >

회사명	반응기 형태	용량	처리 방식	건조 열원	생성물	탈취방법	설치사례	에너지 소비
HUBER	중온 벨트 건조기	12,000~16,000톤/년	물증발 (600 kg/h)	열병합 발전 냉각수 (90-130 °C)	고형물 65~90%, 화석연료 대체	스크러버, 바이오필터	독일 잉골슈타트 (12,000톤/년 고형물 30%→90%)	적음
Dors et	컨베이어 벨트, 컨테이너형	-	물증발	폐열	고형물 90% 이상, 시멘트 산업 등 연료사용	공기세척 (암모니아 황산접촉, 황산암모늄 생성제거)		적음
Stela	압출성형기 (탈수, 고형물 20~30%), 벨트형 건조기	-	저온 열풍 건조 (100~25,000 kg/h)	열수, 천연가스, 바이오가스, 스팀, 석유	고형물 65~95%	배출가스 응축, 물 재처리	터키 이즈미르 (2013년), (25,000 kg/h 물증발, 고형물 92% 생성)	0.8 MWh/kg H ₂ O
Andritz	압축기 (고형물 25%로 탈수) 벨트형, 유동형, 드럼형 건조기	-	기계적 열적 처리	열병합 발전 및 로터리 킬른 열교환기 열공급	고형물 90% 이상, 시멘트 킬른 보조연료 사용	폐쇄형 공기순환 루프 운전	프랑스, 터키, 스페인, 중국, 영국 등 사용 중	-
Vandenberg International	로터리 드럼	-	대류형 건조 (200~800°C)	직접 건조, 간접 열병합 발전 열교환기, 직간접 통합 건조	2~5mm 알갱이	RTO, 1차 연소기	-	3.3~3.8 MJ/kg H ₂ O, 11~15 MJ/kg 건조슬러지
ABTOR KAPPARATER	드럼 건조기	7,000톤/연	물증발 (25톤/h)	바이오가스, BFB 보일러 (나무칩)	건조슬러지 보일러 연료 사용	사이클론, 스크러버, 소각기	노르웨이 오슬로 (25%→90%) 스웨덴 제지기업 SCA (50%→70%)	-

회사명	반응기 형태	용량	처리 방식	건조열원	생성물	탈취방법	설치사례	에너지소비
Buss-SMS-Canzler	수평형 Thin Film 건조기, Linear 건조기 (실린더형 건조기)	-	2단 건조	스팀, 뜨거운 물, 오일 (열교환기, 통합형 열회수 시스템)	고형물 85~95% (퇴비, 토지개량제, 발전소 연료)	바이오필터, 소각기, 바이오스 크러버	유럽, 미국, 중국, 아라비아 등 80개 이상 설치	-

< 하수슬러지 태양열 및 생물학적 건조 사례 >

회사명	반응기 형태	용량	처리 방식	건조열원	생성물	탈취방법	설치사례	에너지소비
HUBER	온실, 스크류 압축기, 뒤집기 시스템	-	물증발 (폭기)	태양열	고형물 65% 이상	고성능 환기장치	지중해 키프로스 섬(12,500톤/년 건조, 6,600m ²)	적음
Wendewolf	온실, 환기 시스템	800~900 kg/m ² . 년	물증발 (폭기)	태양열, 보조가열기	10 mm 크기 건조 알갱이	환기 시스템	17개국 158개 시설 설치 (23년 운영)	적음
Siemens	생물학적 건조 시스템	1,000 톤/일	미생물 분해 (고형물 20%→65%)	미생물 분해열	퇴비, 연료 사용, 매립	바이오 필터	중국 선양 (1,000톤/일, 2012년~)	운전비용 열적건조에 비해 30% 낮음
네덜란드 Zutphen 지역	생물학적 건조 시스템, 터널	15 만톤/년	미생물 분해 (고형물 25%→67%)	미생물 분해열, 공정열	소각기 연료	바이오 베드, 가스스 크러버 (황산)	-	전기소비량 0.46 MW/년, 디젤 204 m ³ /년

V-1. 기타 분야 : 제37회 국제환경산업기술 & 그린에너지전 기술동향

□ 에너지 저감형 슬러지 건조 소성 기술

- 고효율 저에너지형 하수슬러지 건조기술로 2단계를 거쳐 슬러지 함수율 약 80%에서 약 10%로 저감
- 1차 건조 : 가열공기(100℃) 송풍 건조(함수율 80% → 60%)
- 2차 건조 : 로터리킬른 간접가열(300℃ 가스)(함수율 60% → 10%)
- 처리비용 : 7~8만원/톤(하수슬러지), 2.7~3만원/톤(정수슬러지)

□ 하수슬러지 전기탈수식 감량화 설비

- 전기(슬러지 양극(+), 이동, 수분 음극(-) 이동)로 수분을 분리하여 슬러지 함수율을 약 80%에서 약 60%로 저감(2 톤/h)
- 장점 : 건조 비용 절감 및 슬러지 시설내부 부착 방지
- 설치사례 : 국내외 하수처리장 및 폐수처리장

□ 폐기물·슬러지 저온열분해 탄화

- 로터리킬른(400~500℃)에서 슬러지를 건조·탄화하여 슬러지 함수율 약 80%에서 10% 미만의 탄화물(약 3,000 kcal/kg) 생성
- 가열방식 : 로터리 킬른 외벽 전기 가열
- 처리비 : 약 5~6만원/톤
- 파일럿 시설 용량 : 1.5~2톤/h(최대 350톤/일 가능)

□ 전기활성탈취시스템

- 전기활성촉매로 악취물질 처리(97%)
- 유지비용 : 1,070만원/연간(333 Nm³/분)
- 장점 : 높은 처리효율, 촉매의 반영구적 사용, 폐수 발생 없음, 유지비용 저렴
- 적용실적 : 광양시 음식물쓰레기 자원화 시설

V-2. 기타 분야 : 폐자원에너지화 핵심기술과 최근 사업동향 교육 심포지엄

□ 폐기물 에너지화 국내외 R&D 현황

- 하수슬러지 건조에 톤당 약 10만원 소요되고 건조연료는 톤당 약 3만원으로 판매되고 있으나 나머지 비용은 하수슬러지 처리비용으로 보아야 함
- RDF는 발열량이 낮아짐으로(기준변경) 품질 문제 발생(시장 관점)
- 국내 폐기물 정책의 변화와 폐기물에너지화 시설의 환경성 검토

□ 소각시설과 SRF시설 경제성 평가(전과정평가, LCA)

- 소각시설 85천원/톤, SRF 시설 48천원/톤, SRF 및 보일러 시설 19천원/톤 처리 비용
- SRF시설은 건조 열원에 따라 비용 달라짐(건조 열원 개선 필요)
- SRF시설 고형연료를 시설에서 건조연료 등으로 사용시 환경성 제고

□ 폐기물고형연료 제조 및 이용 기술 현황

- 고형연료 제조 건조시 건조기 배가스를 앞단으로 순환하여 화재 예방
- SRF시설 악취는 열분해 처리하며 열교환기로 열을 회수하여 공정 앞단에 사용

□ 고형연료제품 품질관리 및 현황

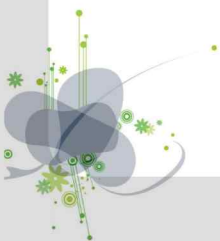
- 유럽에서는 고형연료를 만드는 데 더 많은 연료가 소비되면 평가에서 탈락되어 고형연료제품의 지속가능성 평가

□ SRF 연소용 유동층보일러 운전 특성

- SRF 순환유동층 발전보일러로 여름철 전기, 겨울철 열 공급
- 순환유동층보일러 폐기물 발열량 변동이 커서 10~20 MW 발전량 변동
- 연소로 클링커 형성, 마모 및 부식에 의한 손상 발생
- 원주 SRF 보일러의 발전효율은 27~28% 정도임
- Fluff SRF 연소시 폐기물의 이송에 문제 발생 : 적절한 전처리 필요

I 매립지 관리 분야

1. 매립지 내부 화재 사례



세부목차

1. 매립지 내부 화재 발생 원인	5
2. 매립지 내부 화재 발생 지표	14
3. 매립지 내부 화재 발생 사례	20
4. 매립지 내부 화재 방지 방법	39
5. 매립지 내부 화재 진압 방법	44
참고문헌	48

1 매립지 내부 화재 발생 원인

1-1. 매립지 내부 화재 유형

[Smoldering 화재 개요]

- 연소는 발열 산화 반응으로 열과 빛이 발생됨¹⁾
 - 연소에 연소가능한 연료, 충분한 양의 산화제(산소), 점화에너지(열), 연료와 산화제의 지속적인 연쇄 반응이 필요함
- 매립지 내부 가열(heating events)은 내부 화재, 연기나는 화재, 느린 열분해, 불타는 연소, 내부 산화 반응(reaction) 등으로 기술됨
- 매립지 환경에서 연소는 불꽃(flaming) 연소와 훈소(smoldering) 연소로 구분됨¹⁾
 - 불꽃 연소는 화재 빛으로 확실히 알 수 있음
 - 매립지 내부 훈소는 낮은 온도에서 느리게 반응하고 불꽃없는 연소로 육안으로 판별하기 쉽지 않음
- 훈소는 응축된 상태의 연료 표면에 산소가 직접 반응하여 발생된 열로 연소가 지속됨
 - 훈소 연소는 산화 반응과 열이 연료 고체 표면에서 발생하는 반면 불꽃 연소는 연료 주위 기체 상태에서 산화 반응과 열이 발생됨
 - 훈소는 불완전연소로 일산화탄소가 다량 발생되며 연료 질량의 10% 이상이 일산화탄소로 전환됨²⁾



숯의 훈소²⁾



담배의 훈소²⁾

1. 'Data Evaluation of the Subsurface Smoldering Event at the Bridgeton Landfill', Todd Thalhamer, P.E., Hammer Consulting Service, June 17, 2013

2. '<https://en.wikipedia.org/wiki/Smouldering>

I. 매립지 관리 분야

- 매립지 내부 화재는 열분해 반응과 같이 산소가 부족한 상태에서 폐기물이 낮은 온도에서 느리게 소모되는 것임³⁾
 - 열이 방출되지 않으면 지속적으로 온도가 높아져 자발적 연소 온도까지 높아지면서 화재 발생
- 자발적 화재는 연소 온도가 낮은 고체 물질에서 시작됨³⁾
 - 적절한 조건하에 폐기물에서 자발적인 연소 발생
 - 혼소 연소에 의해 자가 가열이 촉진되고 열 확산이 감소되어 수분이 증발되면서 고체폐기물에 에너지가 축적됨
 - 화학적 산화로 발생된 열로 폐기물 자연 연소가 가능하게 됨
- 자발적 연소에서 폐기물이 생물학적 분해열로 가열되면서 유기물질이 화학적으로 산화됨¹⁾
 - 폐기물의 자발적인 연소는 건초더미의 자발적 화학반응과 산소가 부족한 사일로(silo)에서의 화재와 유사함
 - 위 단계는 ① 분해, ② 화학적 산화, ③ 마이야르(Maillard) 반응으로 구성됨
 - 마이야르 반응은 설탕과 단백질 사이 비효소적인 반응으로 열과 갈변 발생
 - 위 반응으로 발생된 열로 유기물질이 연소점에 도달함
 - 매립지의 급격한 산화로 수분 및 산성 유독가스 발생
- 매립지 폐기물 온도가 높아지기 시작해서 높게 유지되면 가열 구역이 매립지 내로 이동 가능
 - 매립지 내부 가열 구역 확대는 산소, 수분, 폐기물 유형 및 공극에 따라 다름
- 샌프란시스코 매립지 내부 화재 조사 중 배출구 온도가 249℃까지 높게 측정되었으나 연기는 보이지 않음¹⁾
- 매립지 내부 화재는 미국에서 늦은 봄과 가을 사이 기압 변화로 더 자주 발생됨¹⁾
 - 방화, 화학 반응, 인화성 물질(hot load) 등에 의해 언제든지 발생 가능
- 화재는 자체적으로 진압되거나 지역 소방서 도움으로 해결됨¹⁾
 - 보고되는 매립지 화재의 1~2 % 정도만 전문가의 도움과 추가적인 환경 관리 및 매립지 관리 시스템 개선이 필요함
 - 이중 약 10% 정도만이 대규모 환경 문제임

3. 'Evaluation of Possible Impacts of a Potential Subsurface Smoldering Event on the Record of Decision - Selected Record of Operable Unit-1 at the West Lake Landfill', Engineering Management Support, Inc., US EPA Region VII, January 14, 2014



샌프란시스코 Candlestick State 공원 매립지 Smoldering 화재(2006)

- 매립지 내부 가열시(heating events) 악취, 연기, 유독가스 배출, 라이너(liner) 및 캡(cap) 손상, 매립가스 및 침출수 관리 시설 손상, 경사면 붕괴, 지하수 및 지표수 오염, 매립지 운영 붕괴 등의 문제 발생⁴⁾
- 자발적인 매립지 화재로 폐와 호흡기 건강 문제가 유발될 수 있는 물질 발생⁵⁾
 - 훈소 연소시 불꽃 연소시보다 유독한 화합물이 높은 수준으로 배출됨
 - 저산소와 온도가 낮은 상태에서 폐기물 연소시 소각로에서 연소시보다 불완전 연소물이 높은 농도로 발생됨
 - 매립지 자발적인 연소에서 다이옥신 등 유독가스가 높은 농도로 배출되어 인체에 암, 간 손상 등이 발생될 수 있음
 - 또한 일산화탄소 농도가 50,000 ppm 이상 높게 측정됨

[발생 원인]

- 매립지 내부 가열 주요 요인⁴⁾
 - 호기성 미생물에 의한 폐기물 분해 : 복토 기능이 취약하거나 매립가스 포집정에 진공 발생시 산소 유입

4. 'Subsurface Heating Events at Solid Waste and Construction and Demolition Debris Landfills: Best Management Practices', Ohio EPA Guideline Document #1009, October 14, 2011

5. 'Characterizing spontaneous fires in landfills', SHADI Y. MOQBEL, University of Central Florida, Orlando, Florida(2009)

I. 매립지 관리 분야

- 폐기물의 화학적 산화

- ✓ 자발적 연소 : 페인트, 용매제, 배터리, 화학물질, 기름기 있는 덮개 등에서 발생
- ✓ 발열 반응 : 알루미늄 폐기물, 폐기물 재, 석회, 철 폐기물의 발열 반응으로 수소, 암모니아, 일산화탄소, 아세틸렌의 유독하고 연소가능한 가스 발생
- ✓ 셀룰로오스(cellulose), 플라스틱 산화로 연소 온도 낮은 과산화물(peroxides) 생성
- “Hot loads” 폐기물인 요리용 솥, 재, 연기나는 물질은 매립되거나 소멸되지는 않음

○ 오하이오 EPA에서 제시한 매립지 내부 화재 원인³⁾

- 복토층이나 매립가스 포집관에 진공 운전으로 인한 부적절한 산소 유입으로 폐기물의 호기성 미생물에 의한 분해
- 기름기 있는 깔개, 페인트, 용매제, 배터리, 화학물질의 자발적인 연소 발생가능
- 알루미늄 폐기물, 생활폐기물, 재, 석회, 철폐기물, 제철소 폐기물 및 기타 금속 폐기물이 물과 반응하여 발열 반응 발생 가능
- 셀룰로오스 및 플라스틱의 산화로 연소 온도 낮은 과산화물 생성
- 매립된 요리용 솥, 재, 연소 물질은 소멸되지 않아 화재 발생 가능

1-2. 공기 유입

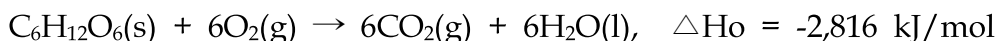
○ 매립지 내부 화재 주요 요인은 매립지 산소 농도 증가로 인한 호기성 박테리아에 의한 분해와 온도 상승임³⁾

- 매립가스 포집 시스템을 부적절하게 운영하여 과도하게 포집되면 대기 중 산소가 유입되어 호기성 분해가 진행되어 열이 발생됨

○ 복토층 균열, 시추공, 매립가스 포집관 손상, 부적절한 가스관 설치, 강한 바람 및 매립가스 과도한 포집으로 산소가 매립지 내부로 유입됨⁵⁾

- 호기성 분해로 보다 많은 열이 발생되어 폐기물 온도가 높아짐
- 높은 온도의 매립가스가 위로 이동되면서 공기가 매립지로 이동됨

○ 호기성 분해에 의해 유기성 폐기물이 이산화탄소와 물로 분해되면서 상당량의 열이 발생되어 매립지 온도가 높아짐⁵⁾



○ 혐기성 분해에 의해 폐기물이 메탄과 이산화탄소로 분해되면서 약간의 열이 배출됨⁵⁾



○ 두 반응의 엔탈피를 비교하면 혐기성 분해시 발생된 열은 호기성 분해시 발생된 열의 약 5%로 대부분의 에너지가 메탄에 저장됨⁵⁾

- 혐기성 조건에서는 매립지 폐기물 온도가 60°C(140°F) 정도이나 호기성 조건에서는 75°C(167°F)로 높음⁶⁾
- 매립지 지표에서 발생하는 화재 대부분 연료와 산소가 충분한 곳에서 발생됨¹⁾
 - 이 화재로 매립지 지표와 지하 1.5 m 정도가 타서 소실됨
 - 매립지 조건에 따라 다르지만 과거 지하 30 m까지 화재가 확산되었음
- 일일복토재로 흙이나 점토를 사용하고 폐기물 층을 압밀하여 매립지 내부 공기 투과도를 낮추면 폐기물 열은 단열되고 산소 유입을 최소화 할 수 있음⁵⁾
- 산소는 바람, 기압에 따라 매립지 상부 커버를 통해 유입될 수 있음
 - FML 커버와 투과도가 낮은 결합력 높은 토양이 공극 많은 토양보다 효율적인 벽체가 될 수 있어 산소유입 최소화에 좋음
 - 복토층에 균열(cracks)과 FML 커버에 구멍과 찢김을 관리하여 공기유입 차단
 - FML 커버를 땅속 깊이 고정하여 공기가 커버 가장자리로 침투되지 못하도록 함
- 매립지에 급경사로 산소가 유입되기 쉬우므로 완만한 경사면을 조성하여 산소 유입 방지
 - 폐기물 공극에 남아있는 공기층을 제거하기 위해 매립층을 압축하여 매립층 공극을 최소화함
- 매립가스 포집시 진공 펌프를 적용하지 않고 포집정을 필요한 만큼 추가하여 매립가스 포집시 산소 유입 최소화
 - 내부 매립가스 포집정에 산소 농도 1.5% 미만 유지
- 폐기물은 산소가 유입될 수 있는 지표 근처에서 산화됨¹⁾
 - 매립가스 포집 시스템에서 발생한 대부분 매립지 내부 화재는 포집관 매립가스 높은 온도와 일산화탄소, 검댕으로 알 수 있음
 - 이 화재로 불꽃이나 연기가 없으나 유기성폐기물이 급격히 산화될 수 있음
 - 때로는 위 연소 산화반응이 싱크홀이나 연기가 나타나기 전까지 발견되지 않을 수 있음
 - 보통 매립지 내부 화재 발생 중 실제 불꽃이나 연기는 볼 수 없음
- 목재 연소 온도는 약 249°C이지만 77°C의 낮은 온도에서도 수개월에서 수년동안 목재가 연소될 수 있음¹⁾
 - 또한 훈소 화재는 산소 3% 미만에서도 확산될 수 있고 100~121 °C의 온도에서도 지속될 수 있음

6. 'Subsurface Heating Events: Best Management Practices', Ohio EPA

I. 매립지 관리 분야

1-3. 화학적 산화

- 화학적 산화는 호기성 분해와 최종 생성물과 최종 배출열은 비슷하지만 열발생 속도 및 산소 소비 속도는 더 높음⁵⁾
 - 화학적 산화시 온도가 높을수록 반응 물질이 빠르게 활성화 에너지에 도달 할 수 있음
 - 우드칩의 자발적 발화시 생물학적 분해에 의한 산소 소모는 화학적 산화에 의한 산소 소모의 39~50% 정도로 낮음
- 철 산화물이 매립된 경우 매립지에서 발생된 황화수소와 반응하여 황화철이 생성될 수 있음⁵⁾
$$2\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{FeS} + \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$$
 - 황화철은 반응도가 높아 산소와 반응하여 연소됨
$$4\text{FeS} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2, \Delta H^\circ = -1,226 \text{ kJ/mol}$$
- 산소 10% 미만시 황화물은 느리게 산화되나 산소 10% 이상시 자연발화로 산화됨⁵⁾
 - 건조된 황화철은 상대습도 50% 이상에서 공기 중에서 자연발화되나 상대습도 50% 미만에서는 산화 반응이 느림
- 황화철 산화가 매립지 화재 발생원으로 확인된 경우는 없으나 철과 황이 많은 경우 산소 존재하에 매립지 온도가 높아질수 있음⁵⁾
- 매립지에서 화학적 반응에 의한 자가 발열로 화학적 산화나 열분해의 발열 반응에 의한 경우가 많음⁵⁾
 - 화학적 산화는 공기 존재하에 70~190℃ 낮은 온도에서 발생됨
 - 더 높은 온도에서는 열분해 반응으로 폐기물이 분해되어 에너지가 방출됨
- 셀룰로오스와 일부 플라스틱은 산화되어 불안정한 과산화물 생성(점화온도 낮춤)⁶⁾

1-4. 수분

- 호기성 박테리아와 혐기성 박테리아에 의해 유기물질이 생물학적으로 분해되기 위해서는 물이 필요함¹⁾
- 물은 간접적인 점화원으로 미생물 활동 촉진, 발열반응 촉진 및 산화촉매제로 사용됨⁶⁾
 - 건조 구역에 접한 젖은 구역이 화재에 특별히 취약함
 - 반면 물은 매립지 내부 발열열을 냉각시키는데 효과적이며 매립지 공극을 채워 산소 공간을 없앴

- 고체폐기물은 상당량의 수분을 흡수하여 반입된 폐기물의 수분함량은 20~30% 정도이고 매립지에서는 40%까지 높아질 수 있음⁵⁾
 - 수분은 폐기물 미생물 분해에 필요하여 생물학적 자가 가열시 제한 요인이 됨
 - 수분이 이동되면서 뜨거운 표면에서 증발열이 제거되면서 열이 이동됨
 - 매립지 내 수분 함량이 높을 경우 가열 구역으로 공기 흐름이 차단될 수 있음
- 침출수를 매립지 내 재순환함으로써 단기간에 폐기물 온도가 낮아질 수 있음⁵⁾
 - 침출수 주입 후 미생물 분해 활동이 촉진되어 고체 폐기물 온도가 높아 질 수 있음
 - 침출수 재순환 후 폐기물 온도가 단기간 떨어지나 이후 연간 5℃ 속도로 높아짐
- 수분이 높으면 석탄, 정원폐기물, 우드칩 등의 화학적 산화가 촉진됨⁵⁾
 - 퇴비화 시설에서 자발적 연소시 필요한 수분 함량은 20~45%로 25% 미만에서는 생물학적 분해가 저해되었고 45% 이상에서는 수분이 증발되면서 열이 소모되어 온도가 높아지지 않음
- 매립지에 물은 지표수가 침투되거나 강우에 의해 공급될 수 있음⁶⁾
 - 이외 지하수가 침투되거나 침출수 재순환 및 응축수 재주입으로 액체가 추가됨
 - 젖은 폐기물 매립시 수분 공급
 - 화학반응 및 생물학적 호흡으로 수분 발생
- 폐기물이 젖었을 경우 위험한 폐기물을 관리하고 매립 위치를 관리하여 발열 반응이 높은 폐기물 혼합 매립 금지⁶⁾
 - 발열 반응이 발생 가능한 폐기물이 매립된 지역에 젖은 폐기물 매립 금지
 - 반입폐기물 수분 함량 모니터링 및 발열특성 폐기물 단일셀 분리 매립
 - 발열폐기물을 다른 폐기물과 혼합하여 매립함으로 상대적 비율 낮춰 발열반응 최소화
 - 이외 뜨거운 폐기물(hot loads) 모니터링
- 물의 침투 방지하기 위해 일일복토재, 중간복토재, 최종복토재 관리 필요⁶⁾
 - 폭우관리 필요 : 지표수가 매립된 폐기물로 투입되지 않도록 함
 - 발열반응이 예상되는 폐기물이 매립된 구역에 침출수 주입 금지 및 젖은 폐기물 매립 금지
 - 이외 FML 커버 밑에 액체 포집기를 설치하여 응축수를 침출수 포집 시스템으로 이송함

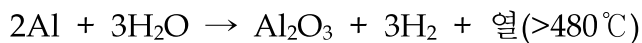
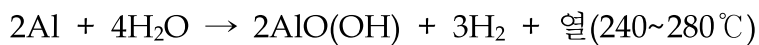
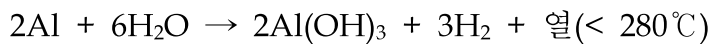
I. 매립지 관리 분야

1-5. 폐기물

○ 매립지 내부 폐기물 관리⁶⁾

- 자발적인 연소가능 물질 : 기름기 있는 깔개, 페인트, 용매제, 리튬 배터리, 메탄 생성시 발생된 글리세린, 글리콜
- 물과 반응하여 발열반응 발생 폐기물 : 알루미늄 폐기물, 생활폐기물 재, 애완동물 코크스(coke), FGD(Flue Gas Desulfurization, 배연탈황폐기물), 석회 및 철(iron)
- 요리용 목탄(charcoal), 재, 연소물질은 매립되었으나 소멸되지는 않음

○ 알루미늄 폐기물은 물과 반응하여 수소와 열 발생⁶⁾



Zn, Fe, Cu, Cr 금속도 물과 위와 같이 반응

- 암모니아 악취 발생 및 침전물 생성
- 염이 많은 침출수와 아세틸렌 생성

○ 알루미늄 폐기물의 발열반응(미국 EPA 연구결과)⁶⁾

- 실내온도에서 반응 없으나 매립지 온도인 60℃에서 반응 발생
- 질화 알루미늄(aluminum nitride)과 알루미늄 카바이드(aluminum carbide)에 의해 반응 촉진
- 물에 의해 반응 촉진되나 침출수에 의한 반응 촉진은 아님
- 인에 의해 반응 저해
- 매립지 표면으로 상당량의 수소가스가 분출됨

○ 기타 매립지 내부 발열반응⁶⁾

- 금속 알루미늄과 산화제이철의 분말혼합물 반응으로 열 발생
($\text{M}_1\text{O} + \text{M}_2 \rightarrow \text{M}_1 + \text{M}_2\text{O} + \text{열}$)

- 자연점화 반응(로켓 연료, IEDs) 및 열분해 반응 발생

○ 알루미늄 폐기물이 물과 반응하여 열이 발생됨¹⁾

- 미국 오하이오에서는 1993년부터 2001년까지 알루미늄 공정 폐기물이 약 60만톤 매립되었음
- 2001년부터 2006년 사이 매립지 운영자는 매립가스 포집정에서 온도 상승이 관측되었고 악취 민원이 발생됨
- 이후 급격한 침하 발생과 매립가스 농도 변화가 측정됨
- 알루미늄 폐기물이 매립지 물과 반응하여 발열 반응이 발생됨

1-6. 기타

- 발열반응이 지표 30.5 m 아래 깊이와 매립지 바닥 24.4 m 높이에서 발생⁶⁾
 - 매립된 폐기물 하중으로 압력이 높아져 발열반응 촉진 예측
 - 발열반응 특성 지닌 폐기물의 매립 깊이 제한 및 젖은 폐기물 매립 금지

2 매립지 내부 화재 발생 지표

- 매립가스 발생량 변화, 매립가스 정상, 침출수 발생량 변화, 침출수 수질, 온도, 악취, 침하로 화재 발생 예측⁶⁾
 - 단기간 급격한 침하 발생
 - 매립가스 포집 시스템이나 매립지에서 연기나 연소 악취 발생
 - 일산화탄소 농도가 1,000 ppm 이상 높아짐
 - 매립가스 포집정에 연소잔재물 발견
 - 매립가스 포집정 가스 온도 상승(60℃ 이상)
 - 매립지 온도 77℃ 이상 상승
- 매립지 내부 화재 발생시 높은 온도에 의해 메탄 생성 미생물 반응이 저해되어 메탄 농도가 45% 미만으로 감소됨⁶⁾
 - CH₄/CO₂ 비율이 1미만이면 메탄생성 미생물 활동이 저해됨을 알 수 있음
- 매립가스 포집 시스템에 산소 농도가 5% 이상, 질소 농도 20% 이상 높아지면 매립가스 중 공기 유입 예측⁶⁾
 - 매립지 내부 화재로 CO, H₂ 가스 발생
 - 매립가스 중 CO 농도가 1,000 ppm 이상이면 매립지 내부 화재 발생 예측
 - 매립가스 중 CO 농도가 100~1,000 ppm 정도이면 매립지 내부 화재 의심되어 매립지 온도와 공기 유입 모니터링 필요
 - 또한 매립가스 중 휘발성유기화합물(벤젠, 다이옥신, 퓨란, PAHs) 발생량이 높아짐
 - 매립가스 중 수소가 5% 이상이면 매립지 내부 화재가 원인일 수 있음
- 매립지 화재로 가스, 증기, 연기 발생
 - 특정 물질, 일산화탄소, VOCs, PAHs, SVOCs, 다이옥신 등 대기오염 물질 배출
- Smoldering 연소시 VOCs 농도 증가하여 10℃ 증가시마다 2배 정도 농도 증가
 - 매립지 화재 중 높은 온도에서 벤젠과 메틸 에틸 케톤 지속적으로 검출
- 매립지 내부 발열 화학반응으로 과도한 침출수 및 응축수 생성이 가능하며 침출수로 가스포집정이 급격히 채워짐⁶⁾
 - 침출수 수질이 변화되어 총용존고형물(TDS)과 염(salt) 함량이 높아짐
- 매립가스 온도는 55℃ 이상 높고 급격한 온도변화 발생⁶⁾
 - 매립가스 포집정 내부 온도 측정 필요
- 침출수 온도는 38℃ 이상으로 높아질 수 있음⁶⁾

- 매립지 내부 침출수 온도 모니터링 필요
- 폐기물 온도가 매립가스 포집정 매립가스 온도보다 많이 높을 경우 화재 발생이 원인이 될 수 있음⁶⁾
 - 폐기물 온도는 샘플링 중 지표로 꺼내면서 수동 스캔 장비로 측정가능
 - 폐기물 온도가 170°F(77°C) 이상시 매립지 내부 화재의 지표가 될 수 있음
 - 적외선 촬영으로 매립지 지표 근처 온도 측정 가능
 - 매립가스 포집 시스템이나 매립지 균열 지점에서 연기나 증기 발생시 매립지 내부 화재 발생 예측
 - 추운 아침 따뜻한 매립가스 증기 발생은 증기일 수 있음
- 매립지 내부 화재 발생 이후 지표⁶⁾
 - 발열 반응열로 매립가스 압력 증가로 매립가스 포집 시스템의 압력 조정 필요
 - 매립가스가 침출수 배출층으로 밀려 나옴
 - 복토층에 균열이나 구멍으로 분기공, 분출 및 토양 얼룩 관측
- 짧은 기간 내 과도한 침하 발생이나 일정 구역에서 침하 정도가 다를 경우⁶⁾
 - 매립지 공극으로 장비가 빠지거나 싱크홀 발생
 - 메르캅탄, 탄 냄새, 암모니아 악취 발생
- 매립지 내부 화재 추가 지표
 - 매립지 온도가 74°C 이상일 경우 매립지 내부 가열반응 지표로 봄
 - 매립지 온도 80°C 초과시 메탄 생성 중지
 - 매립지 100~121°C 온도에서 매립지 내부 혼소 화재 지속됨
 - 149°C 이상 온도에서 매립지 내부 화재 발생 확증
 - 매립지 온도 149°C 미만시 일산화탄소 농도 측정으로 화재 여부 확증
- 매립지 smoldering 화재로 높은 온도에서 매립지 시설 손상
 - 85°C의 낮은 온도에서도 시설(매립가스 포집 시스템, 침출수 포집 시스템, 합성 라이너 시스템) 사용기한 단축될 수 있음
 - 일부 PVC 파이프는 74°C의 낮은 온도에서 손상됨
- 매립지 운영자는 매립가스 포집관에 산소 농도와 온도 변화로 매립지 내부 화재 점검가능
 - 매립가스 포집 시스템 온도 : 55°C 초과
 - 매립가스 포집관 산소 농도 : 5% 초과
 - 매립가스 포집정 질소 농도 : 20% 초과

I. 매립지 관리 분야

- 매립가스 포집관 온도 및 농도 변화가 다음과 같을 경우 화재 시작 예측
 - 1주만에 메탄 농도 급격한 감소
 - 한달 만에 메탄 농도 20% 이상 감소
 - 한달 만에 과도한 밸런스 가스(주로 질소) 농도 측정
 - 벤젠, MEK(메틸 에틸 케톤) 농도의 급격한 증가
- 매립지 운영자는 다음 경우 적극적인 조치 실행
 - 매립가스 포집관 침출수 포집 시스템 녹아내려 붕괴되기 시작함
 - 단기간 메탄가스 30% 미만으로 감소
 - 온도 74℃ 초과 상승 및 악취 발생
 - 매립가스 조성 변화 및 가스 압력 상승
 - 비정상적인 침하 발생 및 침출수 유량 증가
- 매립지 화재 예방 및 악취 제어 관련 법과 규정을 준수하기 위한 표준운전절차(Standard Operating Procedures)가 다음 표에 정리됨
- Bridgeton 매립지 남쪽지역 내부 화재로 인한 현상은 다음과 같음
 - 온도가 71℃ 이상인 지역에 메탄 농도 감소 (메탄생성박테리아 저해)
 - 매립지 내부 온도가 높아지면서 매립가스 및 침출수 처리 시설에 특수 자재 사용 필요
 - 매립가스 중 수소, 이산화탄소, 휘발성 유기화합물, 일산화탄소 생성 및 배출
 - 악취 배출
 - 폐기물 중 물이 증기로 증발되어 매립가스 압력 증가 및 침하 발생
 - 폐기물에 발생된 열로 증기가 배출되거나 응축수 발생
 - 침출수 BOD, VOC, DS, SS 농도 증가
 - 폐기물 부피 감소로 정상시보다 상당한 침하 발생
 - 매립가스 포집 및 제어 시스템에 검댕 및 타르 물질 축적
- 매립지 내부 화재를 초기에 발견하기 위해 침하, 매립가스 농도 변화, 매립가스 및 폐기물 온도, 일산화탄소 농도, 열 측정으로 모니터링 필요⁵⁾
- 적외선 측정으로 매립지 깊이별 온도를 측정하여 화재 발생 여부 확인⁵⁾
- NSPS(New Source Performance Standard) HOV(Higher Operating Value)
 - 2단계 점검사항으로 매립가스 Balance gas가 공기에서 유입에 의한 것인지 반응 가스인지 분석 필요
 - 수소는 발열반응에 의해 생성되어도 메탄생성균에 의해 소모될 수 있음

< 매립지 내부 화재 점검 기준(매립가스) >

문서	Republic ^{*1}	Cornerstone ^{*2}	Geosyntec ^{*3}	SWANA ^{*4}
허용 산소 농도	<1%(일반적) <2%(최대)	0.2% 1% 초과금지	5% 미만	0~0.5% <1%
정상 메탄 농도/한계 메탄 농도	정상운영시 43~48%(건조) 48~52%(비건조) <48%(한계 농도)	50~70%(정상) <47%(한계) <40%(과도한 경우)	-	45~58%
한계 온도 범위	>49℃	>54℃	>60℃	15~52℃(정상) 52~60℃(한계)
한계 일산화탄소 농도	>300 ppm	100~1,000 ppm	>1,000 ppm	>25 ppm
Smoldering 화재 증상	급격한 국부적 침하 발생 지표면 복토층 균열 발생 식물 죽음 연기 및 악취 매립가스 온도 급격한 상승 비정상적인 수두의 변색	매립지 커버에서 연기배출 급격한 함몰 매립가스 중 일산화탄소 검출	매립가스 온도 75℃ 초과 일 산 화 탄 소 1,000 ppm 초과	일산화탄소 및 높은 질소 농도 매립가스 포집정 산소가 10% 이상 높으면 연소 가능

^{*1} 'Landfill Gas Management Standard Operating Procedures', Republic Services, Inc. (2009.5.1.)

^{*2} 'Operation Manual for the Landfill Gas Collection and Control System at the Washington County Landfill, Washington, Utah', Cornerstone(2011.10)

^{*3} 'Brawley Solid Waste Site Landfill Collection and Control System, Operation and Maintenance Plan', Geosyntec Consultants(2012.4)

^{*4} 'Landfill Gas Operation and Maintenance, Manual of Practice', SWANA(1997.3)

I. 매립지 관리 분야

문서	ISWA ^{*5}	ME-BC ^{*6}	US EPA ^{*7}	USACE ^{*8}	Ohio EPA ^{*9}
허용 산소 농도	3~4%	2.0% 2.5% 초과금지	0.1~1% <5%(최대)	>3.2%(한계)	<1.5%
정상 메탄 농도/한계 메탄 농도	35~50%	30~60% (정상)	45~60% (정상)	40~70%(정상)	>45%
한계 온도 범위	-	>60°C	>54°C	29~41°C(정상) >60°C(한계)	>65°C
한계 일산화탄 소 농도	-	>1,000ppm	0~2,000 ppm	>1,000 ppm	<100 ppm
Smolderin g 화재 증상	주기적으로 매 립가스 질소 농 도 모니터링 매립가스 포집 관 온도 63°C 이상시 플라스 틱 포집관 케이 싱 붕괴 가능	매립가스 포 집구역에 진 공 적용 산소 농도 높 고, 일산화탄 소 1,000 ppm 이상, 매립가스 온 도 60°C 이상 국지적 침하 촉진 연기, 악취, 연소 잔재물	매립지 화재 는 과도한 공 기 주입으로 발생	매립가스 일산 화탄소 농도 증 가시 일산화탄 소 농도 모니터 링 화재 발생시 매 립지에 질소나 이산화탄소 주 입으로 화재 제 어 매립가스 온도 >75°C, 복토층 급격한 침하, 일 산화탄소 1,000 ppm 이상 검출	과도한 질 소 농도는 산소 소모 임 일산화탄소 는 화재 지 표임 메탄 농도 가 45% 미 만으로 낮 아짐

^{*5} 'Field Procedures Handbook for the Operation of Landfill Biogas Systems', ISWA(2005)

^{*6} 'Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines', Conestoga-Rovers and Associates, Ministry of the Environment(ME), British Columbia(BC)(2010.3)

^{*7} 'Guidance of Evaluating Landfill Gas Emissions from Closed or Abandoned Facilities', US EPA(2005.9)

^{*8} 'Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems, Engineering Manual, USACE(2008.5)

^{*9} 'Higher Operating Value Demonstrations and Response to Comments, Ohio EPA(2010.12)

1. 매립지 내부 화재 사례

< 매립지 정상 조건의 매립가스 조건 >

매립지 특성 인자	조건
매립가스 포집정 온도	<150°F(66°C)
메탄 농도	>45%
산소 농도	<1.5%
일산화탄소 농도	<100 ppmv
Balance gas	<8.5%
CH ₄ /CO ₂	>1.0

3 매립지 내부 화재 발생 사례

3-1. West Lake 매립지 화재

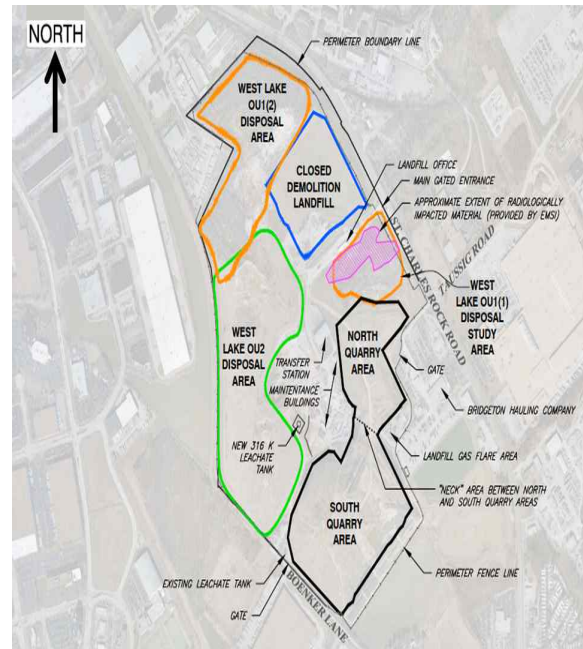
[West Lake 매립지 개요³⁾]

- 'West Lake' 매립지 위치 : 미국 미주리(Missouri) St. Louis County Bridge 도시
- West Lake 매립지는 0.81 km² 면적에 1940년대나 1950년대부터 2004년까지 폐기물이 매립된 매립 종료 시설임
- 1939년부터 1988년까지 부지가 석회암 채석과 파쇄 작업에 사용됨
- 1940년대 말부터 1950년대 초까지 일부 지역에서 생활폐기물, 산업폐기물 및 건설폐기물이 매립됨
- 1973년 맨하탄 핵에너지 프로젝트에서 발생한 황산바륨 잔재물 8,700톤이 39,000톤 흙과 함께 혼합 매립됨
 - ※ 황산바륨 : 맨하탄 프로젝트(핵무기 생산) 중 우라늄 농축 프로그램 부산물
- 1974년 이후 1985년까지 북쪽지역(North Quarry Pit)에 매립이 진행됨
- 1985년 이후 남쪽지역(South Quarry Pit)에 매립이 진행되어 2004년 12월 매립 종료
- Superfund 사이트 지정(1990년, EPA) : 매립지 복원(clean up) 지정
- 'West Lake' 매립지는 4개 구역으로 구성됨
 - OU1(Operable Unit 1) : 방사성 오염 폐기물
 - OU2(Operable Unit 2) : 잔재물 혼합폐기물
 - Bridgeton 위생매립지
 - 건설폐기물 매립지
- Bridgeton 위생매립지는 'neck'의 좁은 구역에 의해 북쪽 구역과 남쪽 구역으로 나누어져 있음
- OU(Operable units) 1구역 40에이커에 다중 커버 설치(2008년)

[West Lake 매립지 내부 화재 진행 경과⁶⁾]

- 2010년 12월 23일 : Bridgeton 위생매립지 남쪽지역 일부 매립가스 포집정에서 높은 온도 측정, 수소, 일산화탄소 농도 증가 및 메탄 농도 감소
- 2011년 봄 Bridgeton 매립지 내부 온도 상승을 막기 위한 조치 실시
- 2011년 겨울까지 매립지 침하가 정상 수준으로 유지되나 매립가스 포집정 온도는 여전히 높음

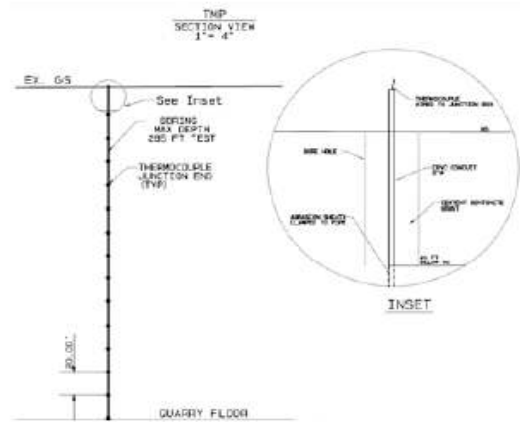
1. 매립지 내부 화재 사례



West Lake 매립지 항공 지도 개요

- 2012년 1월부터 2013년 7월까지 매립지 내부 화재로 발생한 악취를 관리하기 위해 매립지 덮개에 상당한 부피의 토양과 HDPE 멤브레인 라이너(44,515 m², 13,466 평)를 추가 설치함
- 2012년 봄 침하 정도가 일반 매립지 예상 수준보다 크고 악취 농도가 증가하여 인근 주민의 악취 민원 발생
- 2012년 4월 매립지 전문가로부터 매립지 내부 화재 발생 확정 받음
 - 매립지 내부 화재는 일반 폐기물 매립지에서 발생되고 있으며 인근 방사성폐기물 매립지에 영향 없음
- Bridgeton 매립지 운영자는 고체폐기물관리프로그램(Solid Waste Management Program)과 매달 1회 이상 회의 진행
 - 악취, 매립가스 포집정 온도, 일산화탄소, 침출수 등 화재관리 관련 회의
- 2012년 6월 2일 매립가스 포집 및 제어 시스템 보완을 위한 요청서 제출
- 2012년 7월 11일 고체폐기물 관리 프로그램에서 매립지 내부 화재 발생으로 인한 악취 발생으로 주민 건강을 위협함으로 범위반 통지
- 2013년 4월 대기로 배출되는 매립가스와 악취를 저감하기 위해 매립지 남쪽 지역에 40개 매립가스 포집정 추가 설치 완료
- Bridgeton 매립지에서 온도 모니터링 전극을 설치하여 남쪽 지역과 북쪽 지역 사이 좁은 구역쪽으로 내부 화재 확산을 점검하고 매립가스 포집정 온도 모니터링
 - 온도 모니터링 전극을 폐기물층에 6 m 간격으로 수직 칼럼에 설치하여 매립지 내부 폐기물 온도 측정

I. 매립지 관리 분야



Bridgeton 매립지 온도 모니터링 전극 사진 및 구성도



Bridgeton 매립지 온도 모니터링 전극 설치 현장

- 남쪽 지역에서 북쪽 지역으로 매립지 내부 화재 이동을 최소화하기 위해 매립가스 인터셉터(interceptor) 관을 2줄로 설치함
 - 첫 번째 관은 온도 모니터링 전극의 첫 번째 줄에서 북쪽으로 15 m에 설치됨
 - 두 번째 관은 첫 번째 관에서 북쪽으로 15 m 떨어져 설치됨
- 인터셉터 포집관은 특별히 설계된 매립가스 포집정으로 낮은 압력 구역을 형성해 매립지 내부 화재로 발생된 매립가스와 열이 안전하게 제거되도록 함
 - 매립가스 인터셉터 포집관 운영으로 매립가스와 열이 인터셉터 관으로 이동되어 인근 매립지 온도가 계속해서 높아짐



Bridgeton 매립지 매립가스 인터셉터 포집정과 온도 모니터링 전극

1. 매립지 내부 화재 사례

- 2013년 5월 13일 합성 덮개 시스템 설치 승인
- 2013년 6월 3일 매립지 남쪽 지역에 6개의 강화 콘크리트 파이프 제거 완료 및 25개 포집 웅덩이 설치



Bridgeton 매립지 포집 웅덩이 설치 현장

- 2013년 8월 9일 남쪽지역 중간 덮개 시스템 설치 완료



Bridgeton 매립지 사진(2013년 8월)

- 2013년 8월 19일 HDPE 라이너가 악취 포집에 효과적이지 못하여 에틸렌비닐 알코올(EVOH) 재질의 덮개로 매립지 지표를 덮기로 함
 - 매립지는 개선된 침출수 처리 시스템 건설과 소각 시스템 설치 준비 지속
- 2013년 8월 27일 추가적인 온도 모니터링 전극 설치 계획 통지
- 2013년 9월 14일 효율적인 악취 제어 위해 기존 HDPE 라이너 위에 EOHV 라이너 추가 설치 시작
 - 주민의 악취 저감 보고
- 위생매립지에서 발생한 화재가 방사성 폐기물이 매립된 OU-1 구역에 도달하지 못하도록 분리막 설치 명령(2013년 9월)
 - EPA 매립지 South Quarry 구역에 분리막 설치 감독

I. 매립지 관리 분야

- 2013년 9월 20일 분리벽 설치 포함한 추가적인 복원 시설 설치계획 보고
- 2013년 11월 1일 북쪽지역 30개 매립가스 포집정 설치 시작
 - 기존 매립가스 포집정을 뚫을 때 악취 배출을 최소화하기 위해 악취중성제와 진공박스 설치
- 2013년 12월 12일 영하 날씨하에 펌프 오작동으로 침출수 약 151.4 m³ 유출되어 침출수 세척 작업 중 악취 발생 보고
- 매립지 지표 아래 온도가 93℃까지 높게 측정됨(2014년 5월)
 - 화재는 46 m 깊이까지 발생
- 매립지 지표면 화재(2014년 2월)는 파이프가 깨져서 산소가 덮개(cap) 밑으로 유입되어 플라스틱 커버 일부 연소
- 매립물을 파내서 화재를 진압하는 시도는 거의 불가능함
 - 산소가 유입되어 화재 발생 가능성 높아짐



West Lake 매립지 현장⁷⁾



2014년 2월 매립지 화재⁷⁾

[West Lake 매립지 내부 화재 확산¹⁾]

- Bridgeton 매립지는 심각한 smoldering 화재로 지역사회 매립가스 배출, 지하수 및 지표수 오염, 매립지 기반 시설 손상
 - 2012년 5월 침하 확대가 지속되고 매립지 손상이 계속되고 있음
- Bridgeton 매립지 남쪽 지역에서 가열반응이 북쪽 지역으로 확산됨
 - 화재 초기 확산 속도는 남쪽 지역에서 0.85~0.91 m/일이고 이후 0.30~0.61 m/일 속도로 확산되고 있음

7. 'West Lake Landfill', Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/West_Lake_Landfill#cite_note-MDNR14-18

1. 매립지 내부 화재 사례



매립가스 포집관
손상(2012년)

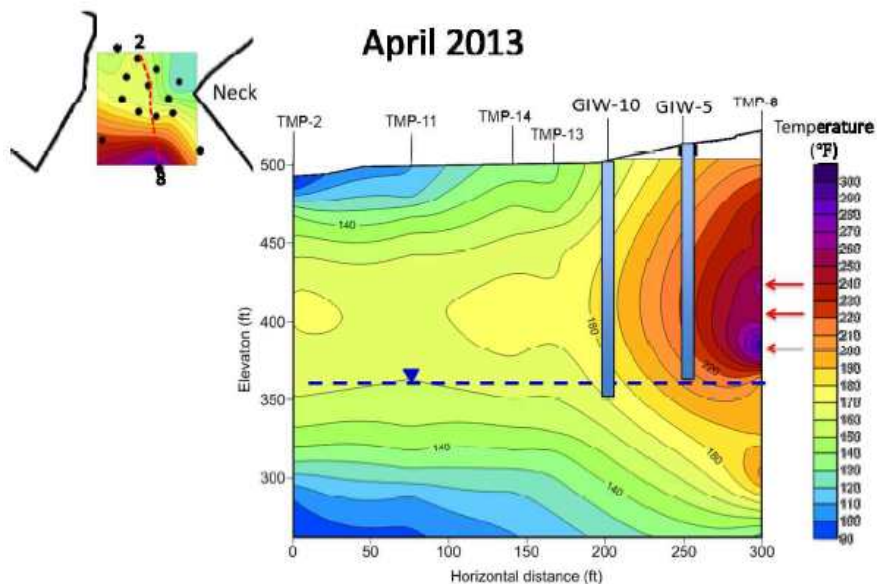


FML 열손상(53°C)
(2013년 4월)



부풀어 오른 FML
(2013년 5월)

- 74°C 이상 온도를 열전선 지표로 볼 때 열전선이 북쪽 온도 모니터링 전극까지 도달함
- 훈소 화재는 남쪽 GIW-5, 6, 8, 10 사이 발생한 것으로 예측됨
- 추가적으로 시간 경과에 따른 일산화탄소 측정으로 화재구역 확산 확인 필요
- 시간 경과 매립지 온도는 지속적으로 높아지고 있어 43 m 깊이에서 온도가 149°C 이상 높아짐



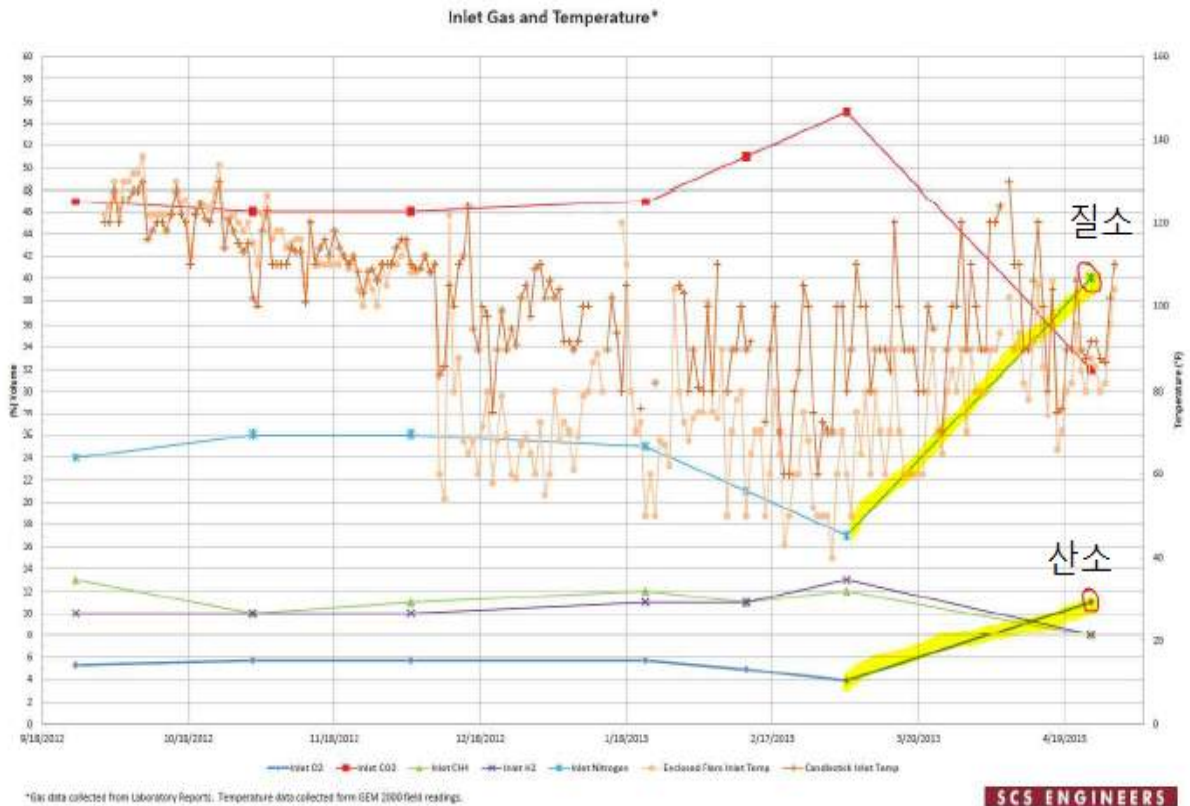
Bridgeton 매립지 smoldering 가열구역 단면적(2013년 4월)

- 2013년 4월 초 산소와 질소 농도가 급격히 증가됨
 - 질소 농도 40%, 산소 농도 11%로 보고됨
- 매립가스 포집 시스템이 과도하게 포집됨
 - EPA NSPS(New Source Performance Standards) 규정 : 매립가스 포집 시스템

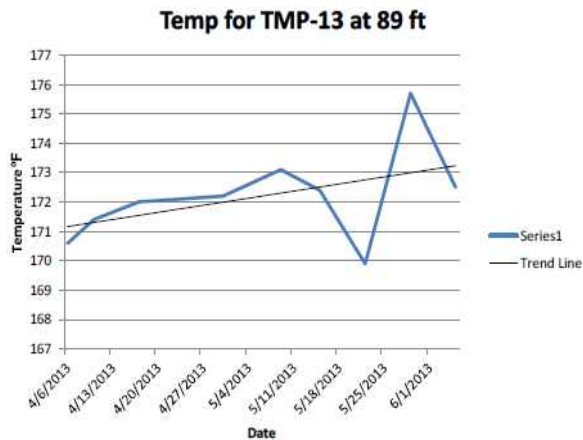
I. 매립지 관리 분야

내부 매립가스 온도가 55℃ 미만으로 유지되어야 하고 질소는 20% 미만, 산소는 5% 미만 유지되어야 함

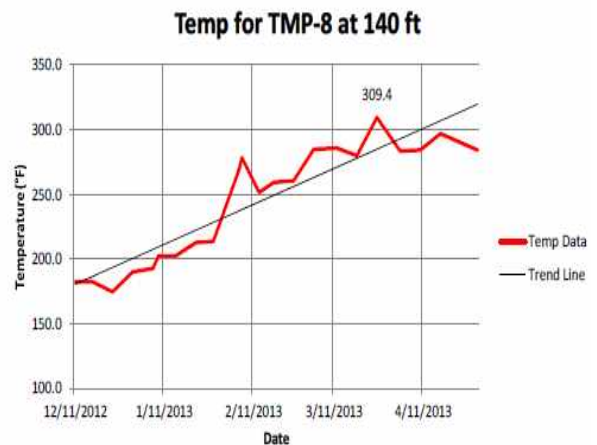
- 위 규정보다 엄격한 기준으로 운전시 화재 방지 및 혐기성 분해 조건 유지됨
- 2013년 3월 5일 GIW-12 포집관에서 산소 농도 11.8% 측정
- 2013년 4월 매립가스 중 산소 농도 5.4~17.6%로 측정됨



Bridgeton 매립지 매립가스 중 질소, 산소 농도 변화



TMP-13 27 m 깊이 온도 변화



TMP-8 43 m 깊이 온도 변화

- 가스주입정(GIW, Gas Injection Well) 시스템으로 남쪽지역에 가열된 매립가스를 포집하고 북쪽지역 냉각된 매립가스를 포집함
 - GIW로 매립가스를 포집하면서 과도하게 산소가 주입되지 않도록 해야 함
 - 지하 smoldering 화재를 제어하는 정도를 평가하기 위해 장기간 온도와 일산화탄소 모니터링 필요함
- GIW 시스템 매립가스 온도가 74℃ 미만으로 감소될 때까지 매주 온도 자료 제출함
- 매립지 운영자는 북쪽 지역에 추가로 온도 모니터링 전극을 설치하고 매립지 내부 화재 확산을 제어하기 위한 인터셉터(interceptor) 관을 설치하며 남쪽 지역과 같이 북쪽 지역에 매립지 지표에 덮개를 설치해야 함
 - 북쪽 지역과 방사성 폐기물이 매립된 OU-1 지역 사이 분리벽 설치 계획 및 일정 제출 필요
- 매립지 운영자가 남쪽 지역과 북쪽 지역 사이 좁은 구역에 수직 콘크리트 벽을 설치하지 않는 대신 화재 확산 차단 구역에 차단용 매립가스 포집정을 13개 설치함
 - 운영자는 매립지 운영 기준 초과시 북쪽지역과 OU-1 사이에 분리벽을 즉시 설치해야 함
 - 매립지 온도와 일산화탄소 농도에 따른 분리벽 설치 기준 제시

[West Lake 매립지 내부 화재 확산방지 권고사항¹⁾]

- 악취 저감과 산소 주입 최소화를 위해 남쪽지역 임시 덮개 설치 계속
- 북쪽 지역 260℃까지 측정가능한 온도계 5~6개가 부착된 라인 설치
- 매립가스 포집정과 온도 측정 라인을 감시 라인으로 사용하여 기준 초과시 북쪽 지역 매립지와 OU-1 사이 화재 분리벽 즉시 설치
- 매립지 온도와 매립가스 일산화탄소, 메탄, 수소 농도 자료 주간 보고
- 매립가스 포집정 산소 농도 5% 미만 유지 및 혼소 화재 매립지 산소 농도 1% 미만 유지되도록 운전
- 매립가스 및 폐기물 온도 82℃ 초과시 매립지 산소 농도 1% 미만 유지 및 매립가스 포집정 내부 산소 농도 0.5% 미만 유지
- 북쪽 지역 모든 매립가스 포집정 산소 농도 1% 미만 유지
- 매립가스 포집 시스템 설계 및 운전사항을 점검하여 진공 운전 조건의 최소화 및 과도한 포집 지양
- 남쪽 지역과 북쪽 지역 사이 좁은 구역에 수직 벽체를 60일 내에 설치 필요
- 북쪽 지역 매립지 상부에 덮개 설치로 산소 유입 최소화 및 악취 발생 저감
- 매립가스 온도가 73℃ 미만이 될 때까지 매립가스 온도 주단위 보고

I. 매립지 관리 분야

< 미주리 Bridgeton 위생매립지 분리벽 설치 기준 >

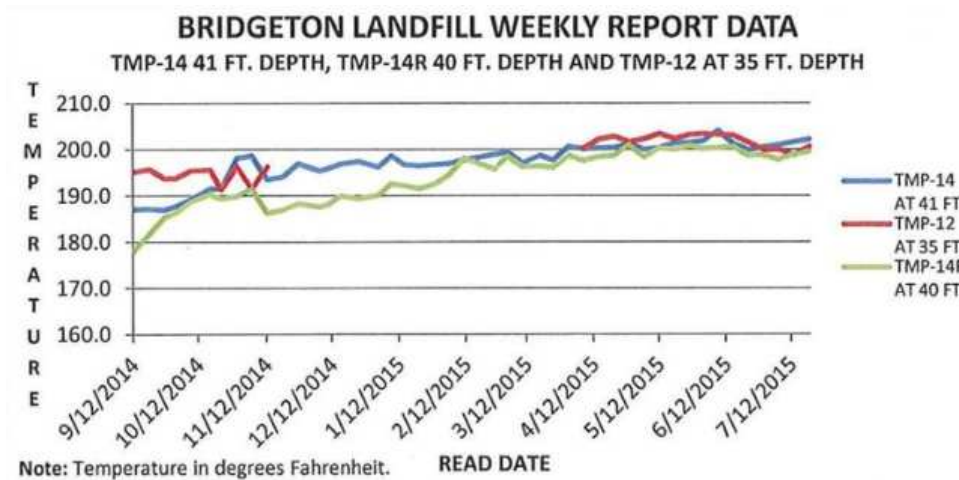
지표	CO 농도 및 온도	분리벽 필요 여부	특성
일산화탄소 농도 + 온도			
북쪽 지역 1개 이상 매립가스 포집정 일산화탄소 농도	> 1,500 ppm	필요함	CO 농도 실험실 반복 측정 결과 48시간 내 소방당국 보고
북쪽 지역 2개 이상 매립가스 포집정 일산화탄소 농도	> 1,000 ppm	필요함	4주 동안 4번 재측정결과 1,000 ppm 초과 5일 안에 소방당국 보고
북쪽지역 매립가스 포집정 일산화탄소 농도	< 1,000 ppm	필요없음	지속적인 모니터링 계속함
온도			
북쪽지역 1개 이상 온도	> 93°C	필요함	8시간 내 반복 측정결과 소방 당국 48시간 내 보고
북쪽지역 매립가스 포집정 온도	> 82°C	필요함	8시간 내 반복 측정결과 소방 당국 48시간 내 보고
일산화탄소 농도 + 온도			
북쪽지역 매립지 내부 온도나 매립가스 포집정 온도 1개 이상 매립가스 포집정 일산화탄소 농도	> 90°C + > 1,500 ppm	필요함	8시간 내 반복 측정결과 소방 당국 48시간 내 보고
북쪽지역 매립지 내부 온도나 매립가스 포집정 온도 1개 이상 매립가스 포집정 일산화탄소 농도	< 90°C + < 1,500 ppm	필요없음	매주 온도 모니터링 지속

[2015년 운영 현황⁸⁾]

- Bridgeton 매립지 북쪽 지역과 남쪽 지역 사이 좁은 구역에서 온도가 지속적으로 상승중임(2015년 8월 기준)
 - 매립지 내부 화재가 북쪽 지역에서 남쪽 지역으로 이동되고 있으며 방사성 폐기물 매립 지역으로 전파되지는 않는다고 함
 - 남쪽 지역 매립지 내부 화재는 4년 이상 지속되어 악취나는 연기 발생으로 인근 주민들이 천식, 메스꺼움 등 건강문제를 호소하고 있음

8. 'State regulators demand new measures to contain landfill fire in Bridgeton', Véronique LaCapra, St.Louis Public Radio, August 17, 2015

1. 매립지 내부 화재 사례



West Lake 매립지 좁은 구역(neck) 온도 변화



West Lake 매립지 좁은 구역(neck) 위치

- 새로운 매립지 내부 화재가 북쪽지역 발생 가능⁸⁾
 - 1992~1994년 북쪽 지역 동쪽 벽에 온도가 427~538℃까지 높아짐
 - 2015년 6월 북쪽 지역 중 7개 구역에 과도한 메탄 배출이 있고 3개 구역에서 오염된 폐수나 침출수가 분출됨⁸⁾
 - 북쪽 지역에 매립된 산업폐기물에 방사성 폐기물이 함유되어 있을 수 있음
 - 높은 고도에 있는 북쪽 지역 폐기물이 매립지 내부 화재가 진행 중인 남쪽 지역으로 이동될 수 있음
 - 2015년 8월부터 3개월 안에 화재를 진압할 수 있는 불활성 가스 주입을 포함한 화재 진압 계획 제출 요청
 - 2015년 12월 1일까지 매립지 내부 화재가 북쪽으로 이동시 열, 압력, 가스 제어를 위해 북쪽지역 매립가스 포집정 연결 작업 종료
 - 북쪽지역에 사용하지 않는 대형 콘크리트 파이프를 제거하여 지하로 산소 유입 제거
- ※ 유사한 파이프를 남쪽 지역에서 2013년 제거함

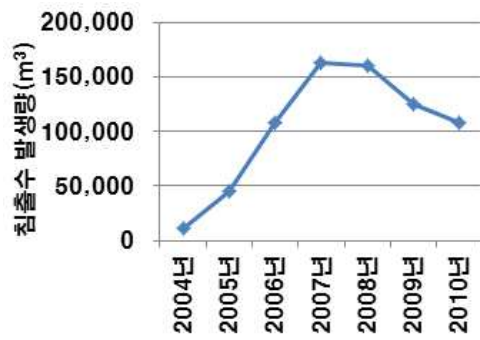
I. 매립지 관리 분야

- 북쪽지역 플라스틱 덮개를 강화하여 산소 유입 방지 및 유독한 매립가스 배출방지
 - 덮개를 개선하여 매립지 인근 지하수, 지표수가 오염될 수 있는 침출수 유출 방지
 - 북쪽지역 매립가스 포집정 산소 농도 1.5% 미만 유지
 - 북쪽지역 내부 화재 발생과 이동을 나타내는 폐기물 감소나 공극 발생을 모니터링 하는 조사시설 설치

3-2. Countywide RDF 매립지 화재⁶⁾

- 미국 EPA에서 다른 사이트로부터 알루미늄 폐기물을 제거하여 1993년부터 1997년까지 알루미늄 찌꺼기(dross) 31만 2천톤 매립 및 기타 알루미늄 폐기물 21만톤 매립
 - 2001년까지 알루미늄 폐기물 염(salt) 케이크(cake)가 지속적으로 매립되었고 2006년까지 집진기 먼지도 매립됨
 - 1996년, 1997년 침출수 재순환이 시작됨
- Countywide RDF 매립지에서 침출수 발생량 증가
 - 연간 4~5백만 갤런(15,140~18,925 m³) 발생량이 연간 4천만 갤런(151,400 m³)으로 증가되어 약 10배 정도 증가됨
 - 침출수의 염 농도 상승
 - 매립가스 온도가 121~138°C (250~280°F)로 높음
 - 비정상적인 침하 발생 : 몇 달만에 6.1 m 침하되어 총 18.3 m 침하 발생
 - 경사면 이동 및 약취 발생
 - 2006년 7월부터 2007년 1월 사이 민원 발생 급증
- Countywide RDF 매립지 대처방안
 - 침출수 재순환 금지
 - 일시적으로 FML 커버 설치
 - 셀5와 셀7 사이 분리시설(isolation break) 설치
 - 경사면에서 FML 커버가 찢어졌으나 녹지는 않음
 - 총 천백만 달러 벌금 부과

1. 매립지 내부 화재 사례



Countywide RDF 매립지 침출수 발생량 변화



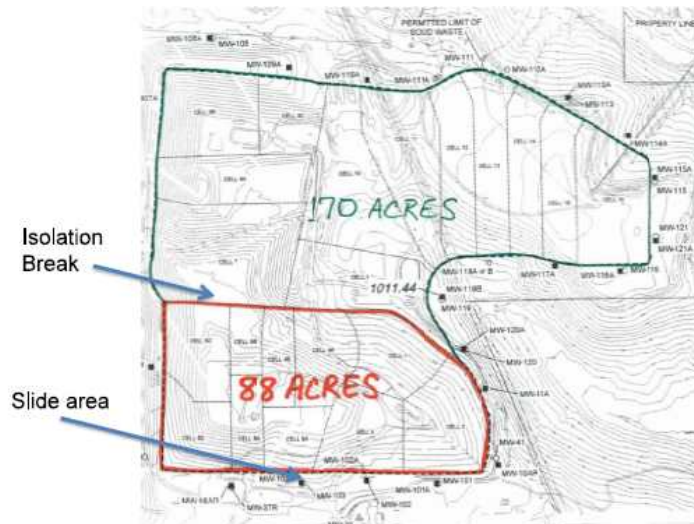
매립가스 압력상승



2006년 여름 Countywide RDF 매립지



2010년 4월 Countywide RDF 매립지



Countywide RDF 매립지 분리시설 및 슬라이드 구역 위치



Countywide RDF 매립지 사진



셀 5, 셀 7 사이 분리층
(40만톤 폐기물 제거)

I. 매립지 관리 분야

3-3. 오하이오 주 매립지 내부 화재 사례⁶⁾

○ 오하이오 주 27개 매립지 모니터링 결과 15개 매립지가 뜨겁고(hot) 12개 매립지가 뜨겁지 않음(not hot)

- 19개 매립지가 젖은 매립지이고 8개 매립지가 건조한 매립지임



오하이오 주 27개 매립지 현황

○ Athens Hocking 매립지는 알루미늄 폐기물을 매립해 옴

- 1994년 이후 알루미늄 폐기물로 매립지 공극을 채워 밀도를 높이는데 사용됨
- 연간 평균 6만4천톤이 반입되어 폐기물의 30%가 매립됨
- 침출수가 재순환됨

○ Athens Hocking 매립지에서 매립가스 온도 모니터링관에서 측정결과

- 생활폐기물 온도 60~66℃, 알루미늄 폐기물 온도 107℃, 혼합 매립구역 온도 99℃로 높아짐



Athens Hocking 매립지 화재 발생 및 열벽체 설치

○ 2007년 침출수 재순환이 금지됨

- 129,499 m² 총매립 면적에 단독 매립구역(monocell)은 32,375~40,469 m² 임
- 생활폐기물 매립구역과 단독 매립셀 사이에서 화재 발생
- LCS 상부 열벽체 설치
- 라이너 아래 온도 전극 설치(1 에이커 당 설치)

○ Rumpke 매립지 온도가 204°F(96℃)로 높아지고 일산화탄소 농도가 11,000 ppmv로 높고 메탄 농도는 낮아짐

- 1주만에 침하가 최대 30.5 cm 발생
- 침출수 재순환은 없으며 알루미늄 폐기물 매립 없음

○ Rumpke 매립지에서는 악취를 관리하기 위해 복토재로 진흙, 플라스틱 및 마스킹제(masking agents) 사용

- 매립지 구조적 안정성을 유지하기 위해 부벽(buttress) 설치 및 모니터링 실시
- 매립 구역에 온도, 매립가스를 주기적으로 샘플링하여 분석함

○ ELDA 매립지에서 싱크홀, 악취, 연기, 증기 발생

- 화재 구역에 온도, 매립가스를 주기적으로 샘플링하여 분석함
- 구멍 아래 4.16 m³ 벤토나이트가 매립되어 토양으로 덮여져 있음
- 가장 가까운 매립가스 포집관에서 매립가스는 양호하며 일산화탄소 없고 매립가스 온도는 127°F(52℃)로 다른 포집정 온도와 비슷함
- 더 이상의 침하나 경사면 이동은 없음



ELDA 매립지 싱크홀

I. 매립지 관리 분야

3.4. 캐나다 매립지 내부 화재 사례⁹⁾

[캐나다 Delta Shake and Shingle 매립지 화재 진압 사례]

- 캐나다 North Delta 지역에 위치한 Delta Shake and Shingle 민간 매립지에서 1999년 11월 9일 불꽃 화재 발생
 - 화재 발생 전 증기와 연기가 몇 주간 배출되었으나 지표로 불꽃이 발생되기까지 아무도 매립지 내부 화재를 알지 못함
 - North Delta 소방서에서 매립지 지표면 화재 진압
- 1999년 11월 11일 매립지 셀 상부에서 3 m 깊이로 42~84 m² 넓이의 싱크홀이 발생되면서 불꽃이 다시 분출됨
 - 이로써 행정 당국이 매립지 내부 화재가 지속됨을 확인함
- 화재로 인한 연기로 벤쿠버 지역 지평선에 두꺼운 안개가 형성되었으며 인근 하천은 화재 진압 침출수에 의해 오염될 위기에 처함
 - 인근 시설 작업자들은 악취와 연기로 피해입음
 - 인근에 고압 천연가스 공급관과 하수관 시설, 물 공급 시설, 고압 송전선 및 철도가 있어 매립지 경사면 붕괴와 과도한 침하 발생시 인근 시설에 위협이 됨



불도저로 불꽃 진압



뜨거운 폐기물 진화



물 재순환 및 등급 A 거품제

- 화재를 효율적으로 진압하기 위해 컨설팅 회사에서는 화재 지역을 토양이나 지오멤브레인으로 덮거나 화재 지역에 살수하거나 매립지 산소를 제거하기 위해 이산화탄소를 주입하거나 타는 물질을 파내서 거품으로 소멸하는 방법 등 제시
 - 타는 물질을 파내는 방법이 선택됨
- 연소구역(33,445 m²)을 폐쇄하기 위해 PVC 라인을 급히 설치하여 냉각하고 연소되는 폐기물을 파내서 적셔 진화한 뒤 다시 매립함
 - 불꽃을 제어하기 위해 화재 구역을 2~3 m 높이로 폐기물로 덮고 살수하여 지표면 화재를 진압함
 - 굴착기와 트럭으로 타는 물질을 냉각 지역으로 옮겨 거품으로 진압함
 - 약 2개월간 화재를 진압하였으며 비용은 약 200만 달러(캐나다 기준) 소요됨

9. 'Providing a full range of landfill fire control and prevention services world wide', Landfill Fire Control Inc., 'http://www.landfillfire.com/index.html'

[캐나다 밴쿠버 매립지 화재 진압 사례]

- 밴쿠버 지역에서 20 km 남쪽 Delta 지역에 위치한 매립지로 밴쿠버 시에서 운영하고 있으며 매년 400,000톤이 반입되고 있음
 - 주로 폐목재로 구성된 건설폐기물이 반입되어 생활폐기물 아래 층 설치에 사용됨
- 2000년 10월 18일 매립지 내부 화재 발견시 약 50 m² 면적에 60 cm 깊이로 침하 발생 및 연기 배출
 - 내부 화재 발견 전 증기가 배출되었으나 매립지 내부 자발적인 화재로 예측하지 못함
 - 건설폐기물 셀(80 × 700 m²) 8 m 높이 층에 화재 발생
- 매립지 토목공사 계약사에서 3대 덤프 트럭으로 물을 매립지 현장으로 이송함
 - 각 트럭으로 2만 리터의 물을 24시간 내내 이송함
- 매립지 지표에서 여러 배출구로 증기와 연기가 계속해서 배출되면서 매립가스 측정기 설치
 - 일산화탄소, 산소, 메탄, 황화수소 농도 및 온도를 측정하여 일산화탄소와 산소 농도가 높음을 확인함



트럭으로 19 m³ 물 이송



탐재된 모니터로
0.76 m³/분 이송



매립지 화재 제어 전문가의
매립가스 측정기 설치

- 드럼 트럭과 펌핑 시스템으로 2,000 m 떨어진 연못에서 물을 끌어와 연소구역에 살수함
 - 공기가 화재구역에 유입되는 것을 막기 위해 연소되는 셀 경사면에 점토 복토층을 설치함
- 일주일 내 모니터링 결과, 온도, 일산화탄소 및 산소 농도가 감소되었음
 - 2000년 10월 27일 매립지 내부 화재가 진압되었다고 확인되었음
 - 총 화재 진압 비용은 8만 달러(캐나다 달러 기준)임
- 본 화재는 중간복토층 공극으로 산소가 유입되어 폐기물 호기성 분해에 의해 온도가 높아지고 발열성 열분해로 대규모 화재가 발생한 것임
 - 밴쿠버 시에서는 빠른 대처로 매립지 화재를 2주 안에 완전 진압할 수 있었음

I. 매립지 관리 분야

[캐나다 Campbell Mountain 매립지 화재 진압 사례]

- Campbell Mountain 매립지는 1972년 운영을 시작하여 라이너, 침출수 포집 시스템 및 매립가스(메탄) 포집 시스템이 없음
 - 반입된 폐기물은 초기 소각용과 매립용으로 구분되어 처리됨
 - 생활폐기물, 산업폐기물 및 하수슬러지가 매립됨
- Campbell Mountain 매립지에서 매립지 내부 화재 재발생
 - 이전 화재에서는 폐기물을 파내고 살수하여 진압함
 - 화재 진압 비용은 적었으나 화재 진압은 제한적임
- 1998년 매립지 내부 화재를 완전히 진압하고 화재 재발생을 막기 위해 3단계 화재 진압 계획을 수립함
 - 1단계로 매립지 지표에 불투수성 점토층을 설치하고 기반암 가장자리에 숏크리트로 처리하여 공기 유입을 차단함
 - 덮개의 효율성을 평가하기 위해 8개의 시추공을 설치하고 시추공 내부에 온도 센서를 5 m 간격으로 설치하여 매립지 내부 온도 측정
 - 시추공에 포집정도 설치되어 일산화탄소를 포함한 매립가스 농도 측정
- 월별 매립지 온도와 분기별 매립가스 농도를 측정하여 모니터링함
 - 점토 벽체와 숏크리트에 의한 기밀로 화재 구역 산소 공급이 중단되어 화재가 진정됨
 - 특히 화재 발생 주위 온도가 감소되면서 2, 3 단계 화재 진압 프로그램은 유보됨



모니터링 점 설치



숏크리트로 부서진
기반암 밀봉

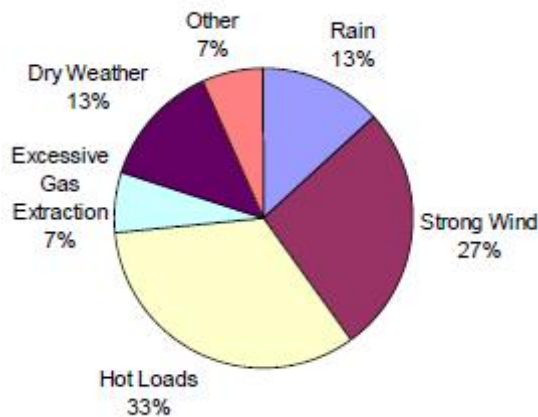


지속적인 사이트 모니터링

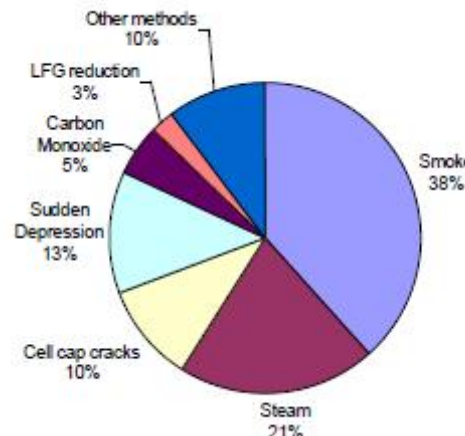
3-5. 미국 매립지 내부 화재 사례 설문조사 결과⁵⁾

- 미국 50개주 매립지에 이메일 보내 매립지 내부 화재 관련 설문조사 실시
 - 32개 답변 중 22곳에서 매립지 내부 화재 발생된 경우이고 10곳은 매립지 지표 화재임
- 매립지 내부 화재는 침출수 재순환 매립지와 일반 매립지 모두에서 발생함

- 매립지 자발적 화재 발생 전 비, 강풍, 뜨거운 폐기물 매립, 과도한 매립가스 포집 등이 있었음
 - 이외 특별한 산업폐기물이나 반응성 폐기물이 매립된 경우가 있음
- 매립지 화재 발생 전 수분 변화, 공기 유입 및 높은 온도의 폐기물 매립이 화재의 주요 요인임을 알 수 있음



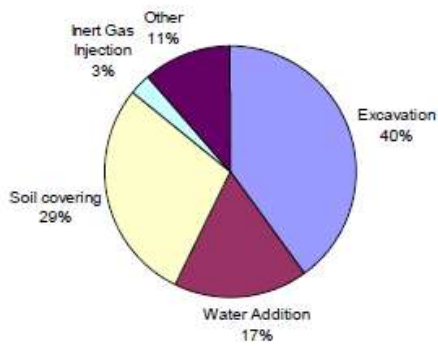
매립지 화재 발생 전 현황



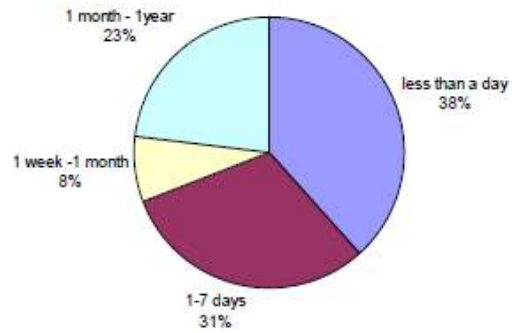
매립지 화재 발견 방법

- 매립지 화재의 59%는 지표면으로 연기나 증기가 배출되면서 발견됨
 - 이외 급격한 침하(13%), 복토층 균열(10%), 높은 일산화탄소 농도(5%), 매립가스 발생량 감소(3%)으로 알 수 있었음
 - 기타(10%) 매립가스의 높은 온도, 침출수 포집 시스템에서 불꽃 및 연기 발생으로 발견됨
- 매립지 화재 진압 방법으로 공기가 화재 구역으로 유입되지 않도록 하거나 연소 폐기물을 냉각하는 방법이 있음
 - 주된 화재 진압 방법으로 연소되는 폐기물을 파내서 진압하는 방법(40%)과 흙으로 덮는 방법(29%)이 있음
 - 살수에 의한 화재 진압은 17% 정도로 토양 복토나 폐기물을 파내서 살수하는 방법이 사용됨
- 물이 화재 구역에 주입되면 타는 물질이 냉각될 수도 있지만 훈소 연소가 촉진되어 온도가 높아질 수 있음
 - 또한 물이 폐기물 사이 이동되기 쉬운 통로로 이동되어 화재 구역까지 물이 투입되지 않을 수 있음
- 불활성 기체 주입한 경우는 3% 정도에 그침
- 기타(11%) 방법으로는 거품(foam)이나 지오 멤브레인으로 폐기물을 덮거나 매립가스 포집 시스템을 폐쇄하는 방법이 있었음

I. 매립지 관리 분야

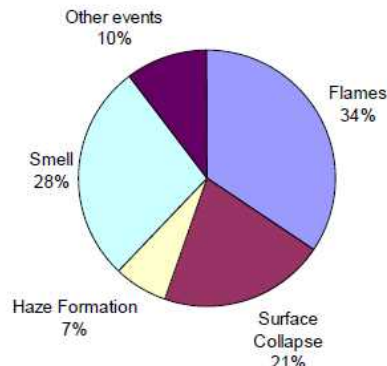


매립지 화재 진압 방법



매립지 화재 진압 시간

- 매립지 내부 화재 진압 시간은 몇 시간에서 1년까지 다양함
 - 38%는 24시간 내에 화재가 진압되었음
 - 31%는 1주만에, 18%는 한달 안에 진압되었으나 23%는 1개월 이상 1년까지 소요됨
- 매립지 화재 발생 중 현상으로 불꽃 분출이 34%로 가장 많고 불쾌한 냄새(28%), 매립지 지표 붕괴(21%) 및 안개 형성(7%)이 있음
 - 기타(10%) 불완전 연소 생성물 배출 및 화재 진압으로 인한 침출수 누출이 있음



매립지 화재 발생시 주요 현상

- 매립지 자발적인 내부 화재는 폐기물이 자가연소 온도 이상으로 온도가 높아짐에 따라 발생함
 - 폐기물 온도 상승은 폐기물의 자가 가열을 유발하는 발열반응에 기인함
 - 산소 주입으로 생물학적 폐기물 분해와 화학적 산화가 촉진됨
 - 수분 주입으로 매립지 내부 화재가 제어될 수 있지만 촉진될 수도 있음
- 설문 조사 결과 매립지 자발적인 내부 화재는 매립지 유형과 폐기물 유형 및 침출수 재순환 여부와 관련없이 발생됨
- 조사 결과 공기 주입, 수분 변화 및 폐기물의 온도 변화 등이 매립지 내부 화재 원인임
- 조사 결과 폐기물을 파내서 화재를 진압하고 압밀하는 방법이 가장 많이 적용되었음

4

매립지 내부 화재 방지 및 모니터링 방법

4-1. 매립지 내부 화재 방지 방법⁴⁾

[산소 관리]

- 매립지 내부 산소 유입을 최소화하여 호기성 미생물에 의한 분해를 최소화함으로써 폐기물 가열을 방지할 수 있음
 - 침출수 포집 시스템 경사면 공기 유입 가능
 - 매립지 내 급한 경사면으로 공기 유입(굴뚝 효과)
 - 바람, 온도, 기압 등 날씨에 의한 환경요인으로 공기 유입
 - 일일 복토층, 중간 복토층, 최종 복토층 유형 및 조건에 따라 공기 유입이 달라짐
 - 복토층에 투수계수가 낮고 점착력 있는 토양을 사용하고 복토층 균열을 제거하여 공기 유입 최소화
- 매립된 폐기물의 충분한 압밀로 매립지 공극 최소화
- 매립가스 포집 및 제어 시스템의 효율적인 관리
 - 정상운전시 매립가스 산소 최대 농도는 5% 미만으로, 최적 1.5% 수준으로 유지
 - 매립가스 포집관을 진공 상태로 운전하지 않음
 - 매립가스 포집 라인과 포집관의 구멍 및 균열을 보수하여 기밀 유지
 - 지속적으로 매립가스 포집 및 제어 시스템의 효율성을 평가하고 포집관 추가 설치
 - 매립가스 시스템을 고성능 운전 기준(Higher Operating Value)이 준수되도록 운전하고 운전 상태 보고
- 매립지 설계시 중복기능을 갖추도록 하여 매립가스 포집 및 제어 시스템 일부 수리시 분리작업하여 공기 유입 방지
- 깊이 매립된 셀(46~61 m)에 수평 매립가스 포집관을 설치하여 포집관 진공 발생 방지
- 중간 복토층으로 토양층을 조성하여 산소 유입 배제

[폐기물 반입 관리]

- 폐기물 반입 규약 및 검사로 매립지 내부 가열의 위험도를 낮출 수 있음
- 폐기물 발생자와 협업하여 반입 폐기물 특성 파악
 - 부적합한 매립 폐기물 확인(pH, 산화제, 물 반응도)
 - 발열 반응 특성을 지닌 폐기물을 구분하는 기준 수립

I. 매립지 관리 분야

- 폐기물 재(ash), 산업용 슬러지, 먼지, 연소가스 탈황시 발생된 슬러지를 “watch list”로 관리
- “Watch list” 폐기물의 매립 위치 기록 관리
- “Hot loads” 폐기물 관리 및 모니터링 실시
- 부적합한 폐기물 혼합 매립 금지
- 발열 특성 지닌 폐기물의 매립 깊이 제한
 - 약 46 m 깊이에서 적정 하중과 압력하에 발열반응 관찰

[액체 관리]

- 매립지 액체 주입을 최소화하여 적정 수분하에 발생하는 특정 폐기물의 발열 반응이나 호기성 미생물의 분해에 의한 가열 반응 최소화
- 매립지 강우 유입 제한 및 다른 액체 주입 제한하여 매립지 액체 관리
 - 침출수 재순환 등 매립지 추가 액체 주입 최소화 및 금지
 - “Watch list” 폐기물이 매립된 구역 응축수 및 침출수 재순환 금지
 - 효율적인 일일복토층, 중간복토층, 최종복토층 관리로 매립지 웅덩이 형성 방지 및 복토층 균열 보수로 강우 유입 방지
 - 지하수 침투 방지
 - 폭우 적정 관리로 지표수 유입 최소화
 - 가능한 빨리 최종복토층 설치
 - 침출수 포집관 위에 매립가스 포집관을 이중 수평관으로 설치
 - 매립가스 포집관에 수분을 제거하여 미생물 분해에 필요한 호기성 조건 형성 방지
 - 이중 매립가스 포집정 설치하여 매립가스 포집정 수분 제거
 - 매립된 물질 냉각 위해 필요한 가스나 액체 주입시 포집관 사용 가능

[매립지 가열 확산 방지 및 시설 보호 방법]

- 매립지 내부 가열 확산방지를 위한 방안은 매립지 설계 단계에 필요하며 발생 후 적용되지 않음
 - 매립지 ‘셀’ 사이를 토양이나 불연성 물질로 벽을 만들어 셀 사이 화재 확산 방지
 - “Watch list” 폐기물이 매립된 단독 셀로부터 액체가 유출되지 않으면 위 벽에 액체 이동 방지 기능은 필요 없음
- 매립가스 포집정을 매립지 내부 가열구역 주위에 설치하여 매립지 내부 압력, 열, 가스 및 액체가 배출되도록 함
 - 또한 매립가스 포집정으로 액체나 가스를 주입하여 가열된 구역을 냉각하여 가열구역 확산 방지

- 토목합성섬유(geosynthetics)로 구성된 임시 덮개와 매립지 구조물을 보호하기 위해 버퍼층 설치
 - 버퍼층으로 냉각제를 주입하거나 뜨거운 가스나 액체가 이동되지 못하도록 열 차폐벽으로 사용할 수 있음
- 높은 온도에서 손상되기 쉬운 토목합성섬유층에 천연물질을 이중으로 설치
 - 예로 침출수 포집층으로 Geonet와 자갈층 모두 사용할 수 있음
- 높은 온도와 화학물질에 저항력이 높은 물질 사용
 - 매립가스 포집 및 제어 시스템에 PVC 대신 스테인리스 스틸, 유리섬유, CPVC 사용
 - 침출수 포집 시스템에 내구성 강한 가스킷, 스테인리스 스틸, 밸브, 유연한 튜브 사용
- 액체 배출에 기계적 시스템 대신 중력 이송 설비 설치
- 매립지 내부 온도 모니터링 장치 설치하여 매립지 설비 위험도 모니터링 실시

4.2. 매립지 내부 화재 점검 방법⁴⁾

[매립지 점검]

- 매립지 내부 가열시 비정상적인 급속한 침하 발생
 - 매립지 공극으로 매립지 설비가 빠지고 싱크홀 형성
- 과도한 식물 성장
- 연기와 증기가 매립가스 포집 시스템이나 복토층 균열로부터 관측될 수 있음
 - 연기가 없다고 내부 가열 반응이 발생되지 않는다고 할 수 없음
 - 폐기물 중 발열반응으로 매립지 표면이나 매립된 폐기물 층에서 증기가 발생될 수 있음(추운 아침 매립가스가 증기로 보일 수 있음)
- 매립가스 포집정에 연소 잔재물(숯)이 발견될 수 있음
 - 응축수 잔류물 등 기타 침전물과 구분하기 위해 연소 잔재물 추정물질 실험실 분석 필요
- 뜨거운 가스나 열기가 매립지 지표로 이동시 지표면 눈 녹음
- (악취)휘발성 지방산이나 메르캅탄 같은 황화합물이 연소되어 타는 냄새 발생
 - 이외 암모니아나 화학물질 및 금속 악취 발생
- (과도한 액체 발생)매립가스 포집관이 과도하게 액체로 가득찰 수 있음
 - 침출수 수위가 펌핑으로 낮아진 후 웅덩이가 바로 찰 경우
 - 과도한 액체 발생이 계절적 변동이나 운전 요인이 아닐 경우 매립지 내부 가열 반응이나 화학 반응에 의해 수분이 형성되어 침출수 포집 시스템으로 이동될 수 있음

I. 매립지 관리 분야

[매립가스 분석]

- 매립지 내부 가열 발생시 매립가스 포집정 메탄 농도 감소, 과도한 질소와 산소 농도 상승, 양압 등 발생
 - 매립가스 중 메탄, 질소, 산소, 일산화탄소, 이산화탄소, 휘발성유기화합물, 수소 농도 분석
 - 매립가스 온도 및 압력 측정
- 매립지 내부 가열시 메탄 생성 미생물 활동이 높은 온도로 저해되어 메탄 농도가 45% 미만으로 감소
 - 메탄보다 이산화탄소 농도가 높을 경우 생물학적 혐기성 분해가 저해됨을 알 수 있음
 - 산소가 5% 이상, 질소가 20% 이상시 매립가스 포집 및 제어 시스템에 진공이 적용되고 있을 수 있음
 - 매립가스 중 밸런스 가스(balance gas)가 8.5% 이상시 매립가스 포집 시스템에 진공이 적용되거나 내부 가열반응으로 메탄, 이산화탄소, 산소 이외 일산화탄소나 수소 가스가 생성됨을 예측할 수 있음
- 매립지 내부 연소 방식에 따라 일산화탄소, 이산화탄소가 다른 양으로 생성됨
 - 매립지 내부 가열을 확인하기 위해 일산화탄소를 실험실에서 분석해야 함
 - 매립가스 중 일산화탄소 농도가 1,000 ppm 이상일 경우, 매립지 내부 가열반응의 지표로 볼 수 있음
 - 일산화탄소 농도가 100~1,000 ppm 일 경우 매립지 내부 화재가 의심되며 매립가스 온도와 대기 모니터링이 추가로 필요함
- 매립지 내 온도가 높아지면 배출되는 휘발성유기화합물 양이 증가됨
- 수소 농도가 5% 이상일 경우 매립지 내부 가열 반응을 의심할 수 있음

[매립가스 압력]

- 과도한 매립가스 압력은 매립지 내부 가열 반응의 지표로 볼 수 있음
 - 복토층에 균열이나 구멍 주위에 분기공(fumaroles), 분출(geysers), 토양 착색(staining) 발견
 - 비온 뒤 두꺼운 복토층 지표에 공기 방울이 관측될 수 있으나 매립지 내부 과도한 압력의 증표일 수 있음
 - 펌프 스위치 변환기가 잘못된 액체 수위를 나타내어 펌프가 고장(burn-out)날 수 있음
 - 매립가스 포집정에 과도한 압력 측정

[온도 측정]

- 매립가스 포집정에 매립가스 온도가 55℃ 이상시 매립가스 내부 가열 발생 예측
 - 혐기성 메탄 생성은 60℃ 이상에서 멈추어 폐기물 분해 속도와 메탄 생성에 문제 발생
 - 매립지에 급격한 온도 변화가 관측될 경우 온도가 낮아도 추가적인 조사가 필요함
 - 매립가스 포집관 사이 온도와 포집관 내부 온도가 수직, 수평 방향으로 가열구역 결정에 유용하게 사용됨
- 침출수 온도가 38℃ 이상일 경우 매립지 내부 가열 발생 여부 조사 필요
 - 침출수가 뜨겁고 가열이 침출수 포집 시스템 가까이 발생시 침출수 포집 시스템의 안정성 우려됨
 - 침출수 배출 시스템 내에 침출수 온도 모니터링 장치를 설치하여 모니터링 실시
- 폐기물 온도는 매립가스 포집관의 매립가스 온도보다 높음
 - 폐기물 온도 77℃ 이상시 매립지 내부 화재 발생 지표로 볼 수 있음
 - 매립지 폐기물 온도는 샘플링 중 폐기물을 지표로 꺼내 수동 스캐닝 장치로 측정 가능
- 적외선 사진을 촬영하여 매립지 지표 근처 온도 측정
 - 적외선 촬영으로 지표 중 가장 따뜻한 구역을 확인할 수 있고 매립지 내부 가열 조사를 위한 온도, 매립가스 조사 등에 유용한 자료로 활용할 수 있음
 - 매립지 내부 가열로 뜨거운 가스가 구멍이나 작은 통로를 형성하여 2차 가열이 발생될 수 있음
 - 적외선 사진으로 가스 배출 통로를 확인할 수 있음

[침출수 수질 분석]

- 매년 침출수 수질 분석 실시하고 매립지 내부 가열 발생 예측시 침출수 수질 변화 모니터링 및 평가

5

매립지 내부 화재 진압 방법

- 매립지 내부 가열 발생시 가열 확산을 최소화해야 함
 - 가열 발생 원인이나 매립지 구조에 따라 가열 진압에 적합한 방법 선택 필요
- 투수계수가 낮은 토양을 이용한 두꺼운 복토층 설치로 산소 유입 방지
 - 매립지 커버로 합성차수막(FML)을 사용할 수 있으나 높은 온도에 녹을 수 있고 부등침하로 찢어질 수 있음
 - 토양이 적용될 수 없는 수직면에 샷크리트(shotcrete)를 사용할 수 있음
- 냉각제나 가열 억제제 주입
 - 매립지 내부 가열을 촉진하지 않고 억제하는 거품제(foam)를 선택하여 주입
- 매립지 지표에 물을 뿌리거나 매립지 내부 액체를 주입할 수 있음
 - 하지만 침출수 포집 시스템이 잠길수 있고 유출수로 지표수가 오염될 수 있으며 경사면이 붕괴되거나 발열 반응이 촉진될 수 있음
 - 매립지 내부 설비를 보호하기 위해 차가운 액체를 뜨거운 침출수 포집 시스템에 주입할 수 있으나 가열 구역까지 주입이 어려울 수 있음
- 불활성 가스를 주입하거나 매립가스 포집 시스템에 차가운 가스를 주입할 수 있음
 - 반면 불활성 가스 주입은 고가이고 가열 구역까지 분배가 어려움
- 뜨거운 폐기물을 파낼 수 있으나 공기가 주입되어 불꽃이 생성될 수 있음
 - 폐기물을 파내는 동시에 거품, 물 또는 기타 진압제가 필요함
 - 매립지 내부 가열이 매우 깊고, 광범위하며 급속히 확산될 경우 폐기물을 파내는 방법은 바람직하지 않음
- 방화대 : 가열 전선 앞쪽 폐기물을 파냄
- 매립가스 포집 및 제어 시스템 운전을 중지하고 단계별로 운전함
 - 이 경우는 매립가스 포집관에 진공이 잡혀 산소 주입으로 호기성 미생물 활성도가 높아져 가열 발생시 적용할 수 있음
 - 가열 구역 주위 매립가스 포집관 운전을 중지하고 단계별로 사용함
- 매립지 내부 화재를 진압하기 위해 연소되는 폐기물을 파내서 공기와 접하게 되면 불꽃이 발생됨⁵⁾
 - 그럼에도 훈소(smoldering) 폐기물을 파내서 냉각하거나 압축하여 연소를 소멸함
 - 매립지 내부 화재 발생 지점과 정도를 알 수 없어 매립지 내부 화재 진압이 복잡함
- 복토층 배출 구멍을 흙으로 덮어 화재 구역으로 산소 유입을 막아 연소를 진압할 수 있음⁵⁾

- 폐기물이 발열 열분해되면 산소는 없는 상태에서 열분해가 지속됨
- 물을 매립지 지표에 분사하거나 연소 구역을 냉각하기 위해 물을 주입해도 물이 막혀서 연소 구역으로 침투되지 못하면 소용없음⁵⁾
- 또한 매립지 내부 화재 위치를 결정할 수 없고 부적절한 진압으로 화재 피해가 커지고 비용이 높아질 수 있음
- 매립지 내부 발열반응이나 화재 발생시 악취가 일반 매립지 냄새와 다르지 않음
- 악취 발생 원인 : 매립가스 포집 시스템 고장, 불꽃, 임시 복토재 균열 또는 불충분한 토양 커버, 침출수·응축수 누출 등
- 매립지 내부 가열 발생 의심시, 즉각적인 악취관리로 민원 발생 방지
- 매립가스 포집 시스템 모니터링 자주 실시(반응 발생시 월별 측정, 생물학적 반응시 주단위 측정)
- 주민들에게 가이드라인을 제공하기 위해 악취 보고 핫라인 구축
- 매립가스 포집정 폐쇄, 복토재 추가 포설, 공기 샘플 포집 등 실시
- 일일 복토재 및 중간복토재 관리하여 악취 발생 최소화
- 합성재 커버 사용(HDPE는 가스 투과됨)
- 악취 유발 박테리아를 제거하는 유기물이 포함된 기질로 악취 제어층 조성
- 악취 제어를 위한 중간복토재나 바이오필터로 나무조각, 퇴비, 석회 등 사용
- 현장에 악취 제어에 효과적인 화합물 및 분사 시스템을 결정하여 중성 탈취제나 악취 은폐제 사용
- 매립가스 포집 시스템의 적정 운영, 수평 매립가스 포집 시스템 사용
- 얇은 층 매립가스 포집 시스템과 트렌치로 악취 제어
- 악취 가스 발생으로 프로판과 기타 연소가능한 가스를 첨가하여 포집시스템에 가스를 연소함
- 악취 처리 시스템을 과다하게 설치할 필요 없으며 적절한 규모 적용 필요
- 침출수 수질변화로 양질의 침출수를 수질이 나쁜 침출수와 분리하여 처리
- 높은 용존고형물 함량으로 슬러지가 더 많이 발생됨
- 일시적인 FML 캡 사용시 응축수 발생을 고려하여 캡 내부 유출부위 설치
- 응결제로 거품 제어
- 매립지 내부 가열 반응으로 인한 장치 손상
- HDPE 파이프는 175~180°F(79~82°C)에서 휘거나 구부러지고 비틀어지며 250°F(121°C)에서 기능 상실됨
- 산화 유도 시간(산화 방지제 고갈)

I. 매립지 관리 분야

- 경사면 붕괴, 침하, 압력에 의한 분출
- 매립가스 포집 시스템에 침전물에 의한 막힘 발생
- 침출수에 침전물 발생

○ 매립지 내부 가열 반응에 대한 시설 관리

- 화재 근처 설비의 지속적인 온도 모니터링 필요
- 매립가스 포집 시스템 점검, 침출수 포집 시스템 점검, 매립가스 포집 시스템에 청소 지점 설치
- FML 커버 손상, 변형, 표면 온도 관측
- 폐기물이 가열되면 전단응력이 손실되어 폐기물이 천천히 움직이게 되며 수평 이동보다 수직 이동이 쉬움
- 싱크홀, 부분적 침하, 과도한 침하 및 폭락 관측
- 매립지 바닥 라이너 누출 점검을 위해 지하수 모니터링 및 매립가스 이동 관측

○ 매립지 내부 가열 반응이 광범위하고 급속히 확산되는 경우 폐기물을 매립지에서 파내서 처리

- 산소 유입으로 불이 붙을 수 있으므로 거품, 물 및 억제제 주입하여 진압
- 가스 포집 벽을 영향 지역 주위에 설치하여 지하 압력, 열, 가스 영향 저감

○ 공기 투과성이 낮은 토양 복토층이나 FML 커버를 적용하여 산소 주입 차단

- 토양에 적용될 수 없는 수직면에 슛크리트(shotcrete, 혼합재와 포트랜드 시멘트를 섞은 것) 적용

○ 매립지 지표면에 불을 끄거나 매립지에 액체를 주입함

- 화재 유출수로 지표수가 오염될 수 있음
- 매립된 폐기물에 공극 수압이 높아져 경사면 붕괴 발생 가능
- 액체 주입으로 발열 반응이 악화되거나 시작될 수 있음
- 매립지 내부 가열 반응 지점까지 물이 흘러가기 어려울 수 있음

○ 적절한 거품제를 선택하여 화재를 진압할 수 있음

- 매립지 내부 가열반응 지점까지 거품제 유입이 어려울 수 있음

○ 불활성 가스를 주입할 수 있으나 비싸고 화재 지점까지 투과가 어려울 수 있음

- 영향지역 매립가스 포집정을 폐쇄하고 이후 단계별로 사용이 가능하도록 함

○ 매립지 가열반응 지점을 냉각하기 위해 차가운 액체를 주입하거나 불활성 기체를 주입할 수 있음

- 매립지 공극에 사람이나 기기가 빠질수 있으며 화재가스에 노출될 수 있음
 - 2명 이상이 같이 작업해야 하며 문제 지역을 울타리로 분리해야 함
- 환경부, 지자체, 소방서, 병원, 매립지 시설 운영자, 매립가스 플랜트 운영자, 자문위원, 시민이 팀으로 매립지 내부 화재 문제 해결해야 함
 - 분기별 뉴스레터, 웹사이트, 이메일 송부, 파워포인트 발표 및 개방으로 시민의 매립지 운영 참여를 확대하고 매립지 악취와 관련 이슈에 적극적으로 참여하도록 함
- 매립지 내부 화재 대응을 위한 계획 수립
 - 응급상황시 보고를 위한 연락망 구축 및 시민대응 방침 수립
 - 화재진압 외 우선순위를 정하여 대응(경사면 안정도, 악취, 시설 손상, 지속적 운전 등)
 - “매립지 내부 화재 영향지역”의 기준 및 “화재진압 중지 시점”을 정하는 기준 수립
 - 매립지 작업자 및 하도급업체 근로자의 건강과 안전 확보 계획 수립
 - 화재 특성 정기적인 모니터링, 폐기물 반입 특성 모니터링, 경사면, 악취, 매립가스 포집 및 비정상적인 현상의 지속적인 모니터링 실시
 - 응급상황시 대처 방안 수립

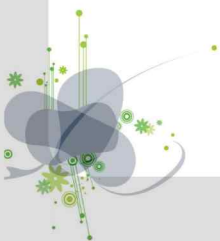
I. 매립지 관리 분야

참고문헌

1. 'Data Evaluation of the Subsurface Smoldering Event at the Bridgeton Landfill', Todd Thalhamer, P.E., Hammer Consulting Service, June 17, 2013
2. '<https://en.wikipedia.org/wiki/Smouldering>
3. 'Evaluation of Possible Impacts of a Potential Subsurface Smoldering Event on the Record of Decision - Selected Record of Operable Unit-1 at the West Lake Landfill', Engineering Management Support, Inc., US EPA Region VII, January 14, 2014
4. 'Subsurface Heating Events at Solid Waste and Construction and Demolition Debris Landfills: Best Management Practices', Ohio EPA Guideline Document #1009, October 14, 2011
5. 'Characterizing spontaneous fires in landfills', SHADI Y. MOQBEL, University of Central Florida, Orlando, Florida(2009)
6. 'Subsurface Heating Events: Best Management Practices', Ohio EPA
7. 'West Lake Landfill', Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/West_Lake_Landfill#cite_note-MDNR14-18
8. 'State regulators demand new measures to contain landfill fire in Bridgeton', Véronique LaCapra, St.Louis Public Radio, August 17, 2015
9. 'Providing a full range of landfill fire control and prevention services world wide', Landfill Fire Control Inc., '<http://www.landfillfire.com/index.html>'

Ⅱ 침출수 처리 분야

1. RO 시설 국내외 사례



세부목차

1. R0 일반 기술	53
2. 국외 R0 침출수 처리 사례	56
3. 국내 R0 침출수 처리 사례	71
4. 국외 R0 폐수 처리 사례	75
5. R0 농축수 매립지 장기간 재순환 지속가능성	80
참고문헌	81

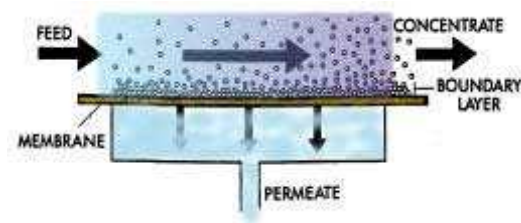
1 RO 일반 기술

- 침출수 처리 선택시 불용성 유기물질, 용존성 유기물질 및 무기물질 제거 성능을 고려해야 함
 - 침출수 처리 기술 중 RO(Reverse Osmosis, 역삼투압) 기술로 용존성 유기물·무기물 제거율이 높아 법적 농도 제한 규정을 연속적으로 준수가능함
- MF(Microfiltration, 0.025~20 μm), UF(Ultrafiltration, 0.01~0.001 μm), NF(Nanofiltration, 0.005~0.001 μm), RO(0.001~0.0001 μm) 멤브레인이 침출수 처리에 사용됨
 - MF는 침출수의 콜로이드와 부유물질 제거에 효과적인 기술로 UF, NF, RO 처리의 전처리 공정으로 사용되고 단독으로 사용될 수 없음
- UF는 입자, 고분자 제거에 효과적(유기물의 50% 제거가 가능)이나 오염물을 완전히 제거할 수 없어 RO 전처리 공정으로 사용됨
 - 최근 UF 공정은 침출수 생물학적 후처리(활성슬러지-UF-화학적산화, 활성슬러지-UF-RO)에 적용하기도 함
 - NF 기술로 유기오염물, 무기오염물 및 세균 오염물을 제거(COD 60~70%, 암모니아 50% 제거)할 수 있으나 침출수 NF 처리로 용존 유기물, 무기물, 콜로이드, 부유물질로 인해 멤브레인에 부착물이 형성됨
- RO는 침출수 처리에 효율적인 방법으로 성능이 입증되었으며 RO 처리로 COD 98% 이상, 중금속 99% 이상 제거 가능함¹⁾
 - RO 멤브레인에 부착물 형성으로 전처리나 멤브레인 화학적 세척이 필요함
- RO 기술은 멤브레인에 고압력을 가해 용매는 통과시키고 용질은 남겨 처리하는 분리공정으로 공정수 및 저분자 물질 용액에서 오염물질을 제거하는데 적용됨²⁾
 - RO 멤브레인으로 이온, 유기화합물, 3.10 μm 미만 콜로이드를 분리하여 RO 투과수의 용존고형물 농도는 낮음
 - 보통 RO 주입량의 75~80%를 처리수로 회수하여 지표수로 방출할 수 있고 RO 농축수는 매립지에 재순환하거나 증발 및 건조로 처리할 수 있음

1. 'Landfill Leachate Purification through Reverse Osmosis at Ihlenberg Landfill in Germany', Pall Corporation

2. 'Reducing Environmental Risk of Landfills: Leachate Treatment by Reverse Osmosis', Gheorghe Asachi, Technical University of Iasi, Romania, Environmental Engineering and Management Journal, Vol.11, No.12, December 2012

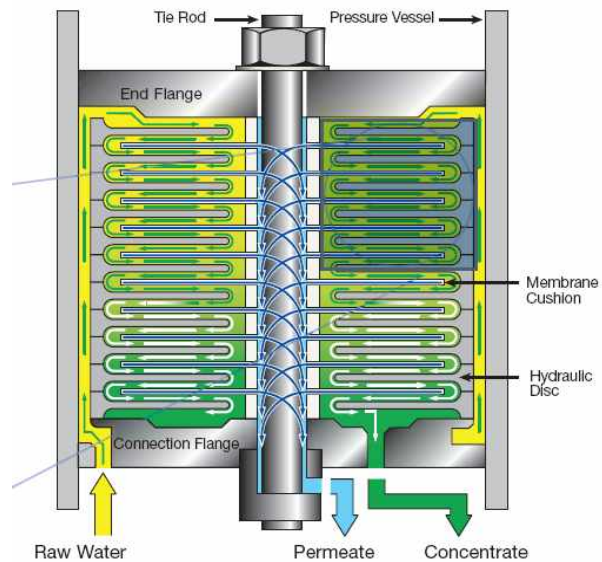
II 침출수 처리 분야



RO 여과 흐름도⁵⁾



DT RO 모듈¹⁾

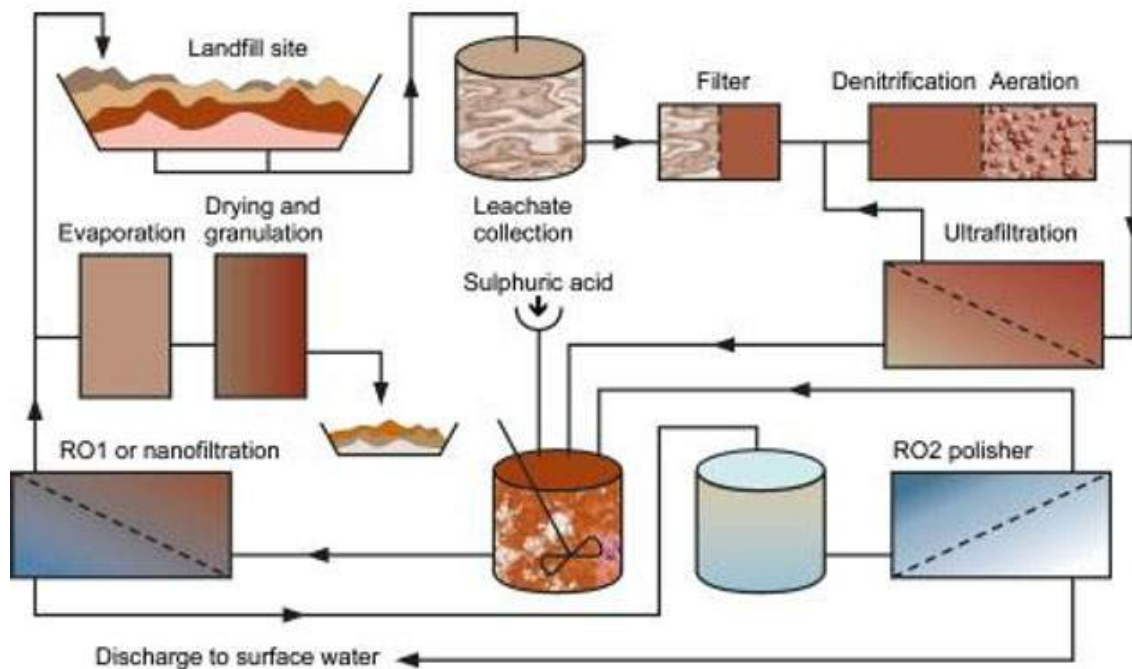


DT RO 모듈 구성도³⁾

- RO 멤브레인으로 관(tubular) 형태가 주로 사용되었으나 투과수 회수율이 낮고 멤브레인 설치 밀도가 낮아 관(tube) 소요 수가 많아 많은 공간을 차지하는 단점이 있음
 - 디스크 튜브(disc tube, DT) 형태 RO 멤브레인은 더 효율적이고 유지관리가 용이하고 사용 신뢰도가 높음²⁾
 - DT 모듈은 개방형 채널 구성, 주입수의 높은 난류 흐름, 막힘 및 결정화 위험 저감, 균등 분배, 셀프 세척, 물순환, 효율적인 세척 및 유량 최소화 등의 장점 있음³⁾
- 침출수 RO 시설 적용도는 침출수 처리 비용 제어 및 멤브레인 파울링(fouling) 예방을 위한 전처리 공정 선택에 따라 달라짐
 - RO 처리로 생성된 농축액은 소각처리하거나 플라이 애쉬나 슬러지 형태로 고형화하여 매립할 수 있음
 - 이외 RO 농축수를 매립지에 재주입하여 처리할 수 있음
- 멤브레인 파울링을 방지하기 위해 침출수를 전처리하거나 멤브레인 표면을 주기적으로 세척해야 함
 - 일부 연구결과에 의하면 RO 전처리로 생물학적 처리는 비효율적이고 석회 침전으로 부식산(humic acid), 풀브산(fulvic acid)의 유기물을 침전하여 제거하는 방식이 효율적인 방안으로 제시되고 있음⁴⁾

3. 'Disc Tube™ Module System Filtration Solutions for Landfill Leachate', Pall Corporation

4. 'RO & UF Membranes: Market Opportunities in Landfill Leachate?', Philippe Moulin, Laboratory of Mechanics and Acoustics at Aix Marseille Université, Waterworld



멤브레인 침출수 처리 흐름도⁵⁾

< 멤브레인 침출수 처리공정 농도 변화⁵⁾ >

	Raw Leachate	Pretreated Leachate	Permeate RO	Permeate RO2
COD (mg/l)	5000	1250	125	15
TKN (mg/l)	2000	100	10	2
AOX (mg/l)	4000	2500	250	25
NO-N (mg/l)	-	<400	50	5

○ 침출수 처리 기준 및 구성에 따라 RO 공정을 1~3 정화 단계로 구성하여 방류수 기준을 준수할 수 있음

- 멤브레인 시스템을 사용한 전형적인 침출수 처리 시스템은 생물학적 전처리, UF 전처리, 황산 주입, RO 1단계 처리, RO 2단계 처리, RO 농축수 재순환의 공정이 사용되고 있음⁵⁾

2 국외 RO 침출수 처리 사례

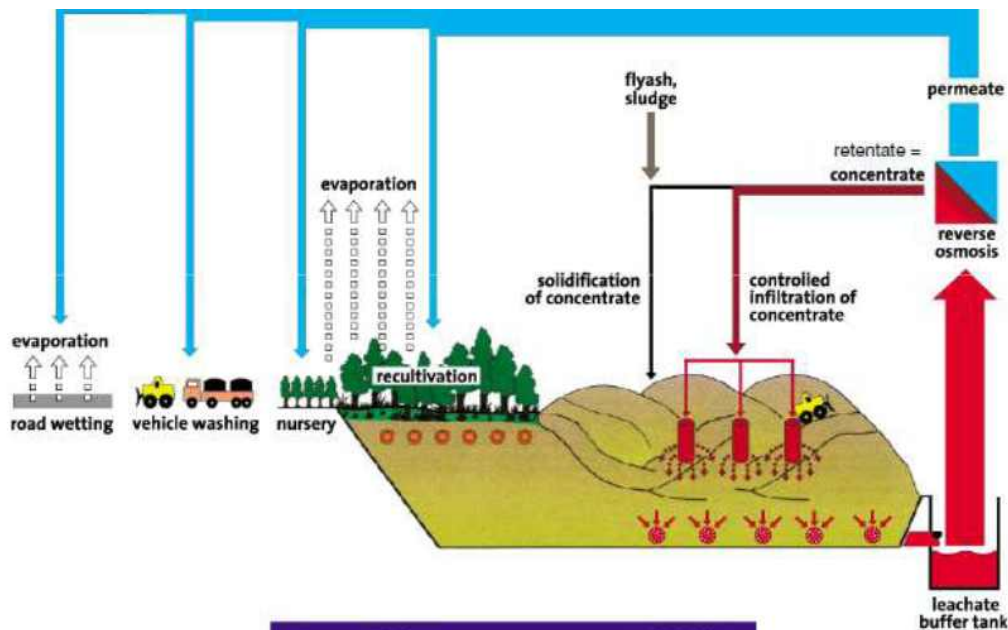
2-1. 미국 RO 침출수 처리 사례^{6,7)}

- 뉴욕 Seneca Meadows 매립지 크기는 1.092 km²로 연간 2,200~2,400 만톤이 매립되고 매년 0.040~0.101 km² 크기의 매립지 라이너(liner)가 설치되고 있음
 - 연간 침출수 발생량은 158,978 m³(2012년 기준)이고 기존 침출수는 공공처리장(하수처리장 등)으로 이송(트럭)하여 처리하거나 매립장에 재순환하여 처리함
- 뉴욕 Seneca Meadows 매립지에서는 RO 시스템으로 침출수 처리하여 RO 농축액은 매립지에 재순환하고 일부는 플라이 애쉬나 슬러지로 고형화하여 매립함
 - RO 처리수는 도로 청소, 차량 세차, 조경 용수로 사용하는 공정을 개발함
- 침출수 하수공공처리 시설로 이송가능량(454 m³/일)을 증가시키기 위해 BOD, TDS, NH₃ 부하량을 낮추는 침출수 전처리시설 도입이 필요함
 - 2009~2011년 침출수 전처리 기술로 물리적·화학적 처리(회분식 용량 테스트), 생물학적 처리(회분식 용량 테스트), 증발, 화학적 산화(특성 인자 중심) 기술을 평가함
 - 2011년부터 RO 회분식·파일럿 규모 성능 평가(2단 공정, 1개월)가 진행됨
- RO 3단계로 설치되어 RO1에서 침출수 1단계 여과 후 농축액은 RO2에서 2단계 여과하고 RO1·RO2 투과수는 RO3에서 다시 여과함
 - RO3 여과후 농축액은 RO1으로 반송하고 처리수는 방류 및 조경용수로 재활용됨
 - RO2 농축액은 최종 농축액으로 매립되거나 고형화 처리됨
- RO 시설은 ① 침출수 원액 pH 조정조, ② 카트리지·모래 필터, ③ 침출수 RO 처리시설, ④ 농축수 RO 처리시설, ⑤ 투과수 RO 처리시설, ⑥ 최종 pH 조정, ⑦ 공정 용기, ⑧ PLC, ⑨ 농축액 저장 탱크(378.5 m³)로 구성됨
 - 침출수 pH 조정을 위한 황산 탱크는 7.6~18.9 m³ 용량의 이중층으로 구성됨
 - RO1 침출수 단계는 직렬식 3개 펌프, 72개 모듈, 1088 psi 압력으로 구성됨
 - RO1 시스템에 529.9 m³/일 유량이 주입되어 454.3 m³/일은 투과되고 75.7 m³/일은 반송됨

6. 'Reverse Osmosis-Based Leachate Treatment System at a New York Landfill', Patrick Stanford(Rochem), Peter Baker(Seneca Meadows Landfill), May 23 2012

7. 'Reverse Osmosis - Based Leachate Treatment System at Seneca Meadows Landfill - Highlights from Start-up and Operation', Peter Baker(Seneca Meadows. Inc.), Patrick Standford(Rochem), Rochem

- RO2 농축수 처리 단계는 3개의 고압력 펌프, 24개 Rochem HP ST 모듈, 1740 psi 압력, 189.3 m³/일 유량으로 운전됨
- RO3 투과수 처리 단계는 3개의 압력 펌프, 25개 Rochem ST 모듈, 1088 psi 압력, 367.15 m³/일 유량으로 운전됨
- RO 처리 후 pH 조절을 위해 CO₂ 제거 장치(degasifier) 처리 및 부식제(caustic) 주입으로 유출수 pH가 6.5~7로 조정됨
- 3단계 RO 처리로 암모니아, BOD, 총인, 총부유고형물, 총용존고형물 제거율은 97% 이상임
- 2013년 1월 기준 평균 289.55 m³/일 처리수가 공공처리시설로 배출되고 있음
- 2단계 RO 운전시 침출수 오염물질의 95% 이상 제거되고, 3단계 RO 운전시 오염물질의 99% 이상 제거됨



source: DPC/AMASA

landfill as source of life

뉴욕 Seneca Meadows 매립지 침출수 처리 및 순환도⁶⁾

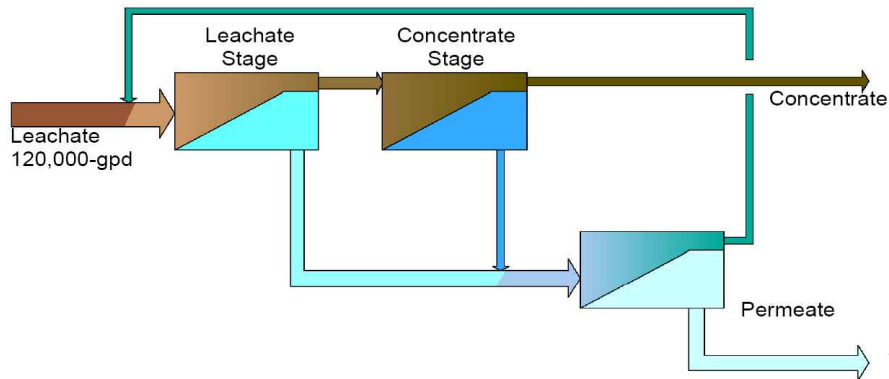


배치 테스트 현장⁶⁾



파일럿 테스트 현장(실증 시스템)⁶⁾

II 침출수 처리 분야



3단 RO 공정⁷⁾



전처리 필터⁷⁾



RO 전체 처리 시설⁷⁾

- TDS(총용존고형물) 배출 한계값이 강화될 예정으로 TDS 농도를 낮추기 위해 증류, 이온교환, 역삼투압 방법이 사용되고 있음
- 공공하수처리장과 하수슬러지 처리장에서 UV 살균 기술을 적용하고 있으나 침출수 UV 기술적용이 제한되고 있음
- SBR(sequential batch reactor), 활성탄 및 산화 처리는 비효율적인 기술로 RO (역삼투압) 기술로 UV 처리 기술을 대체할 수 있음

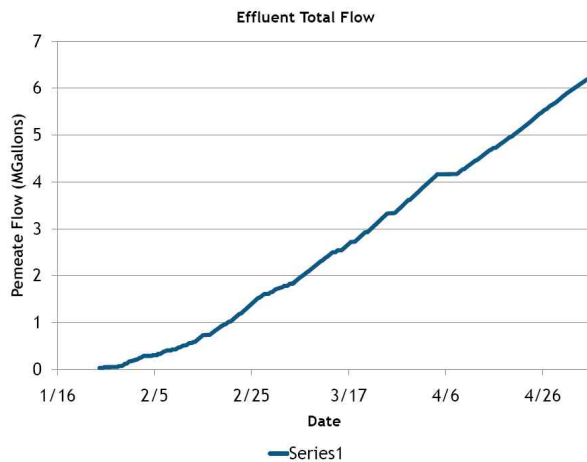
< RO 3단계 처리 회수율 및 투과수 수질⁶⁾ >

성분	단위	유입수	투과수	제거효율	POTW 기준	예상 SPDES 기준
암모니아	mg/L	2,480	29	98.88	188.9	1.5
BOD	mg/L	3,230	42	98.83	675.3	10
총 수은	μg/L	ND	ND			50 ppt
pH	pH 단위	7.84	5.24	-	5.0~9.0	6.5~8.5
총인	mg/L	4	<0.05	>98.71		1
총부유고형물	mg/L	53	<1	>97.84		10
총용존고형물	mg/L	16,900	21	99.91		

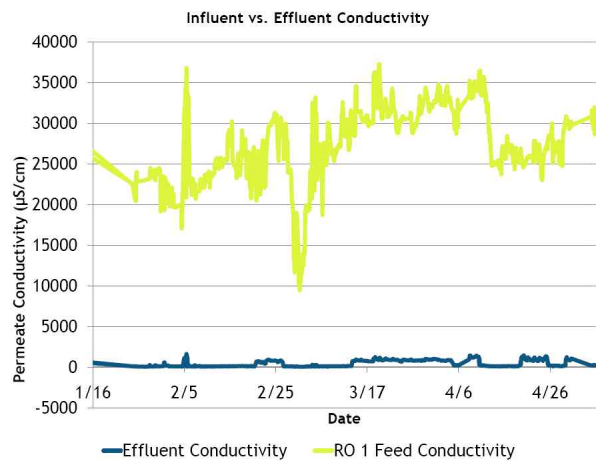
ND : Not Detected at 200 μg/L,

POTW : publicly owned treatment work, SPDES : State Pollutant Discharge Elimination System

1. RO 시설 국내의 사례



유출수 총 유량⁷⁾

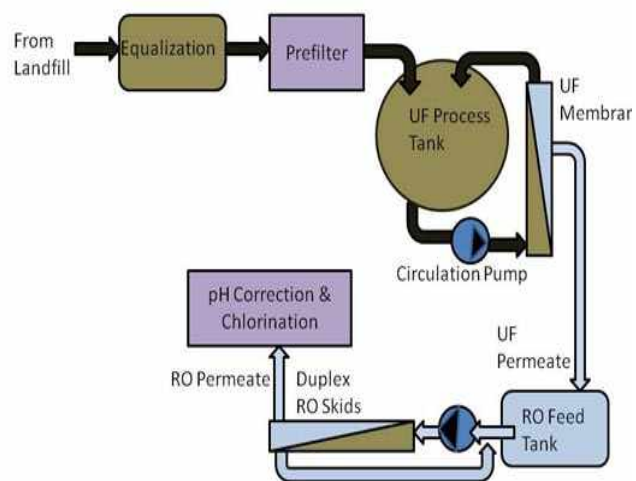


RO 처리 시설 유입수 및 처리수 전도도⁷⁾

- 펜실베이니아 Lanchester 매립지(생활폐기물, 건설폐기물)에서 일 37.85 m³ 침출수가 생성됨⁸⁾
 - 침출수 처리 위해 SBR와 탈수를 위한 필터 압축기를 수년간 사용하고 있었으나 적정 바이오매스 유지가 어렵고 겨울철 암모니아 질소 처리가 되지 않음
 - 매월 배출수의 수질이 방류 기준(BOD 85 mg/L, 암모니아 17 mg/L, TSS 100 mg/L, 인 4.4 mg/L, 철 8.7 mg/L, pH 6~9)을 준수하지 못함
- 방류수 수질 기준을 준수하기 위해 경제적이면서 성능이 우수한 UF, RO 기술을 적용함⁸⁾
 - 기존 SBR 유역(basin)을 균등화조, 고체 제거 예비 필터(Dynatec prefilter), 콜로이드 고체 및 오일 제거 UF 시스템, TDS·암모니아·용존오염물 제거 RO 시스템으로 전환함



UF·RO 시설⁸⁾



UF·RO 침출수 처리 흐름도⁸⁾

< UF·RO 처리 유입수질 및 유출수질⁸⁾ >

8. 'Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Landfill Leachate Treatment', Dynatec Systems Inc.

II 침출수 처리 분야

Parameter	유입수질 (mg/L)	유출수질 (mg/L)	Parameter	유입수질 (mg/L)	유출수질 (mg/L)
BOD	85	<2	Sulfate	200	N/A
Ammonia	17	<3	Total Alkalinity	1,600	N/A
TSS	100	ND	COD	6,000	N/A
Phosphorus	4.4	<0.2	TDS	2,500	N/A
Iron	8.7	<0.009	Chloride	500	N/A

- 매립지 침출수를 균등화조에서 균등화 후 UF 공정 처리 전 예비 필터로 큰 고형물을 제거함
- UF 공정으로 침출수 입자 및 오일을 제거하고 UF 투과수를 RO 시스템으로 처리하여 용존물을 제거함
- 최종 pH 조절 및 염소화 처리 후 방류하며 이 시스템은 5년 이상 성공적으로 가동되어 방류수 수질 기준을 충족하고 있음

2-2. 독일 RO 침출수 처리 사례^{6,7)}

- 독일 Ihlenberg 매립지는 1993년 12월 17일 운전을 시작하여 고압력의 RO(832.7 L/분, 처리용량) 시설이 운영됨¹⁾
 - DT 모듈의 기본 개념이 보완되어 주입압력이 첫 단계에서 약 975 psi에서 마지막 단계에서 1,800 psi로 높아짐
 - 최종 침출수 농도가 2배로 높아져 농축이 5배에서 10배 정도로 높아짐
 - 이로써 RO 농축수의 전기전도도가 50,000~60,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 100,000~120,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 높아지고 농축수 부피는 감소됨
- RO 처리에 의한 염 제거율은 유입된 침출수와 처리된 투과수의 전기전도도 변화로 알 수 있음¹⁾
 - 전기전도도가 925 psi 압력에서 24,135 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 221 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 99.08% 제거됨
 - 1,800 psi 압력에서는 103,187 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 1,028 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 처리되어 99.00% 제거됨
- 멤브레인 공정 기술에 기계적 처리 및 침전 공정을 전처리로 추가하여 침출수 처리 후 투과수 생성량을 높임
 - RO 농축수는 증발공정으로 유입되어 잔류물이 제거되어 건조 및 고형화 공정에서 처리됨
 - 잔류물 결합공정으로 축적된 농축수에 결합제를 추가하여 취급하기 용이한 고형물이 생성됨

- 에너지 소비량은 투과수 단계에서 419 kWh/L이고 농축수 단계에서 평균 977 kWh/L 정도임¹⁾
 - 운전 압력 범위 60 bar의 94.2%까지 운전 가능함
- RO 1단계 투과수에서 Zn, Cu 제외한 중금속 농도 기준이 준수되었고 2단계 RO 투과수에서 Cu 제외한 중금속 농도 기준이 준수됨¹⁾
 - 무기물 농도는 대부분 배출기준을 준수하나 일부 무기물(NH_4^+)은 기준이 초과됨
 - 멤브레인에 의한 무기오염물 제거 효율은 98% 이상이고 BOD, COD, SO_4 는 99% 이상 제거됨

< Ihlenberg 매립지 침출수 중금속 및 무기오염물 제거 효율¹⁾ >

	중금속(mg/L)		오염물(mg/L)				
	Zn	Cu	BOD	COD	SO_4	NH_4^+	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
유입농도	131	276	122	4,124	3,345	577	4,124
92년10월	<10	50	<1	<15	8	5.2	<15
93년10월	20	6	<1	<15	20	23.5	<15
기준	10	10	10	25	150	2	25

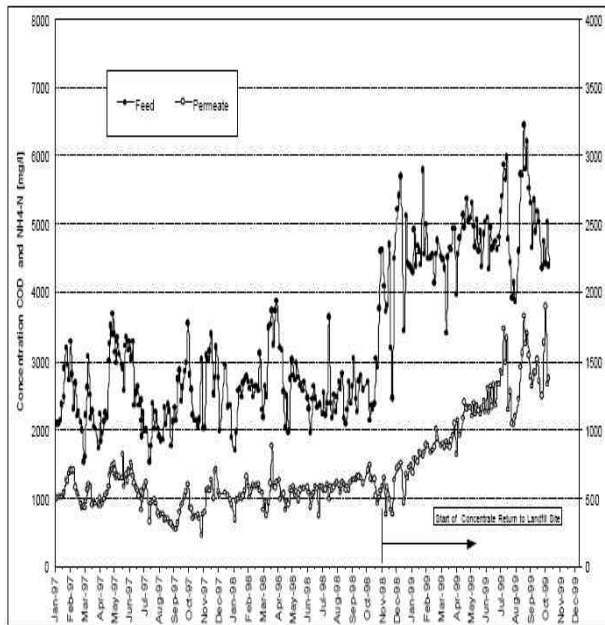
- 독일 Wischhafen 매립지에서 MBR(멤브레인 바이오리액터) 공정을 운전비용이 저렴한 RO 시스템으로 교체함⁹⁾
 - RO 시스템은 1998년 11월 운전이 시작되어 1년간 운전되고 현장에서 제거됨
 - RO 플랜트 침출수 처리로 비용 절감이 가능하지만 RO 농축수를 매립지로 재순환하여 침출수 COD, 암모니아 농도, 전도도가 높아지기 시작함
- RO 플랜트는 높은 압력으로 운전되어 농축된 액체의 삼투압을 극복할 수 있음⁹⁾
 - 처리수의 삼투압이 18 bar이고 시스템 압력이 30 bar일 경우 순수 여과압력은 12 bar가 됨
 - 처리수의 염도에 비례하여 삼투압이 높아지므로 RO 농축수를 매립지에 재순환시 침출수 삼투압이 높아짐
 - RO 공정 조건은 일정하여 순 여과 압력이 낮아져 투과수 유량이 낮아지게 됨
 - 적정 처리 유량을 유지하기 위해 RO 압력이 높아지고 큰 펌프와 추가적인 멤브레인 설치가 필요하게 됨

9. 'Landfill Leachate Treatment', Robinson AH, Wehrle Environmental, "The 5th International Conference on Membrane Bioreactors", Cranfield University, 2005

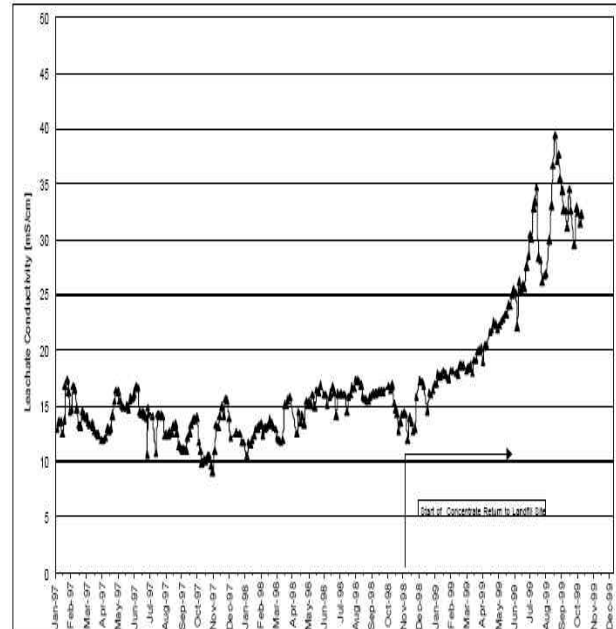
II 침출수 처리 분야

○ 이로 인해 RO 시설 운전 1년 후(1999년) 사용이 중단됨⁹⁾

- RO 시설을 대체하여 생물학적 산화 공정을 재설치하여 침출수 COD 및 암모니아를 처리함
- 1998년 11월까지 기존 생물학적 공정 운영비보다 RO 플랜트 투자비 및 운영비가 더 높음



RO 농축수 재순환 후 침출수 COD, NH_4^+ 농도 변화⁹⁾



RO 농축수 재순환 후 침출수 전도도 변화⁹⁾

○ 독일 구동독 포켓친(Vorketzin) 지역 매립지에서 연 120만톤 쓰레기 처리하고 있으며 2004년부터 RO 시스템을 도입하여 침출수 처리 후 계속적인 시설 증설로 일 430톤 용량 운전(회수율 94%) 중임¹⁰⁾

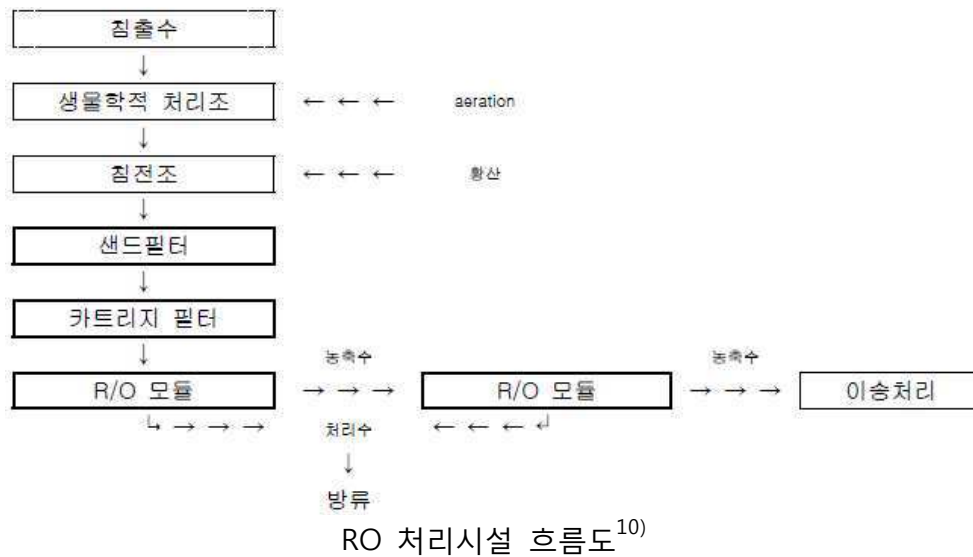
- 운반 및 현장 적용성을 감안하여 컨테이너식으로 설치하여 운전 중이며 처리설비는 생물학적 처리 후 침전조를 거쳐 RO 시설로 처리됨

○ 침출수를 생물학적 처리조에서 폭기로 처리 후 침전조에서 침전 후 상등수 pH를 낮추기 위해 황산을 투입하여 RO 멤브레인 손상요인을 제거함

- 이후 모래필터, 카트리지 필터에서 전처리 후 3단계 RO 처리됨
- RO 공정은 1단계 침출수 처리, 2단계 투과수 2차 처리, 3단계 농축수 처리로 구성됨
- 약 6%의 농축수(약 20 m³/일)는 인근 지역 3개 하수처리장으로 분산 이송 처리하고 RO 처리수는 인근 호수로 방류함

10. '독일 Brandenburg(Berlin) Vorketzin 매립장 침출수처리시설', 해외 선진시설 견학(출장) 보고서(2012.4, 수도권매립지관리공사)

1. RO 시설 국내의 사례



RO 시스템 컨테이너¹⁰⁾



RO 모듈¹⁰⁾

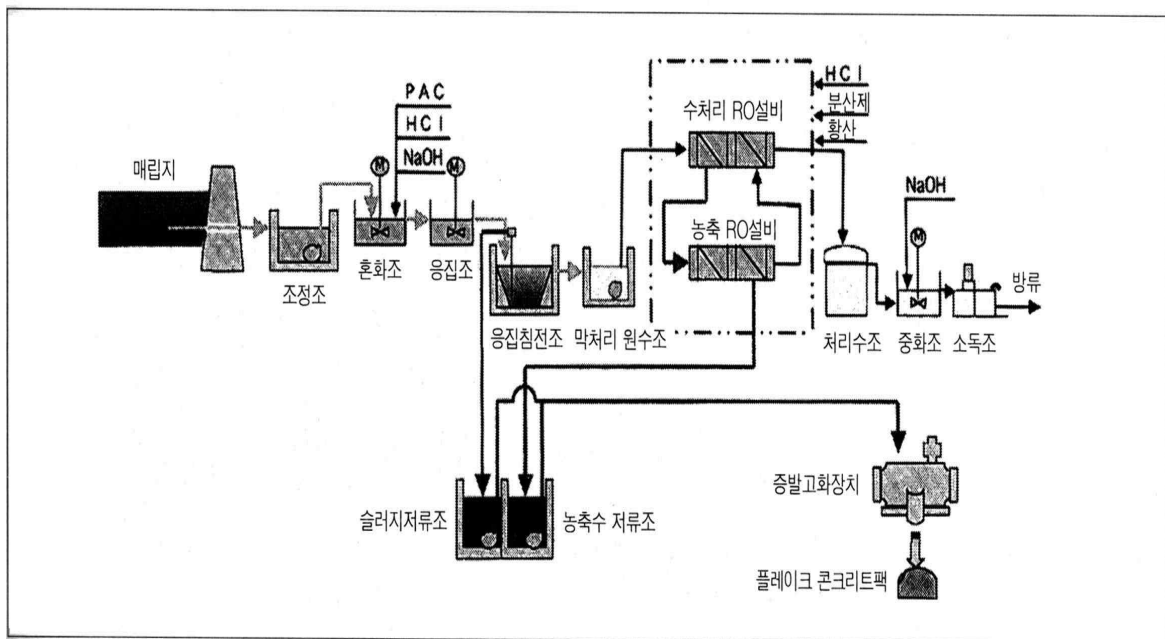
2-3. 일본 RO 침출수 처리 사례¹¹⁾

- 소각잔사 매립 비율이 크게 증가되는 일본 매립지에 침출수 고농도 무기염류 제거가 큰 과제임
 - DT-RO 모듈 시스템은 간단한 프로세스로 침출수 중 BOD, COD, 질소, 염류, 다이옥신류, 환경호르몬 등 미량유해물질 처리에 적용되고 있음
 - DT-RO 모듈은 유로가 넓은 구조로 막이 막히거나 생물의 부착물 현상이 잘 발생하지 않고 막모듈의 분해 및 교환이 용이하고 고압 타입의 막모듈을 조합하여 95% 이상 높은 회수율 확보 가능함
- DT 모듈 시스템의 침출수 전처리 공정은 조정조, 혼화조, 응집조, 응집침전조, 막처리 원수조로 구성됨
 - 수처리 RO 설비에서 처리 후 농축수는 농축 RO 설비에서 처리하여 농축함
 - 처리수는 중화 및 소독 후 방류하고 농축수는 농축 저류조에 보관 후 증발고화장치에서 고화하여 플레이크 콘크리트 팩이 생성됨

11. '역삼투압에 의한 침출수 중 염류 제거기술', Toji Akihiro, 가미오카팬텍(주) 환경장치사업부 환경본부 기술부

II 침출수 처리 분야

- DT 모듈 시스템 처리로 분자단계의 분리가 가능하여 처리수는 천연수 정도의 정화가 가능함
- DT 모듈은 간단한 시스템으로 눈막힘 및 스케일링이 잘 발생되지 않아 간단한 전처리만으로 침출수 직접처리가 가능함
- 또한 고압운전이 가능한 막모듈로 높은 회수율이 가능함
- 시스템이 컴퓨터에 의해 자동 제어되며 처리수의 전기전도율이 지속적으로 모니터링되어 처리 이상을 즉시 감지할 수 있어 미처리된 원수가 방류되지 않음



DT 모듈 시스템의 처리 흐름도¹¹⁾

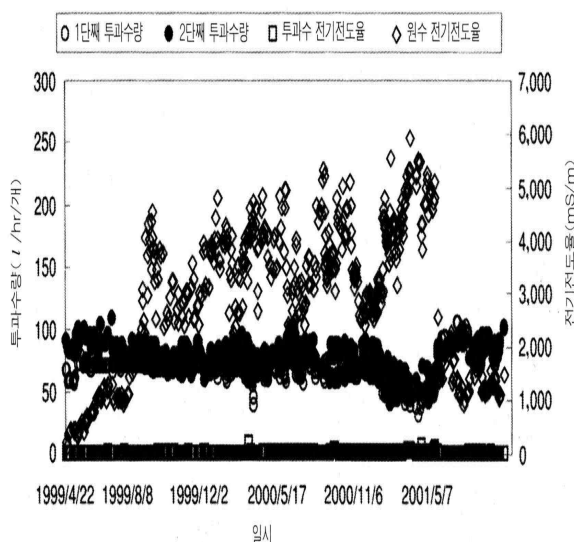
- 1999년부터 매립 시작된 이바라키현 '클린파크 비단' 매립지와 2000년부터 운영되기 시작한 아오가키현의 '9개의 마지막 정원' 매립지에 DT-RO 모듈 시스템이 가동중임
- 두 시설은 소각 잔사를 주로 매립처리하며 침출수의 부유물질을 제거하기 위한 응집처리만 전처리로 실시하고 RO로 직접 처리함
- '클린파크 비단' 매립지 RO 처리로 기준치 이하까지 처리하기 위해 수처리 RO 장치에서 2단계로 처리하고 농축수는 고압형 RO 장치에서 고농도(염류농도 20% 정도)로 농축함
- 최종 농축수는 증발고화장치에서 처리하여 고화물로 반출됨
- '9개의 마지막 정원' 매립지에서는 처리수량이 10 m³/일로 적고 농축수량도 약 1.5 m³/일로 적어 수처리 RO 장치에서 배출되는 농축수를 직접 증발고화처리함
- 실제로는 2000년 운전부터 농축수를 매립지로 반송하고 있으나 침출수 원수에 큰 영향 없음
- RO 장치는 순환조가 2개 조로 설치되어 있어 연속적으로 처리됨

1. RO 시설 국내의 사례

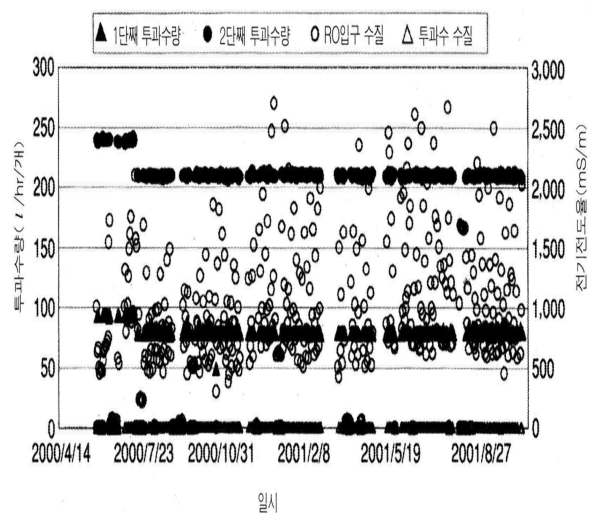
- ‘클린파크 비단’ 매립지에서 침출수 원수 전기전도율은 2,000~5,000 mS/m에서 처리수 10 mS/m로 낮아져 원수 수질 변동에도 안정된 처리수질이 확보됨
 - 막모듈 투과수량은 1단계 RO 장치, 2단계 RO 장치 모두 설정된 수량으로 안정적으로 운전되고 있으며 수질변화에 의한 투과수량 저하는 관찰되지 않음
- ‘9개의 마지막 정원’ 매립지에 침출수 원수 전기전도율 500~2,500 mS/m에서 처리수 10 mS/m 이하로 처리되어 원수 수질 변동에도 안정된 처리수질 확보됨
 - 투과수량은 1단계 RO 장치, 2단계 RO 장치 모두 설정 수량에서 안정된 결과를 나타내고 있음

구분	이바라기縣「클린파크 비단」	아오가키町「9개의 마지막 정원」
처분장 형식	관리형 처분장	관리형 처분장
매립면적	28,600m ²	3,400m ²
매립용량	113,000m ³	20,500m ³
매립공법	샌드위치 셀공법	샌드위치 셀공법
매립개시	1999년 4월	2000년 4월
매립물	소각잔사 불연파쇄쓰레기	소각잔사 유리도기 등 불연쓰레기
침출수량	70m ³ /일	10m ³ /일
조정조 용량	1,430m ³	600m ³
처리방식		
수처리	응집침전처리 + RO처리	응집침전처리 + RO처리
농축수	RO막 농축처리 + 증발고화처리	증발고화처리

일본 2개 매립지 RO 처리시설 개요¹¹⁾



‘클린파크 비단’ 운전데이터¹¹⁾



‘9개의 마지막정원’ 운전데이터¹¹⁾

II 침출수 처리 분야

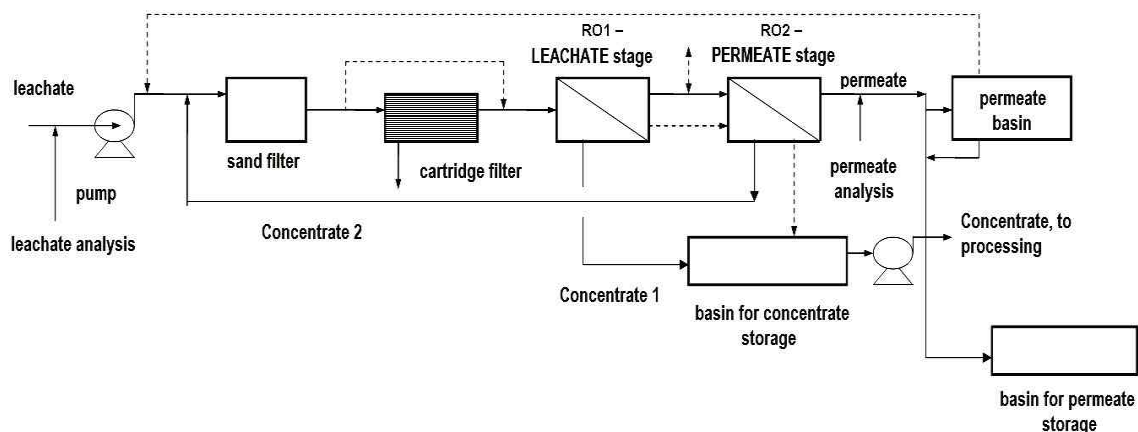
- ‘클린파크 비단’ 매립지 원수·처리수 분석 결과 전기전도율은 4,540 mS/m에서 15.0 mS/m로 99.7% 제거율을 나타냈고 Cl은 26,300 mg/L에서 50.8 mg/L로 99.8% 제거율을 보여 염류 제거율이 99% 이상으로 높음
- COD, BOD, T-N도 원수 226 mg/L, 176 mg/L, 103 mg/L에서 처리수 < 1.0 mg/L, < 2.0 mg/L, 1 mg/L로 처리되어 99% 이상 높은 제거됨
- 질소도 1 mg/L 정도로 처리되었고 DNXs도 원수 2.35 pg-TEQ/L에서 처리수 0.0028 pg-TEQ/L로 99.9% 이상 처리됨
- ‘9개의 마지막 정원’ 침출수 전기전도율은 원수 338 mS/m에서 처리수 15.0 mS/m로 처리되어 95.6% 제거율 보이고 Cl은 원수 754 mg/L에서 처리수 12.3 mg/L로 98.4% 제거됨
- COD, BOD, T-N은 원수 25.5 mg/L, < 2.0 mg/L, 12.1 mg/L에서 처리수 < 1.0 mg/L, < 2.0 mg/L, 1.0 mg/L로 측정 하한치 이하로 처리됨
- 처리수 DXNs은 0.00034 pg-TEQ/l로 환경기준 1.0 pg-TEQ/l 미만으로 처리됨
- 침출수에 막 스케일링의 원인이 되는 황산 이온이 564 mg/L로 높아(전체 염류 농도 2,570 mg/L) 스파이럴 RO 막 경우 황산칼슘 스케일 생성으로 단기간 막 교환이 필요하나 본 시설에서는 안정적으로 운전되고 있음
- 이로써 DT RO 모듈 시스템의 침출수 탈염처리 및 천연수 수준 처리가 가능함을 알 수 있음
- 농축수는 건조고화 후 건조고화염을 정제처리하여 동결방지제와 공업염으로 재이용할 수 있음을 확인하였으나 실제로 사용되고 있지는 않음(추후 재이용 검증 필요)

분석항목(단위)	이바라기縣 「클린파크 비단」			이오가키町 「9개의 마지막 정원」		
	원 수	처리수	제거율(%)	원 수	처리수	제거율(%)
탁도 (도)	97.5	<0.1	>99.9	4.0	<0.1	>97.5
색도 (도)	80	<1	>98.8	24	<2	>91.7
pH (-)	7.3	5.8	-	7.8	-	-
전기전도율 (mS/m)	4,540	15.0	99.7	338	15.0	95.6
M알칼리도 (mg/l as CaCO ₃)	205	5.6	97.3	80.8	0.0	-
P알칼리도 (mg/l as CaCO ₃)	0.0	0.0	-	0.0	0.0	-
총경도 (mg/l as CaCO ₃)	17,900	5.2	99.9	1,250	<2.0	>99.8
Ca경도 (mg/l as CaCO ₃)	17,800	5.2	99.9	1,200	<2.0	>99.8
Mg경도 (mg/l as CaCO ₃)	86.7	<0.50	>99.5	50.6	<2.0	>96.0
COD _{Mn} (mg/l)	226	<1.0	>99.6	25.5	<1.0	>96.1
유리탄산 (mg/l)	20.5	18.5	9.8	2.4	0.0	-
Cl (mg/l)	26,300	50.8	99.8	754	12.3	98.4
SO ₄ (mg/l)	241	0.11	99.9	564	<0.10	>99.9
PO ₄ (mg/l)	<50.0	<0.10	-	<5.00	<0.10	-
SiO ₂ (mg/l)	7.60	<0.040	>99.5	4.48	<0.040	>99.1
Mn (mg/l)	4.28	<0.01	>99.8	0.01	<0.01	-
Fe (mg/l)	2.73	0.02	99.3	0.11	0.02	81.8
Ba (mg/l)	7.05	<0.01	>99.9	0.05	<0.01	>80.0
Sr (mg/l)	29.6	0.01	99.9	1.23	<0.01	>99.2
Na (mg/l)	5,590	9.24	99.8	331	0.61	99.8
K (mg/l)	5,280	26.3	99.5	40.0	0.29	99.3
TS (mg/l)	42,200	84	99.8	2,570	17	99.3
BOD ₅ (mg/l)	176	<2.0	>98.9	<2.0	<2.0	-
T-N (mg/l)	103	1.0	99.0	12.1	<1.0	>91.7
B (mg/l)	1.43	0.13	90.9	0.19	<0.10	>47.4
Al (mg/l)	2.31	0.09	96.1	0.74	0.07	90.5
SS (mg/l)	114	-	-	3	<1	>66.7
다이옥신류 (pg-TEQ/l)	2.35	0.0028	99.9	-	0.00034	-

RO 처리 수질¹¹⁾

2-4. 루마니아 RO 침출수 처리 사례¹²⁾

- 루마니아 이아시(Iasi) 도시 위생매립장(Tutora)에 DT-RO 멤브레인 모듈을 설치하여 침출수 제거 성능분석을 실시함
 - 독일 Geesthacht 지역 West German Research Center에서 제작되고 ROCHEM사에 의해 개선된 플레이트 필터 사용하여 분리 효율 및 투과수 유량을 평가함
 - DT-RO 시스템은 침출수 처리단계, 투과수 처리단계의 2단계로 구성됨
 - 침출수 단계의 투과수는 고도처리 단계로 이송되고 농축액은 침출수 유입구로 재순환됨
 - 각 RO 모듈은 210개 디스크와 209개 멤브레인으로 구성됨
- 침출수를 균등화조에 펌프로 이송하여 부유물질을 침전 처리하고 침출수 처리 전 pH를 6.5로 조정하여 경수 이온에 의한 침전을 방지함
 - 이후 침출수를 모래 필터로 이송하여 50 μm 이상 입자 제거하고 여과된 침출수는 카트리지 필터로 보내 10 μm 이상 입자를 제거함
- 전처리 후 침출수를 RO 1단계(압력 10~60 bar)로 보내 무기염, 암모니아 염, 유기화합물을 제거하여 액체의 전기전도도를 낮춤
 - 1단계 RO 투과수(P1)는 자연 방류 요건을 충족하기 위해 추가 처리가 필요하여 RO 2단계로 보냄
 - RO 1단계 처리 후 농축액은 포집탱크로 보낸 후 매립지에 재순환함
 - RO 2단계 투과수(P2)는 임시저장탱크로 보낸 후 방류 조건을 맞추기 위해 pH(33% NaOH 용액)를 조정하여 방류함
 - RO 2단계 농축액(C2)은 RO 1단계 전 시스템으로 재순환됨



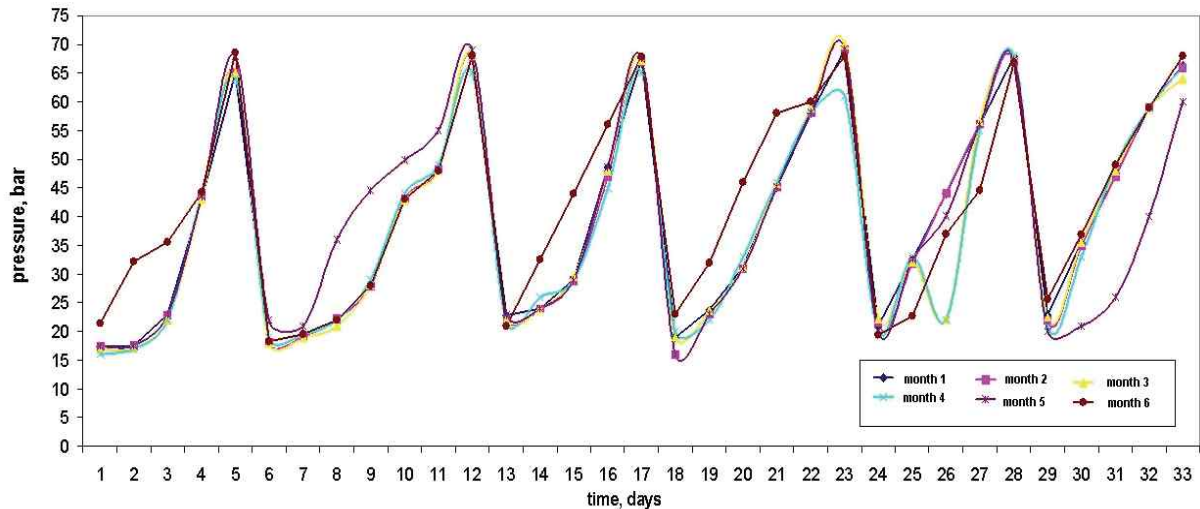
침출수 처리 RO 공정 흐름도¹²⁾

12. 'Reducing Environmental Risk of Landfills: Leachate Treatment by Reverse Osmosis', Gheorghe Asachi, Technical University of Iasi, Romania, Environmental Engineering and Management Journal, Vol.11, No.12, December 2012

II 침출수 처리 분야

○ 6개월 동안 운전 압력 모니터링 결과 압력 변화는 세척 운전 성능 및 침출수 부하에 의한 결과임

- RO 운전 압력 증가는 멤브레인 막힘 및 부착물 생성으로 인한 투과수 유량 감소 및 멤브레인 투과성 저하로 발생됨



6개월간 RO 플랜트 운전 압력 변화¹²⁾

○ 투과수 유량은 멤브레인 부착물 생성으로 14-22 L/m²·h로 유동적임

- 6개월 운전 동안 멤브레인 막힘 및 스케일링 생성으로 인한 투과성 저하로 투과수 유량은 30~50% 감소됨

○ RO 처리 후 COD는 최대 허용 농도의 $\pm 20\%$ 범위 농도를 나타냄

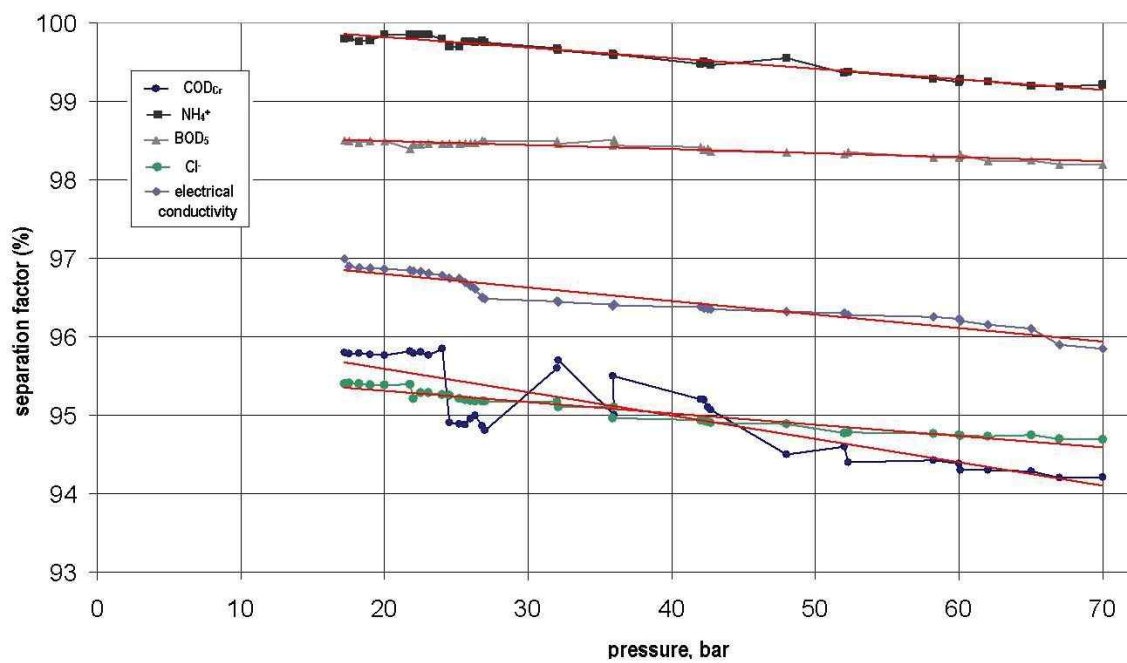
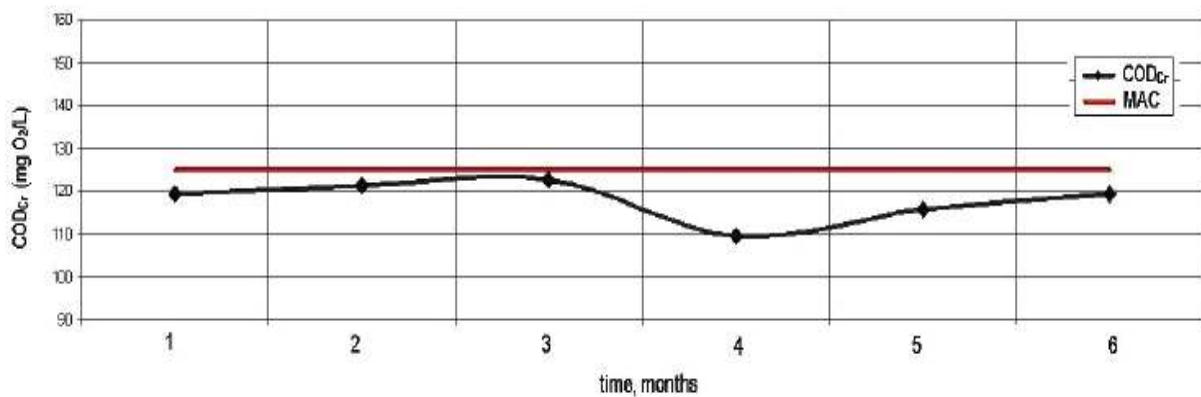
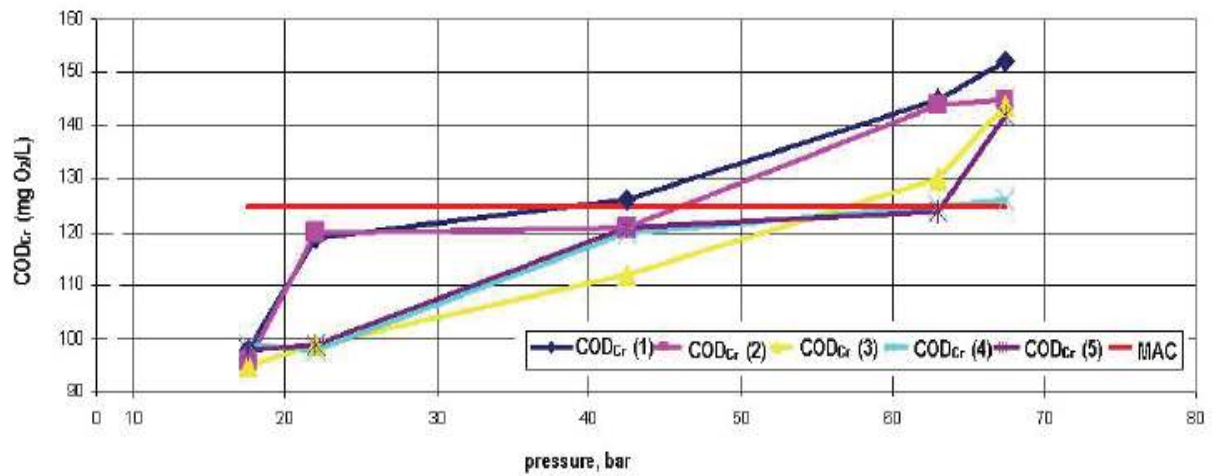
- COD 값은 40 bar까지는 최대 허용 농도값보다 낮았지만 그 이상 압력에서는 최대 허용 농도를 초과함
- 운전 사이클, 세척 성능, 침출수 부하량에 따라 COD 농도 달라지고 멤브레인 투과수 유량은 COD 변화에 따라 달라짐
- RO 2단계 처리 후 COD는 6개월 동안 $\pm 4.5\sim 7.5\%$ 변동 범위에서 최대 허용 농도 이하의 값으로 측정됨

- COD 농도 700~3,500 mgO₂/L 침출수를 DT-RO로 처리하여 COD 94~96%가 제거됨

○ 멤브레인 부착물 형성 등으로 분리능이 저하되고 투과수 용질의 농도가 높아지며 이에 RO 압력은 높아지면서 투과 유량은 감소됨

- RO 압력이 높아질수록 용질 분리효율은 저하되어 COD_{Cr}, NH₄⁺, BOD₅, Cl⁻, 전기전도도의 분리효율이 저하됨
- DT-RO 시스템으로 유기·무기 오염물 제거율이 높아 COD_{Cr}, Cl⁻, NH₄⁺, 전기전도도 제거율이 94% 이상 유지됨

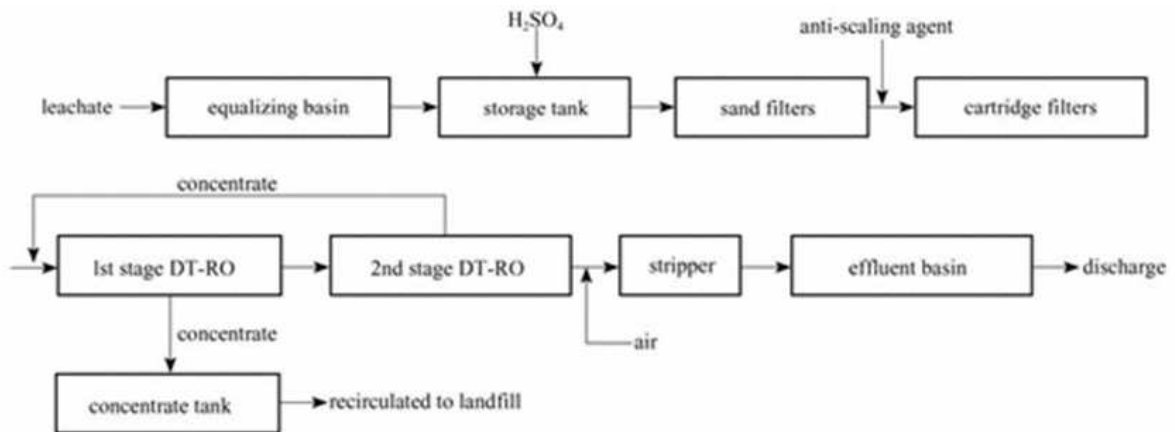
1. RO 시설 국내의 사례



2-5. 중국 RO 침출수 처리 사례¹³⁾

○ 중국 충칭시 Changshengqiao 생활폐기물 매립지(매립 공간 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, 2003년부터 운영)는 일 1,500 톤을 매립하고 있음

- DT-RO 시스템 용량은 일 500 m^3 으로 침출수 80%를 회수하고 있음
- RO 전처리 공정은 균등화조(pH 조정), 모래·카트리지 필터로 구성됨
- RO 공정은 1단계 침출수 처리, 2단계 투과수 처리로 구성됨
- RO 처리수는 공기 탈기 후 방류하며 RO 농축액은 매립지에 재순환함



중국 충칭시 Changshengqiao 매립지 침출수 RO 처리 공정 흐름도

○ DT-RO 시스템은 초기 6개월 동안 안정적으로 운전됨

- RO 오염물 처리 효율은 98% 이상임
- 멤브레인 화학적 세척을 위해 1단계 침출수 처리 멤브레인은 세척제 A로 100 시간마다 세척제 C로 500시간마다 세척함

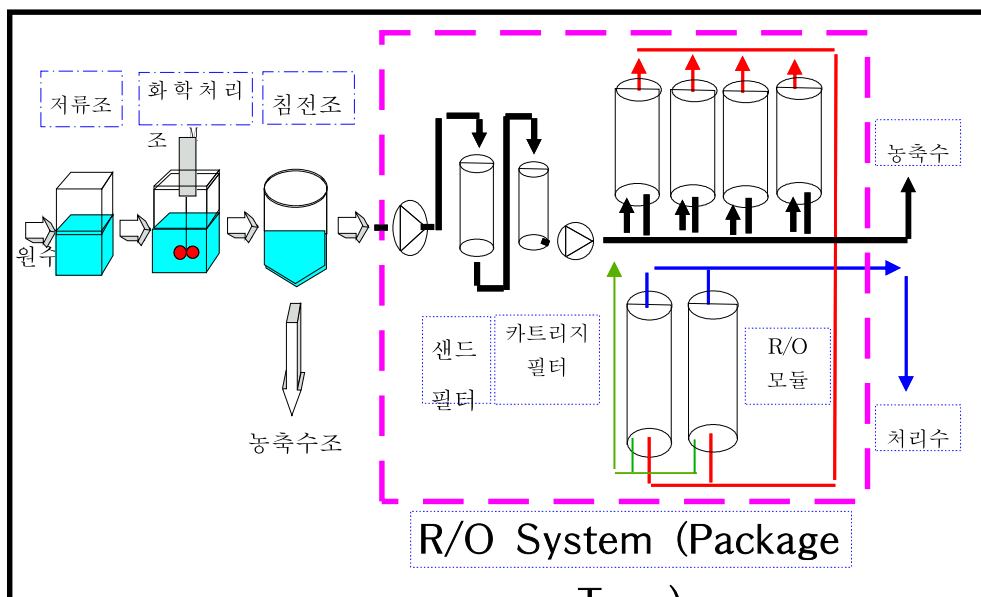
< DT-RO 침출수 제거효율¹³⁾ >

성분	제거효율
COD	99.2~99.7%
TOC	99.2%
전기전도도(EC)	99.6%
NH ₃ -N	98% 이상
SS	불검출
Ca ²⁺ , Ma ²⁺ , Ba ²⁺	99.9%

13. 'Performance of landfill leachate treatment system with disc-tube reverse osmosis units', Yanping Liu, Xiujin Li, Baozhen Wang, Shuo Liu, Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, Volume 2, Issue 1, pp 24-31, March 2008

3 국내 RO 침출수 처리 사례

- 국내 DT형 모듈 RO 시스템의 침출수 처리 구성은 다음과 같이 저류조, 화학처리, 침전조, 샌드필터, 카트리지 필터, RO 모듈로 구성됨¹⁴⁾
 - 1단계 RO 처리수는 다시 2단계 RO로 2번 처리하여 방류됨
- 거제, 순창, 태안 매립장 침출수 처리 RO 시설 운전 현황 및 운전조건은 다음과 같음
 - 3곳 매립지 침출수 RO 처리 효율은 COD_{Cr}, SS는 99% 이상 높고, NH₃-N, T-P는 97% 이상, NO₃-N은 약 80% 이상임



DT RO 처리 시스템 흐름도¹⁴⁾

< 매립지 RO 처리시설 현황 및 운전조건¹⁴⁾ >

항목	운전조건		
가동 현장	거제	순창	태안
유입 용량 (m ³ /day)	20	50	10
처리수 용량(m ³ /day)	15	37.5	7.5
유입 전기전도도	15,000 μ S/cm		
유입수 온도	5 ~ 35°C		
유입수 pH	6.0 ~ 7.0		
처리수 pH	6.0 ~ 7.0		
운전압력	25 ~ 65bar		
회수율	± 75%		

14. '직병렬 흐름의 Disc-Tube형 멤브레인 모듈 역삼투 침출수 처리 공법', ㈜알오환경시스템, 장성은

II 침출수 처리 분야

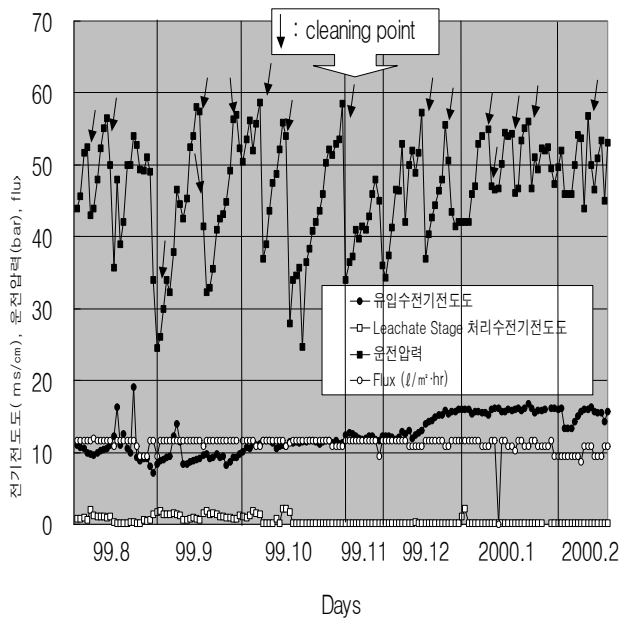
< 거제, 순창, 태안 매립장 수질분석자료¹⁴⁾ >

구 분	거 제			순 창			태 안		
	유입수 (mg/l)	처리수 (mg/l)	처리 효율(%)	유입수 (mg/l)	처리수 (mg/l)	처리 효율(%)	유입수 (mg/l)	처리수 (mg/l)	처리 효율(%)
CODcr	1,279	10.83	99.1	1,636	19.31	98.8	2,615	25.11	99.0
SS	80	0.41	99.4	90	0.52	99.4	162	0.95	99.4
NH ₃ -N	2,078	46	97.7	1,779	24.8	98.6	1,460	21.5	98.5
NO ₃ -N	4.75	0.72	84.8	1.63	0.25	84.6	4	0.81	79.8
T-P	16.9	0.33	98.0	11.1	0.77	93.0	8.7	0.2	97.7

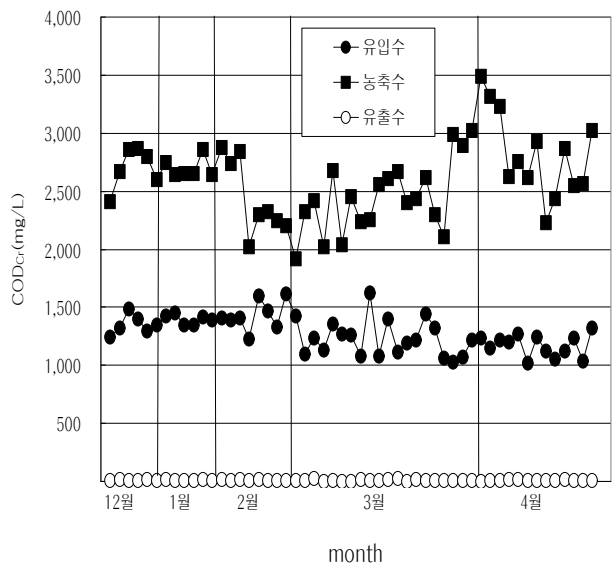
(주 : 한국건설기술연구원에서 분석한 수질자료로 '99년 12월 ~ 2000년 4월'까지 5개월 간 분석한 1일 분석결과에 대한 평균값임)

○ 거제매립장 침출수 RO 처리로 전기전도도가 원수 10-20 mS/cm에서 처리수 3 mS/cm 이하로 지속적으로 운전됨

- 운전압력은 30~60 bar로 유량은 약 10 L/m²·hr로 일정하게 유지됨
- COD는 유입수 1,000~1,500 mg/L에서 유출수 약 10 mg/L로 일정하게 처리됨



거제매립장 전기전도도, 운전압력 및 유량 변화¹⁴⁾



거제매립장 COD_{Cr} 유입수, 농축수, 유출수 변화¹⁴⁾

○ 국내 41개 매립장에 RO 시설이 설치됨¹⁵⁾< 국내 매립장 침출수 처리 RO 시설¹⁵⁾>

순번	현장명	용량 (m ³ /일)	순번	현장명	용량 (m ³ /일)
1	동광양 지정폐기물 매립장	120	22	태안군 광역 매립장	40
2	대전시 장기 위생매립장	200	23	산청군 매립장	30
3	태안군 소원면 매립장	10	24	영양군 매립장	35
4	거제시 신현읍 매립장	20	25	성주군 매립장	33.3
5	강릉시 주문진읍 매립장	35	26	서산시 매립장	120
6	태안군 태안읍 매립장	10	27	남제주군 남원읍 매립장	20
7	예산군 삽교읍 매립장	10	28	포항시 호동 매립장	110
8	포항시 구룡포읍 매립장	30	29	수도권매립지 고도처리	300
9	순창군 매립장	50	30	철원군 매립장	53.2
10	예천군 소규모 매립장	5	31	창녕군 매립장	40
11	평창군 대화면 매립장	35	32	영덕군 매립장	45
12	경주시 서면 매립장	13	33	평창군 미탄면 매립장	40
13	무주군 매립장	80	34	거제시 석포매립장	100
14	논산시 매립장	67	35	구례군 매립장	30
15	청송군 매립장	35	36	장흥군 부산면 매립장	66
16	포항시 오천 매립장	40	37	거제시 신현읍 매립장	60
17	거제시 신현 증설 매립장	20	38	서천군 환경관리센터	70
18	예천군 용궁면 매립장	5	39	장흥군 회진면	30
19	장흥군 회진면 매립장	20	40	군위군 매립장	40
20	거제시 석포 매립장	60	41	거제시 석포매립장	100
21	안동시 광역 매립장	120			

15. 알오환경시스템 홈페이지(<http://www.rosystem.co.kr/>)

II 침출수 처리 분야



수도권 매립지 침출수 고도처리
(300m³/일)¹⁵⁾



대전시 금고동 위생매립장(200m³/일)¹⁵⁾



동광양 지정폐기물매립장(120m³/일)¹⁵⁾



안동시 광역 일반폐기물매립장 (120m³/일)¹⁵⁾



포항시 호동 매립장(110m³/일)¹⁵⁾



서산시 대산읍 매립장(60m³/일 × 2 sets)¹⁵⁾



무주군 폐기물 종합처리장(80m³/일)¹⁵⁾



논산시 쓰레기 위생매립장(67m³/일)¹⁵⁾

4 국외 RO 폐수 처리 사례

4-1. 중국 RO 폐수 처리 사례¹⁶⁾

- 중국은 인구증가, 도시화, 급격한 산업발전으로 약 400개 도시에서 물이 부족하여 음용수 공급이 중요한 과제임
 - 2002년 법에 의해 중국 모든 산업에서 물을 재사용하고 물 회수를 높이도록 규정됨
 - 물 재사용 프로젝트를 경제적, 친환경적으로 운영하기 위해 운영비가 낮고 화학 물질 사용량이 적고 소형이면서 장기간 운전을 신뢰할 수 있는 기술이 필요함
 - 1980년대 지표수 및 지하수를 여과하여 음용수를 생산하기 위해 저압력 멤브레인 여과 기술이 경제적인 기술로 사용됨
 - 폐수의 입자를 제거하는 멤브레인의 탁월한 성능으로 물 재이용을 위해 RO 처리 전처리로 저압력 멤브레인을 사용함
 - 중국의 산업 플랜트에 멤브레인이 적용되어 비용을 낮추면서 고품질 공정수를 생산하고 있음
- 지난 7년(2002~2007년)간 Siemens에서 중국에 12개 이상 멤브레인 플랜트가 설치됨
 - Ji Zhuang Zi 처리 플랜트에 2002년 6개 RO 플랜트가 처음 사용됨
 - 10개 멤브레인 여과 플랜트와 오존 시스템으로 2차 유출수 20 MLD(million liters/day) 처리하고 있음
 - 처리수는 Mei-jiang 지역에서는 화장실 용수, 정원수로 Jing-hai County에서는 농업용수로 Chen-tang-zhuang 지역에서는 열병합발전소 냉각수로 사용하고 있음
 - 이외 도시지역에서 묘목장 관개용수 및 자동차 세척수로 사용됨

< 중국 멤브레인 플랜트¹⁶⁾ >

RO 플랜트	지역	운영시작연도	용량(MLD)
Ji Zhuang Zi STP	Tianjin	2002	20
TEDA	Tianjin	2002	40
Taiyuan(power)	Shanxi	2006	15
Fuxin PS	Liaoning	2006	35
Xianyanglu STP	Tianjin	2007	50
Dongjiao STP	Tianjin	2008	50
Guodian Dongshen PS	Inner Mongolia	2008	15
Taiyuan(steel)	Shanxi	2009	50
Handan Steel	Hebei	2009	48
Dagang Oilfield	Tianjin	2009	30

16. 'Membranes Help Treat Industrial Wastewater for Reuse in China', EVOQUA WATER TECHNOLOGIES

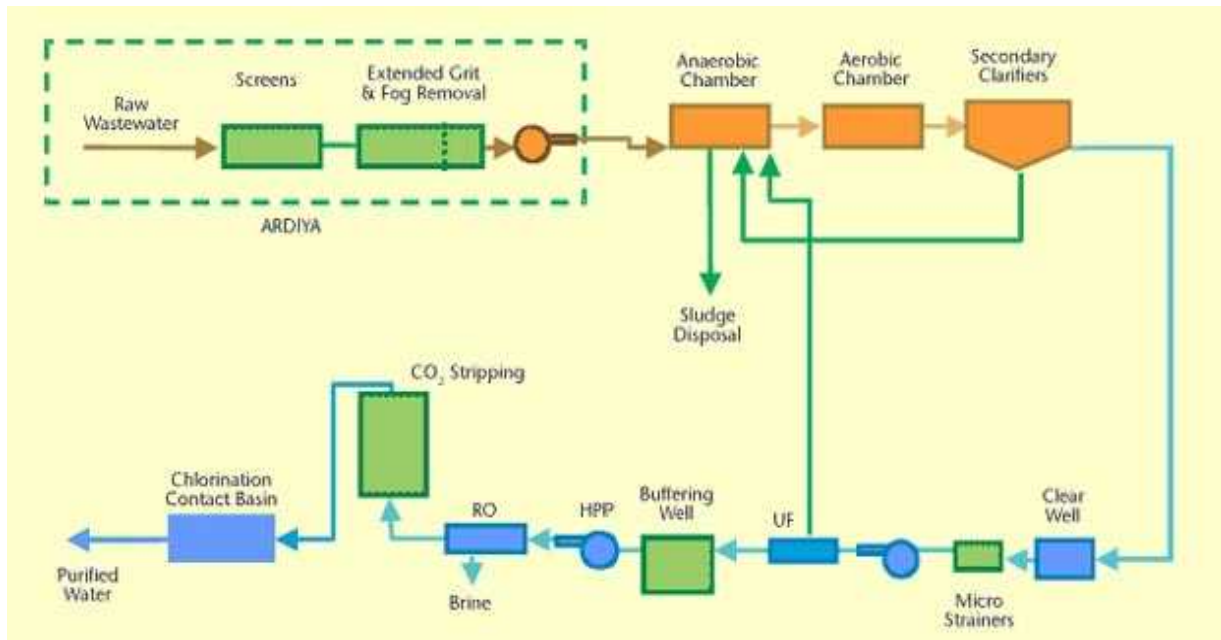
II 침출수 처리 분야

- 텐진경제개발지역(TEDA)에 2차 유출수를 처리하기 위해 2차 파일럿 플랜트가 설치됨
 - RO 및 멤브레인 플랜트로 20 MLD를 처리하여 비식용수로 지역에서 사용하고 10 MLD는 처리하여 산업적 용도로 사용함
 - 이 플랜트의 미래 용량은 40 MLD로 설계되어 중국에서 이중 멤브레인 공정을 사용하는 최초 대용량 시스템임
- 2007년 텐진 지역에 세 번째 처리수 시스템이 Xianyanglu 처리 플랜트에 설치되어 40 MLD는 비식용수로 지역에서 사용하고 10 MLD는 산업용수로 사용함
 - 텐진 지역에 Dagang Oil Field에서 멤브레인 시스템을 사용하여 석유 산업 폐수와 지방 2차 유출수를 50 대 50 비율로 처리함
 - 2006년 9개월간 파일럿 시스템 운전 후 시스템이 설계·설치되어 2009년 사용되기 시작됨
- Shanxi 지역 Taiyuan 도시에서 담수가 부족하여 발전소 2차 유출수와 지역 유출수 15 MLD를 처리하기 위해 멤브레인 시스템 2006년부터 사용함
 - RO 시스템 전에 3개의 멤브레인 시스템으로 전처리하고 주입수의 높은 부유물을 처리하기 위해 36.5~50 L/m²/hr 용량으로 설계하여 처리함
- Liaoning 지역 Fuxin 발전소에서는 멤브레인 시스템을 사용한 처리수를 공급하여 담수 수요를 대체함
 - 2006년 설치되어 산업 폐수와 지역 2차 유출수 혼합수 35 MLD를 처리함
 - 처리수는 RO 시스템 전처리에 사용되고 보일러 주입수로 공급됨
- Inner Mongolia 지역 Guodian Dongshen 발전소에 처리수를 공정수로 사용하여 2008년부터 멤브레인 RO 시스템을 사용함
 - Shanxi 지역 Taiyuan 제철소와 Hebei 지역 Handan 제철소에서 멤브레인 RO 시스템을 사용하여 산업용수와 지역 생활 2차 용수를 50 : 50 비율로 처리하고 있음
 - 2009년부터 사용을 시작하여 Taiyuan 제철소에서는 50 MLD를 처리하고 Handan 제철소에서는 48 MLD를 처리수로 공급하고 있음

4.2. 쿠웨이트 RO 폐수 처리 사례¹⁷⁾

- 2004년 시설 완공된 폐수처리 시설로 RO, UF 멤브레인을 사용하여 일 375,000 m³ 처리용량으로 설치되었고 향후 600,000 m³/d 용량으로 확대될 예정임
 - 쿠웨이트에 물 수요량의 26%의 물을 공급하여 26~142백만 m³ 비식용수를 공급할 수 있음

17. 'Sulaibiya Wastewater Treatment, Kuwait', water-technology.net



새로운 플랜트의 주 처리 단계 흐름도¹⁷⁾

- 아르디아(Ardiya) 지역에 폐수처리 플랜트 용량이 최대에 달해 확장 할 수 없어 추가 처리시설이 필요하였음
 - Ardiya 플랜트에서 폐수를 전처리 후 25 km 길이의 파이프로 Sulaibiya 플랜트에 이송하여 음용수 수질로 처리함
 - Sulaibiya 플랜트는 생물학적 처리, RO/UF 멤브레인 및 슬러지 처리 시설로 구성됨
- Ardiya 플랜트에 유입된 폐수는 4개 라인에서 6 mm 스크린으로 큰 입자가 제거되고 폭기 grit 챔버에서 모래 배제 후 0.2 mm까지 입자 크기를 낮춤
 - 두 개의 20,000 m³ 원형 버퍼 탱크에서 5,000~31,250 m³/hr 유량 유입수를 담아 유량을 10,000~20,000 m³/hr로 조정함
 - 버퍼 탱크에 교반기로 흐름을 0.3 m/s로 유지하여 침전을 방지하고 모든 구조물을 밀폐하고 배출 공기를 포집 처리하여 악취를 방지함
 - Ardiya 처리장에 6개 병렬식 펌프와 2개의 여유분 펌프가 설치(20,000 m³/hr 성능)되어있음
- Sulaibiya 처리장에서 유기물, 질산염, 인산염을 제거하여 RO 멤브레인 스케일링 형성을 최소화하고 멤브레인 전단 폐수 흐름 변동을 최소화함
 - 유입·분배 챔버에서 폐수 유입수와 UF(ultra-filtration) 농축수 및 슬러지 처리시설 표면수를 받아 혼합함
 - 이후 9개 폭기 탱크(총 부피 208,900 m³)로 혼합수를 이송하여 혐기성, 무산소, 호기성 처리 공정으로 처리함

II 침출수 처리 분야

- 하수슬러지는 7개 중력 벨트 농축기 및 120개 슬러지 건조 베드를 사용하여 수분을 제거하고 유기물질은 4개의 8,000 m³ 폭기 소화조에서 처리함
 - 유기물 함량이 낮고 병원균이 없으며 건조된 형태로 처리하여 6개월 이상 저장 후 농업 비료로 사용함
- 유입수의 85%를 회수하고 15%는 바다에 유출하도록 설계된 UF/RO 시스템으로 잔류오염물, 용존고형물, 병원균을 제거하여 음용수 수질 물을 생산함
 - UF/RO 시스템 전단에 5개의 60 μ m 디스크 필터와 8,000 m³ 2차 유출구 유역이 설치되어 UF 펌프에 흡인 및 화학적 조절 역할 제공함
 - UF 플랜트에 68개 배열(skids, 각 배열에 32 압력 용기 구비)가 정렬되어 있고 총 멤브레인 면적은 304,604 m²임
 - 필요시 1차 산성 세척수와 2차 염화 세척수로 멤브레인 단면 및 끝 부분을 세척함
- 여과액을 RO시설로 펌핑전 6,000 m³ 유역(basin)에 보냄
 - 이 유역은 첫단계에서 24개 배열(skids)로 구성되고 2단계에서 12개 배열, 3단계에서 6개 배열로 구성됨
 - 각 배열(skid) 마다 72개 압력 용기(20 cm)로 구성되어 있고 용기마다 7개 멤브레인 (20 cm × 1 m) 모듈로 구성됨
- RO 투과수에서 CO₂를 제거하기 위해 6개의 공기 탈기 타워가 설치되어 있고 이외 염소 주입 시설이 플랜트 일부로 설치되어 있음



Sulaibiya RO/UF 멤브레인 물정화 시설¹⁷⁾



공사현장(2002.7~2004.11)¹⁷⁾
(초기 용량 : 375,000 m³/d)



UF 멤브레인(304,640 m², 68 skids)으로 용존고형물, 박테리아, 바이러스 제거하여 음용수 수질 물 생산¹⁷⁾



RO 시설(42개 skids 구성, 각 skid 72개 압력용기 구성, 압력용기에 7개 멤브레인 모듈 포함)¹⁷⁾

4-3. 캘리포니아 Ramona RO 폐수 처리 사례¹⁸⁾

- 라모니 지역 San Vicente 폐수 처리 플랜트에서 일 1 MGD(million gallons per day) 폐수를 UF 및 RO 멤브레인, UV 살균 시스템으로 처리하여 폐수 총용존고형물(TDS)을 600 ppm 이하로 처리하여 배출함
 - Ramona 지역에서는 처리수를 지역 골프장 및 아보카도(avocado) 숲에 용수로 공급함
- UF 폐수를 폐수 플랜트 앞쪽으로 반송하여 RO 회수율은 95% 이상임
 - 시스템 회수율을 95%에 맞추도록 설계하여 농축수 양을 기존 RO 시스템(75~80% 회수율)에 비해 급격히 줄일 수 있음
 - RO 플랜트 회수율이 95% 이상으로 75% 회수율 RO 플랜트 운전시보다 백만 달러 절약할 수 있음
- UF 시스템이 2개 설치되어 2주 동안 운전 후 전환됨
 - UF 멤브레인에서 세척 필요시 대기 중인 UF 시스템이 활성화되어 처리 공정이 운영됨

18. '95% Water Recovery From Wastewater', ENAQUA A GRUNDFOS INNOVATION COMPANY

5 RO 농축수 매립지 장기간 재순환 지속가능성

- RO 처리 공정은 침출수의 염분을 제거하는 기술로 염분이 없는 처리수를 배출하여 관개용수로 공급할 수 있음
 - RO 멤브레인 공극으로 NaCl 포함한 침출수 오염물이 걸러져 농축수에 농축됨
 - RO 농축수는 소각로에 소각하거나 현장에 적정 처리시설에서 처리해야 함
- RO 농축수를 매립지에 재순환하는 경우 폐기물과 염분의 반응성은 거의 없으므로 침출수 염분 농도가 지속적으로 높아질 수 있음
 - 침출수 염분 증가시 RO 플랜트 처리에 부하가 발생할 수 있음
- 일부 연구에서 RO 농축수 매립지 재순환 영향 평가 결과 RO 농축수 재순환으로 인한 침출수 수질 변화는 거의 없다고 보고되었음
 - 멤브레인 여과 농축수를 독일 매립지에 수년간 반송하여 처리한 결과 유독물의 농도 증가는 없었음
 - 이 결과를 입증하기 위해 독일 "Deponiezweckverband Kaiserslautern" 지역 "Deponie Kapittelal" 매립지에 장기간 시뮬레이션 수행(1993년 6월~1995년 2월)함
- 또한 실험 장치로 폐기물로 축적된 실린더에 다양한 강우 조건과 추가적인 농축수 반송 조건하에 침출수를 분석함
 - 2개의 실험 실린더를 설치하여 같은 유형의 폐기물로 채우고 RO 농축수를 반송한 경우와 반송하지 않은 경우 비교 평가함
 - 실험 장치는 높이 3.3 m, 외경 0.5 m, 단면적 0.184 m²이고 파이프는 아크릴 유리로 구성되어 육안으로 파이프 상태 관측할 수 있음
 - 폐기물로 채워진 두 개의 파이프는 농축수 추가 주입시 큰 변화 없었음
- RO 농축수 매립지 재순환시 생화학적 분해 공정으로 매립지 폐기물과 농축수의 유기물 함량이 저감됨
 - 미생물 분해로 산화물, 황화물, 탄산염으로 구성된 유기·무기 침전물이 형성됨
 - 매립지 폐기물 표면에 흡수에 의한 중금속 고정, 결정화 반응으로 인한 염의 고정, 무기 화학적 반응으로 탄산염·황화물·황산염 고정으로 침출수의 변화가 없다고 분석됨
- 결론적으로 장기간 시뮬레이션 결과 RO 농축수 반송이 침출수 처리에 적절한 단계로 평가됨
 - 매립지에 결정화 반응으로 염이 고정화되어 불용성 상태로 유지되게 되어 RO 농축수 재순환이 지속가능하게 됨

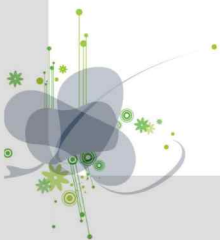
19. 'Is Long-Term Recirculation Of Leachate Concentrate From Reverse Osmosis Treatment Sustainable?', leachater, April 6, 2013, Leachate Treatment

참고문헌

1. 'Landfill Leachate Purification through Reverse Osmosis at Ihlenberg Landfill in Germany', Pall Corporation
2. 'Reducing Environmental Risk of Landfills: Leachate Treatment by Reverse Osmosis', Gheorghe Asachi, Technical University of Iasi, Romania, Environmental Engineering and Management Journal, Vol.11, No.12, December 2012
3. 'Disc Tube™ Module System Filtration Solutions for Landfill Leachate', Pall Corporation
4. 'RO & UF Membranes: Market Opportunities in Landfill Leachate?', Philippe Moulin, Laboratory of Mechanics and Acoustics at Aix Marseille Université, Waterworld
5. 'Leachate Treatment using Membrane Technology', PCI's membrane systems
6. 'Reverse Osmosis-Based Leachate Treatment System at a New York Landfill', Patrick Stanford(Rochem), Peter Baker(Seneca Meadows Landfill), May 23 2012
7. 'Reverse Osmosis - Based Leachate Treatment System at Seneca Meadows Landfill - Highlights from Start-up and Operation', Peter Baker(Seneca Meadows. Inc.), Patrick Standford(Rochem), Rochem
8. 'Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Landfill Leachate Treatment', Dynatec Systems Inc.
9. 'Landfill Leachate Treatment', Robinson AH, Wehrle Environmental, "The 5th International Conference on Membrane Bioreactors", Cranfield University, 2005
10. '독일 Brandenburg(Berlin) Vorketzin 매립장 침출수처리시설', 해외 선진시설 견학(출장) 보고서(2012.4, 수도권매립지관리공사)
11. '역삼투압에 의한 침출수 중 염류 제거기술', Toji Akihiro, 가미오펜텍(주) 환경장치사업부 환경본부 기술부
12. 'Reducing Environmental Risk of Landfills: Leachate Treatment by Reverse Osmosis', Gheorghe Asachi, Technical University of Iasi, Romania, Environmental Engineering and Management Journal, Vol.11, No.12, December 2012
13. 'Performance of landfill leachate treatment system with disc-tube reverse osmosis units', Yanping Liu, Xiujin Li, Baozhen Wang, Shuo Liu, Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, Volume 2, Issue 1, pp 24-31, March 2008
14. '직병렬 흐름의 Disc-Tube형 멤브레인 모듈 역삼투 침출수 처리 공법', (주)알오환경시스템, 장성은
15. 알오환경시스템 홈페이지(<http://www.rosystem.co.kr/>)
16. 'Membranes Help Treat Industrial Wastewater for Reuse in China', EVOQUA WATER TECHNOLOGIES
17. 'Sulaibiya Wastewater Treatment, Kuwait', water-technology.net
18. '95% Water Recovery From Wastewater', ENAQUA A GRUNDFOS INNOVATION COMPANY
19. 'Is Long-Term Recirculation Of Leachate Concentrate From Reverse Osmosis Treatment Sustainable?', leachater, April 6, 2013, Leachate Treatment

Ⅱ 침출수 처리 분야

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례



세부목차

1. 뉴욕 Seneca Meadows 매립지 RO 침출수 처리 현황 ...	87
2. 포르투갈 매립지 침출수 RO 처리 및 농축수 재순환 평가 ·	96
3. 침출수 RO 농축수 매립지 재순환 실험연구	107
참고문헌	118

1 뉴욕 Seneca Meadows 매립지 RO 침출수 처리 현황

1-1. 침출수 관리 개요¹⁾

- 뉴욕 Seneca Meadows 매립지는 2015년 기준 1.133 km² 매립되었고 0.324 km² 매립 잔여 공간에서 매립이 진행되고 있음
 - 생활폐기물은 일 6,000톤 정도, 연간 220~240 만톤 매립되고 있어 매년 0.04~0.10 km² 면적의 매립지 라이너(liner)가 구축되고 있음
- 9개 침출수 포집정(wells)과 3개의 맨홀(manholes)에서 침출수가 포집됨
 - 9개 LFG 응축수 탱크에 응축수와 지하수 제거 시스템에 지하수도 같이 포집됨
 - 침출수 수질은 다음과 같음

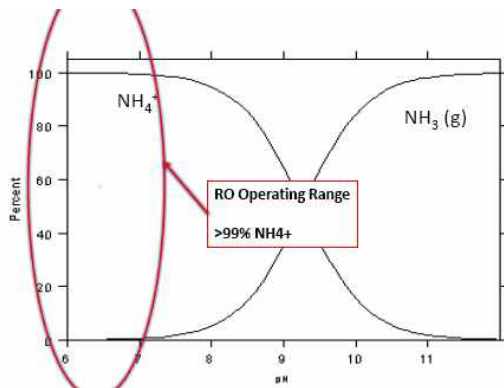
< Seneca Meadows 매립지 침출수 수질¹⁾ >

침출수 성분	단위	평균	최소	최대
pH		8	7	8
암모니아 질소	mg/L	1,702	947	2,800
총 질소	mg/L	1,809	955	2,610
BOD	mg/L	3,271	1,040	7,230
TSS	mg/L	124	46	380
총 인	mg/L	6	3	10
전도도	μS/cm	45,680	18,400	294,000
COD	mg/L	7,568	3,560	14,900
나트륨	mg/L	3,378	1,840	5,010
칼륨	mg/L	1,330	710	1,990
칼슘	mg/L	274	129	523
마그네슘	mg/L	211	159	326
철	mg/L	23	7	61
망간	mg/L	1.6	0.3	5.4
염화이온	mg/L	6,711	3,670	12,900
황산염	mg/L	140	10	411
TDS	mg/L	15,131	9,380	24,100
알칼리도	mg/L	7,109	3,980	10,300
황화물(sulfide)	mg/L	25	10	57
이산화규소(silica)	mg/L	36	26	50
붕산염-B(boron)	mg/L	21	11	31

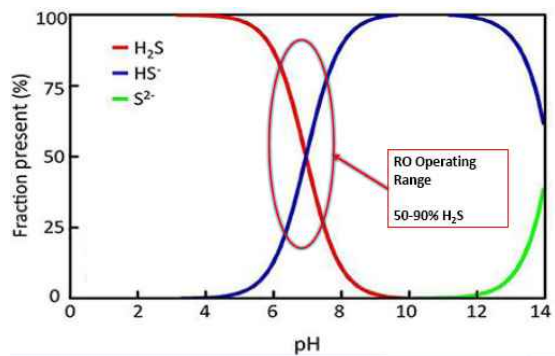
1. 'Leachate Pre-Treatment Using Reverse Osmosis', Peter Baker, P.E. Seneca Meadows, Inc.

II 침출수 처리 분야

- 침출수 암모니아 농도는 1,000~3,000 mg/L 범위로 RO 운전 범위인 pH 6~7에서 NH_4^+ 이온이 99% 이상임
 - BOD 농도는 1,000~7,230 mg/L로 평균 3,271 mg/L임
 - 침출수 황화물(sulfide) 농도는 10~57 mg/L로 RO 운전범위에서 H_2S 분포는 50~90%임



pH에 따른 NH_4^+ 이온 $\text{NH}_3(\text{g})$ 분포도¹⁾



pH에 따른 H_2S , HS^- 분포도¹⁾

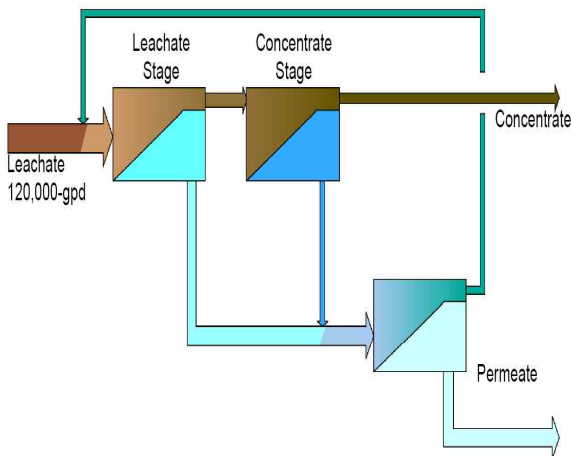
- 공공처리시설(POTW; Public Owned Treatment Works)은 폐수 배출시 BOD (657.3 mg/L), NH_3 (22.68 kg/일), 총용존고형물(TDS 500 mg/L, 2013년 초 추가) 농도제한이 있음¹⁻²⁾
 - 또한 개별사업장에서 공공처리시설로 폐수 배출 기준이 강화되어 제한 농도가 매년 낮아지고 있음
 - 공공처리시설에서 2010년 TDS(총용존고형물) 처리 문제 발생 및 가동 정지 등으로 침출수 전처리가 필수적임
 - 연간 침출수 발생량은 증가되고 있어 2013년 166,540 m^3 , 2014년 204,390 m^3 발생되었음
 - 이에 대처하기 위해 RO 시스템을 2013년 초부터 운영중임

1-2. 기술평가²⁾

- 뉴욕 Seneca Meadows 매립지는 2015년 기준 1.133 km^2 매립되었고 0.324 km^2 매립 잔여 공간에서 매립이 진행되고 있음
 - 공공처리시설로 침출수 배출가능량을 높이기 위해 유기물 및 총용존고형물을 처리하여 NH_3 , BOD, TDS 농도를 낮추어야 함
 - 또한 뉴욕에서 규제하는 SPDES(State Pollutant Discharge Elimination System) 프로그램 농도기준을 준수하기 위해 침출수 처리가 필요함

2. 'Reverse Osmosis-Based Leachate Treatment System at a New York Landfill', Patrick Stanford(Rochem), Peter Baker(Seneca Meadows Landfill), May 23 2012

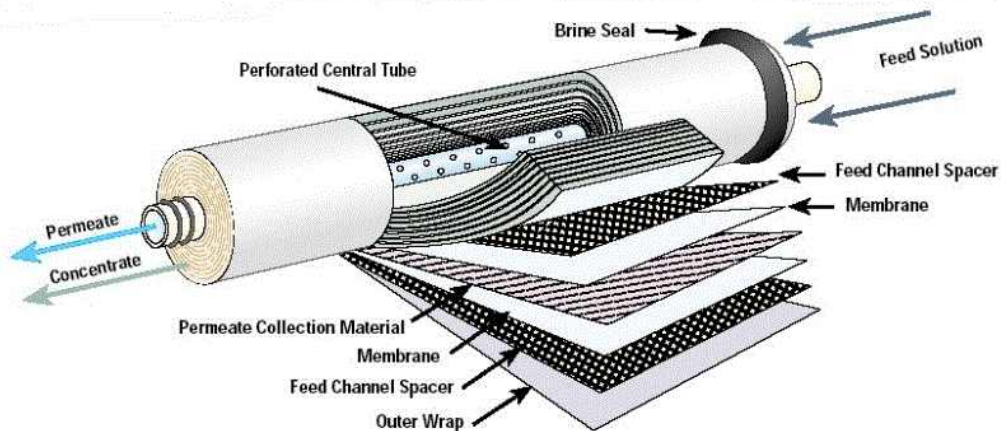
- Rochem에서 제시한 1개월간 파일럿 실험결과 RO 처리로 침출수가 일 454.2 m³ 처리되어 처리수로 75% 회수되었음
 - 3단계 공정으로 1단계에서 침출수를 100% 처리하고 1단계 농축수는 고성능 RO로 처리하며 1단계 투과수도 2단계 RO로 처리함
 - 3단계 RO 처리 공정은 pH 조정, 카트리지·모래 필터, 침출수 RO 처리, 농축수 RO처리, 투과수 RO 처리, 최종 pH 조정, 공정 용기, PLC, 농축액 저장 탱크로 구성됨
- RO 처리 장점으로 자본비용(capital costs)이 낮고, 예상 처리비용이 낮으며, SPDES 배출기준을 준수하는데 적당함
 - 예상되는 단점으로 농축수 재순환시 문제 발생 여부, 장기간 멤브레인 성능 유지 관련 우려가 있음



3단계 RO 처리 공정도¹⁾



3단계 RO 시설 설치 현장¹⁾



RO 나선형 구조¹⁾

II 침출수 처리 분야

1-3. RO 시스템 설치¹⁾

○ 2012년 RO 시스템이 설치되어 2013년 1월부터 운전되었음



황산 탱크(18.9 m³ 이중벽 탱크)¹⁾



전처리 여과 필터¹⁾



침출수 RO 처리(78개 모듈, 3개 펌프,
1,088 psi, 454.2 m³/일)¹⁾



농축액 RO 처리(24개 고성능 모듈, 3개
고압 펌프, 1,740 psi, 189.3 m³/일)¹⁾



투과수 RO 처리(25개 모듈, 3개 고압펌프,
1,088 psi, 367.1 m³/일)¹⁾



후처리 pH 조정(CO₂ 제거 탈기탑, 보조
부식제 주입, pH 6.5~7 조정)¹⁾

1-4. RO 시스템 운전 초기 문제점¹⁾

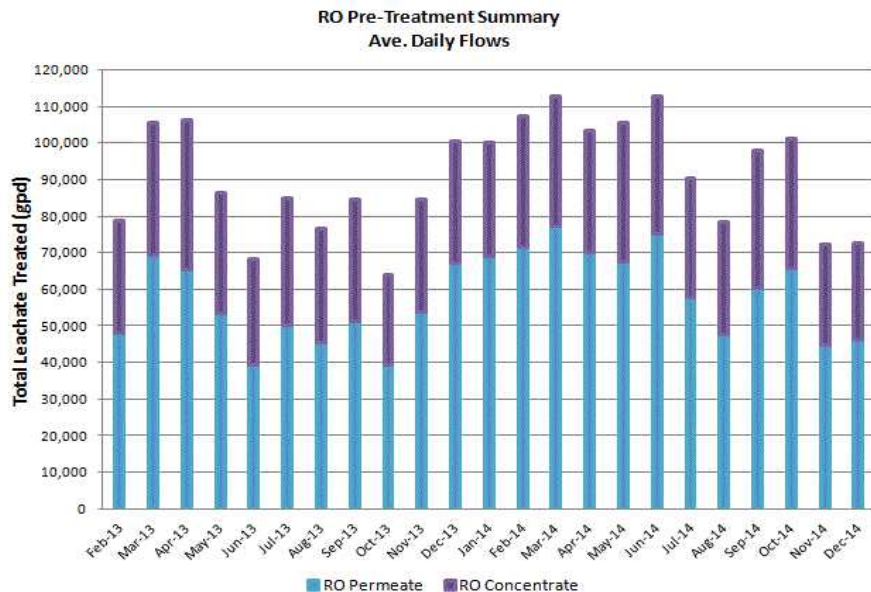
- 2012년 11월 말 시스템 운전 시작시 H₂S가 침출수 탱크 상부에 500 ppm 이상, 건물 안에 10 ppm 이상 검출됨
 - 탱크에서 H₂S가 누출되어 운전 4주 후 정지됨
 - 침출수 pH 저감 단계에서 pH를 7.5에서 6 이하로 낮추면서 침출수에 용존된 황화물(50 mg/L)이 H₂S로 전환됨
 - pH 6일 경우 용존 황화물 30~50 mg/L 농도에서 H₂S(g)는 80% 이상으로, 침출수 탱크 상부 H₂S 농도는 500 ppm 이상으로 측정됨
- 2013년 2월 재가동시 황산을 일 0.95~1.14 m³ 사용하여 pH가 6 미만으로 낮게 유지되면서 암모니아가 제거되고 H₂S가 발생되면서 황산염(sulfates) 스케일이 발생됨
 - 재가동 후 pH를 높이기 위한 CO₂ 탈기탑에서 H₂S가 탈기되어 건물 근처에서 악취가 감지됨
 - RO 투과수에 pH 농도가 낮고 용존 황화물 농도가 높음
- H₂S 산화제로 오존 및 과망간산염(건식 여재)으로 파일럿 실험을 실시함
 - 이후 대용량 건식 스크러버(28.3 m³/분)를 선정하여 H₂S 농도가 최대 1,000 ppm에서 22 ppm으로 저감됨
 - 또한 건물 내부 H₂S 경보기를 설치하고 배출가스 H₂S 농도를 모니터링함
- RO 운전시 펌프 진동, 모래 필터 역세척, 펌프 크기 조정이 문제시 됨
 - 2013년 초에는 약 454.2 m³/일 처리되고 75% 투과수로 회수되었으나 2015년에는 378.5~416.4 m³/일 처리되고 65~70% 투과수로 회수되고 있음
- RO 시스템 공급사(Rochem)가 2014년 파산 및 구조조정으로 인력 지원이 제한되었으나 RO 세척제나 스케일방지제는 공급가능함
 - 공급사 구조조정 후 새로운 회사가 운영되어 기술적 지원이 가능하며 유지보수 지원, 세척제, 멤브레인 교체가 가능함
- RO 시스템 표준 운전 모드로 일 단위 운전은 점검·기록, 집중원격감시제어시스템(SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition) 관리, 모니터링, 텍스트 메시지 경고 발송, RO Skid 세척, H₂S 스크러버 점검 및 산 이송으로 구성됨
 - 한 명의 전임 운전자로 운영될 수 있으며 엔지니어의 지원이 필요함
- RO 멤브레인 세척은 성공적인 운전에 필수적이며 산세척제(mineral scalants)와 부식세척제(foulants)가 사용됨
 - 침출수 RO 처리에서는 멤브레인이 125시간(5.2일) 간격으로 여름에는 4시간, 겨울에는 8시간 이상 세척됨

II 침출수 처리 분야

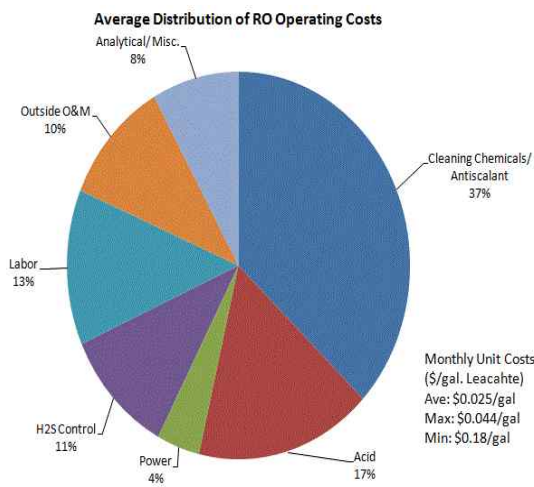
- 농축수 RO 처리에서는 2~3 일 간격으로 세척되었으며 3개의 모듈이 독립적으로 운영됨
- 투과수 RO 처리시 500~1000 시간(20.8~41.7 일) 간격으로 세척됨
- RO 세척이 적절하지 않을 경우 RO 운전 시간이 12 시간 미만으로 단축됨

1-5. RO 시스템 운전 성능¹⁾

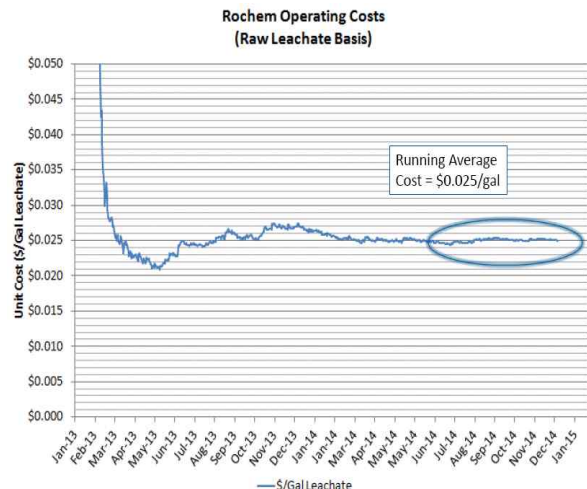
- 2014년 운전 기준 340.7~416.4 m³/일 침출수를 RO로 처리하여 65~70% 투과수가 회수됨
- RO 운전비용에 세척제·부식방지제(37%), 산(17%), 인건비(13%), H₂S 제어(10~11%)가 주요요소임
- 월평균 운전비용은 7,345 원/m³이고 5,288~12,927 원/m³로 변동이 있음



RO 처리수 및 농축수 유량 변화¹⁾



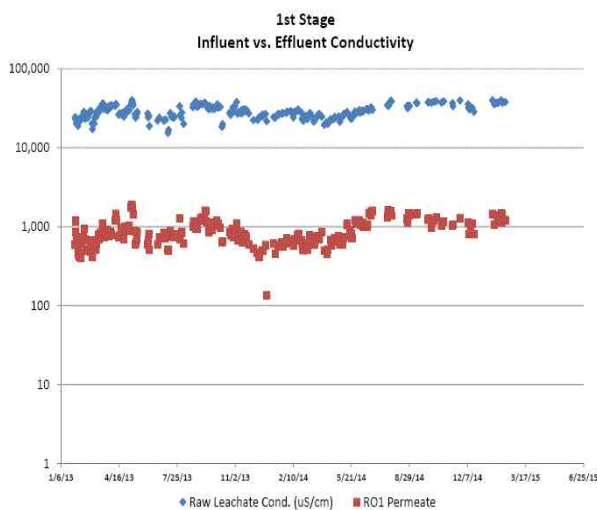
RO 운영비 구성¹⁾



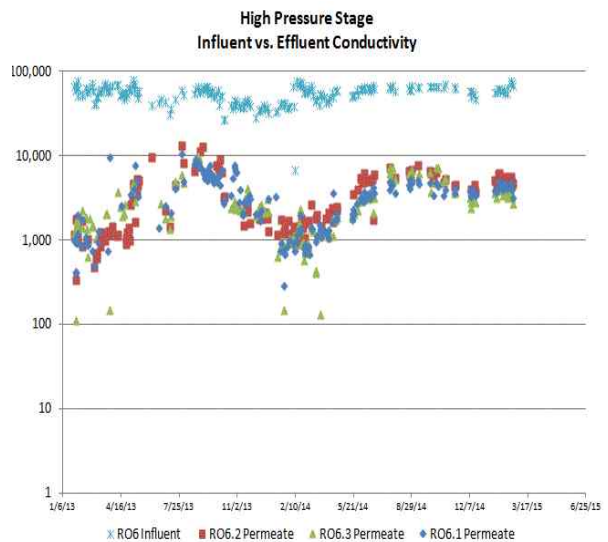
침출수 1 갤런당 RO 처리 비용¹⁾

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례

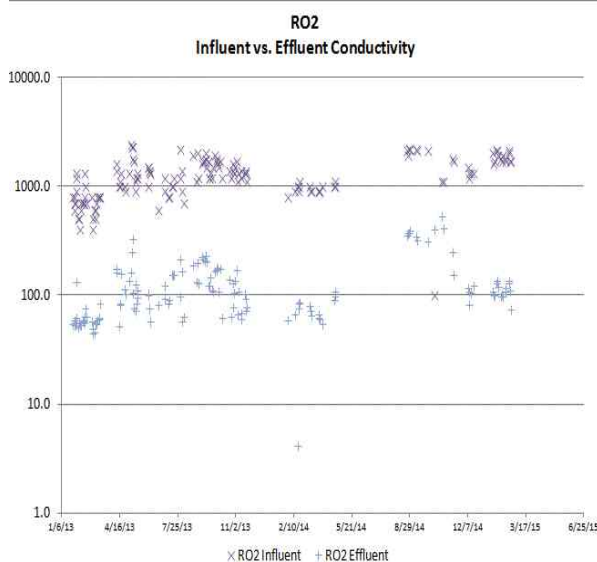
- 침출수 전기전도도는 유입수 평균 45,680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 1단계 처리 후 약 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 2단계 처리 후 약 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 저감됨
- RO 운전은 온도, 압력, 삼투압에 따라 달라지며 계속 운전시 멤브레인 스케일 형성으로 인해 RO 운전 압력을 높여야 함
- 염투과 비율(salt passage, 투과수 농도/원수 농도 $\times 100(\%)$)은 온도, 압력, 유량에 따라 달라짐
- 높은 온도에서 염투과 비율은 낮아지고 높은 압력에서 유량이 높아지면서 염 투과 비율이 낮아짐



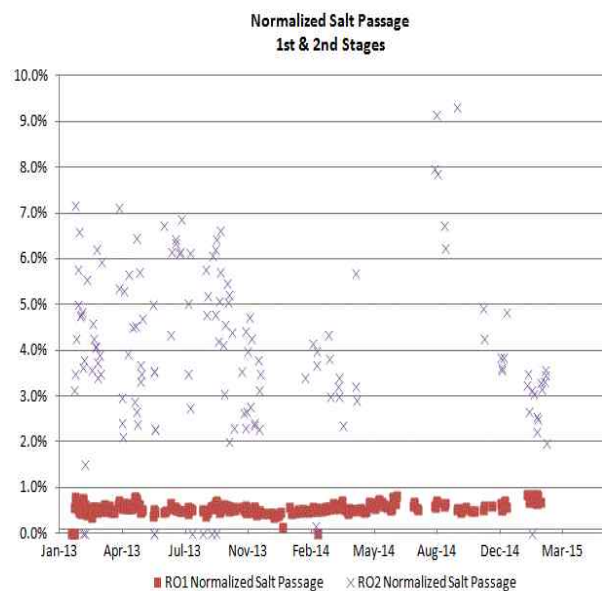
1단계 침출수 처리 전기전도도 변화



1단계 RO 농축수 RO 처리 후 전기전도도 변화



1단계 RO 투과수 RO 처리 후 전기전도도 변화



1단계 RO, 2단계 RO 염투과 비율

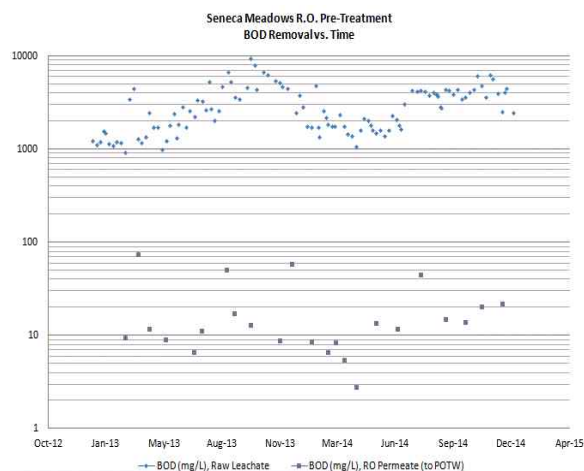
II 침출수 처리 분야

- 침출수 BOD는 95% 이상(보통 99% 이상) 제거되고 암모니아도 95% 이상 제거되나 시간 경과되면서 제거율이 떨어짐
- 침출수 다른 성분도 ppm 단위로 처리됨
- 처리수 암모니아 변동폭이 큰 것은 폴리싱(polishing)제거를 위한 2단계 RO(1단계 투과수 처리) 중지·재가동으로 인한 것임
- pH가 낮은 경우 암모니아 농도는 낮지만 H₂S 농도가 높아지고 pH가 높은 경우 암모니아 농도가 높아지지만 H₂S 농도가 낮아짐

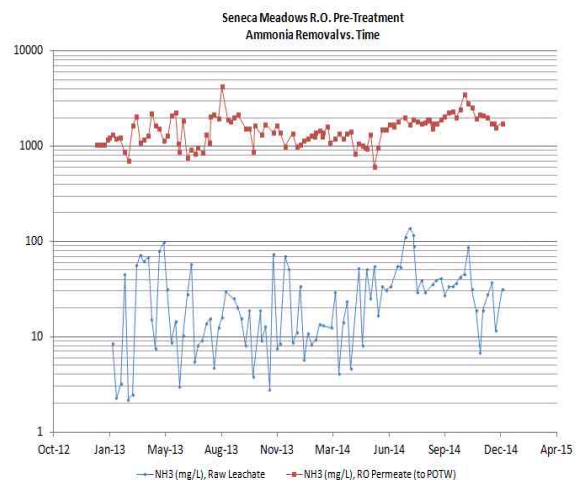
< Seneca Meadows 매립지 침출수 RO 처리수 수질¹⁾ >

침출수 성분	2013년 8월 29일 측정값 (mg/L)	2014년 8월 21일 측정값 (mg/L)
알칼리도	65	65
암모니아	18.1	36.5
BOD ₅	60.3	13.1
염소이온	9.5	8.7
TKN(총킬달질소, 유기질소 + 암모니아성 질소)	20.3	35.8
노말핵산 추출물질 (Oil and grease)	5.0(N.D.)	4.8(N.D.)
인	-	0.05(N.D.)
시안	0.010(N.D.)	0.01(N.D.)
페놀	0.110	0.123
TDS(총용존고형물)	-	64
TSS(총부유고형물)	1.0(N.D.)	1(N.D.)
pH	7.72	6.82
황화물	100.0	1.2

(N.D. : Not detected)

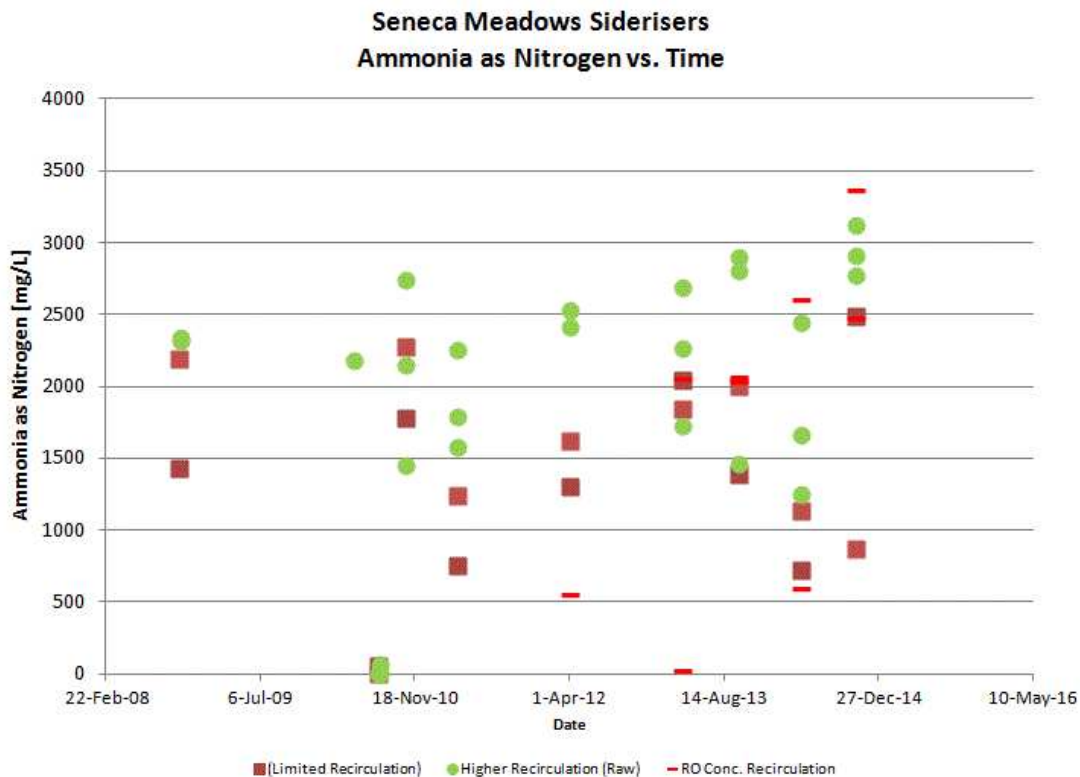


침출수 및 RO 처리수 BOD 변화¹⁾



침출수 및 RO 처리수 암모니아 변화¹⁾

- RO 농축수 농도는 침출수 원수 농도보다 보통 2~3배 높아 NH_3 는 4,000~8,000 mg/L, BOD는 3,000~12,000 mg/L, 황산염(sulfate, 황산 주입)은 8,000~18,000 mg/L, 총용존고형물(TDS)은 30,000~50,000 mg/L 정도임
- RO 농축수는 3개의 개별 매립지에 재순환됨
- 기존 매립지에는 침출수 재순환을 제한적으로 실시하였고, SELF 매립지에는 침출수 원수를 상당량 재순환하였으며 WEX 매립지에는 RO 농축수를 재순환하였음
- 특정 매립지 셀에 암모니아 농도 증가가 관찰되었으나 아직까지 침출수 수질의 큰 변화는 없었음
- RO 농축수 암모니아는 매립지에서 분해되지 않고 총용존고형물(TDS) 농도가 높아질 가능성 있어 RO 농축수 매립지 재순환이 장기적 처리방법은 아님
- RO 농축수 처리를 위해 RO 농축액 부피 저감 및 암모니아 제거가 필요함
- 현재 RO 농축수 암모니아 제거 및 부피 저감을 위한 3개 기술의 파일럿 테스트가 실시되고 있음



제한적 침출수 재순환, 침출수 재순환, RO 농축수 재순환시 암모니아 질소 농도 변화¹⁾

- 성공적인 RO 침출수 처리를 위해 침출수 특성, pH 영향, RO 전처리 영향, RO 농축수 재순환 문제 등을 고려해야 함
- 향후 RO 최적화, RO 농축수 처리를 위한 RO 시설 확장, H_2S 공급원 저감 등이 진행될 예정임

2 포르투갈 매립지 침출수 RO 처리 및 농축수 재순환 평가

- 본 연구에서 포르투갈 매립지 5곳의 장기간 침출수 모니터링을 통해 침출수 구성 및 처리 성능을 평가함
 - 매립지 4곳에서 실시된 RO 농축수 매립지 재순환 결과를 분석함
 - 매립지 4곳의 침출수 RO 농축액 재순환 장기간 평가시 침출수 농도가 COD는 20,000 mg/L 이상, 암모니아성 질소는 1,000~10,000 mg/L 정도로, 황산염은 10,000 mg/L 이상 높아짐
- 포르투갈 5개 위생매립지 침출수 수질을 4~5년(2002~2006년) 동안 분석하여 침출수 특성을 평가하고 RO 농축수 매립지 재순환 영향을 조사함
 - 침출수 RO 농축수 재순환이 없는 매립지의 침출수 수질과 비교함
- 포르투갈 5곳 매립지 일반 특성은 다음 표와 같고 매립지 1을 제외한 다른 매립지에 무해한 산업폐기물이 생활폐기물과 함께 매립됨
 - 폐기물 중 유기물 함량은 32.8~55.7% 정도임
- 침출수 처리에 매립지 4를 제외하고 모두 RO 시스템을 생물학적 처리시설과 함께 적용하였음
 - 또한 매립지 1, 2, 3, 5에서 RO 농축액을 매립지에 재순환하였음
- 연간 침출수 발생량은 매립지1에서 30,678~47,309 m³, 매립지2에서 18,068~59,052 m³, 매립지3에서 21,534~55,348 m³, 매립지4에서 10,546~13,010 m³, 매립지5에서 8,507~11,572 m³임
 - 5년간 매립지 침출수 수질은 다음 표와 같음

< 포르투갈 5개 위생매립지 일반 특성 >

매립지	매립개시	매립면적 (ha)	매립부피 (m ³)	전체 매립량(kg)	생활폐기 물(%)	유기물 함량(%)
1	2002년 1월	14	1,394,600	872,622,554	99.6	55.7
2	2001년 11월	7.9	548,000	314,581,792	80.8	43.9
3	2001년 11월	3.5	3,316,923	216,897,363	82.3	46.4
4	2001년 12월	-	1,320,000	299,629,387	60.9	32.8
5	2002년 1월	13.5	841,624	519,285,924	76.3	43.5

3. 'Assessment study on the leachate management options in five municipal solid waste landfill facilities', Marta Alexandra Ribeiro Pedroso, Instituto Superior Técnico(2007)

< 포르투갈 5개 위생매립지 침출수 처리 시스템 특성 >

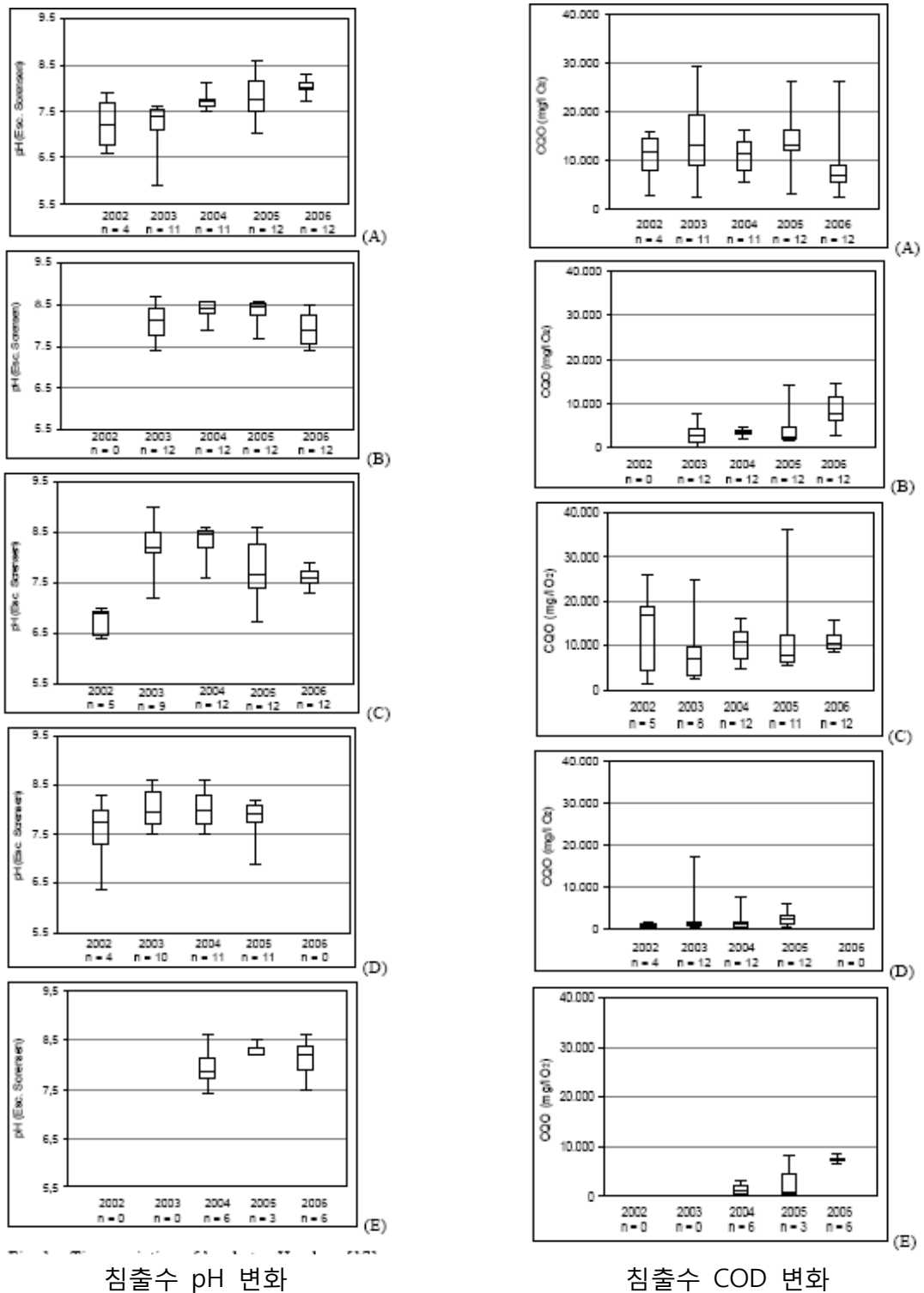
매립지	침출수 처리 시스템	
	주공정	용량(m ³ /일)
1	3 포기산화지, RO	96
2	2 포기산화지, 2 RO	320
3	2 포기산화지, 2 RO	200
4	포기산화지, AS(연속회분식), 물리화학적 처리	60
5	4 혐기라군, RO	100

< 매립지 5년(2002 - 2006)간 침출수 수질 >

수질 항목	평균	범위(mg/L)	중간값
pH	7.9	5.9~9.0	7.9
전도도	2,661	1.2~8,520	3165
COD	6,661	2.4~36,000	3550
BOD ₅	2,025	5.0~15,000	520
BOD ₅ /COD	0.31	0.009~0.83	0.35
TOC	2,519	1.1~19,050	2,013
TSS	3,885	2.0~14,800	251
NH ₃ -N	1,709	0.09~15,600	1,376
NO ₃ -N	282	0.20~9,750	4.5
총질소	1,420	15~9,600	890
SO ₄ ²⁻	2,088	0.28~24,000	480
Cl ⁻	4,954	5.0~68,000	3,500
총인	47	0.06~1,000	9.0
총철	222	0.47~9,100	15.7
Na	2,983	24~11,900	3,120
Ca	213	32~670	180
Mg	186	36~398	165

- 매립지 침출수 pH는 7.5~8.5 범위로 매립초기 특성을 나타내며 매립지 1, 3에서는 pH가 6.5~7.5 정도로 약간 낮음
- 2004년 이후로 매립지 2, 3, 4에서 pH는 낮아지는 경향있음
- 매립지 2, 4, 5 침출수 COD는 10,000 mg/L 미만이었으나 매립지 1, 3 침출수 COD는 약 25,000 mg/L 이상 높게 측정됨
- 매립폐기물 중 생활폐기물과 유기물 함량 높을수록 COD 높음을 알 수 있음

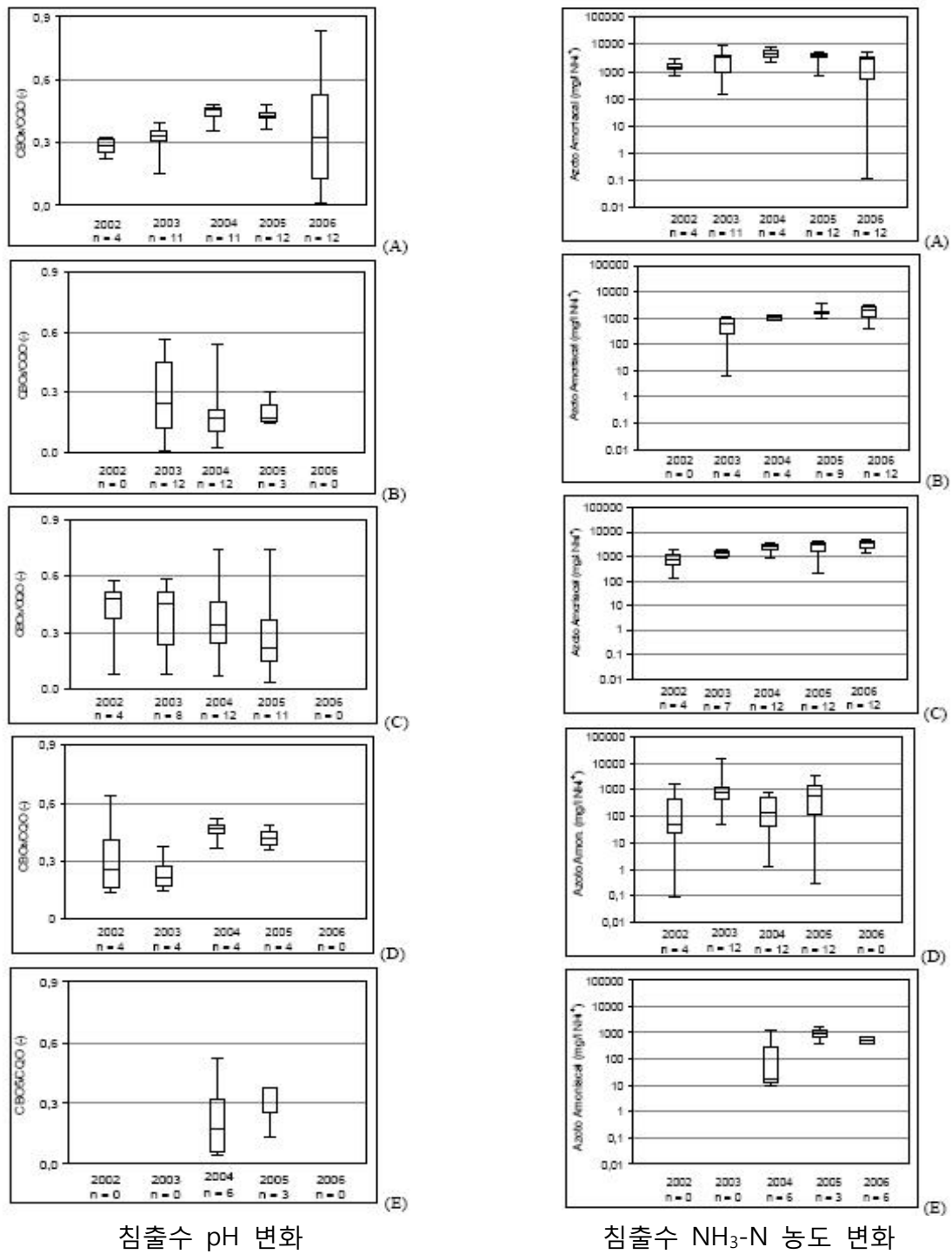
II 침출수 처리 분야



○ 침출수 생물학적 분해도(BOD_5/COD)는 최대 약 0.6 정도(매립지 2, 3)로 측정되었으며 시간 경과에 따라 중간값은 낮아지는 경향있음

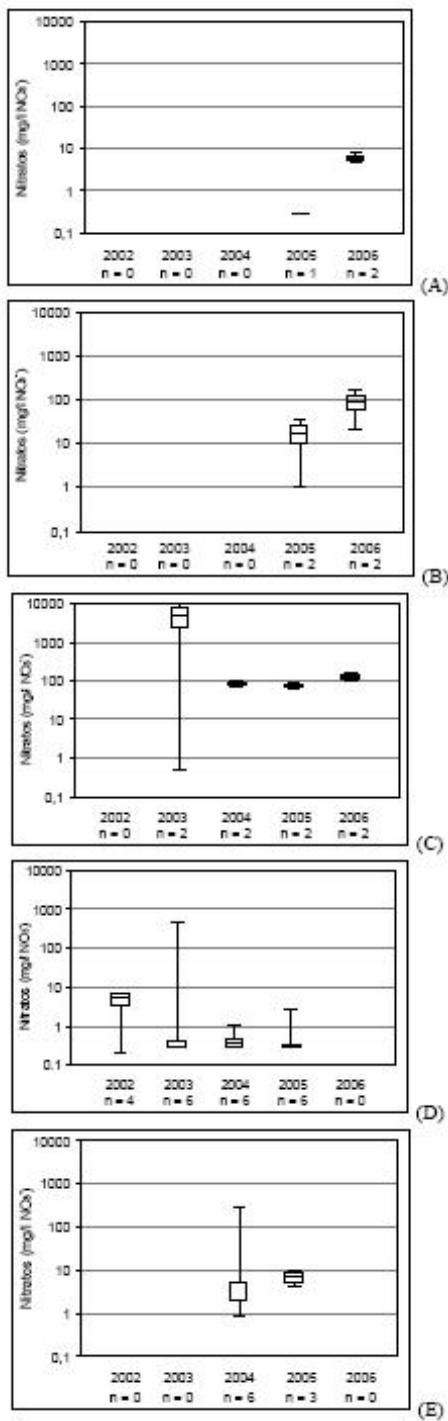
- 침출수 NH_3-N 최고 농도는 매립지 1, 2, 3에서 1,000~10,000 mg/L 농도 범위로 측정됨
- 침출수 NH_3-N 농도 3,000 mg/L 이상부터 혐기성 분해에서 생물학적 활성도가 저해되어 매립지 폐기물 분해와 침출수 처리 성능이 저하될 수 있음

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례

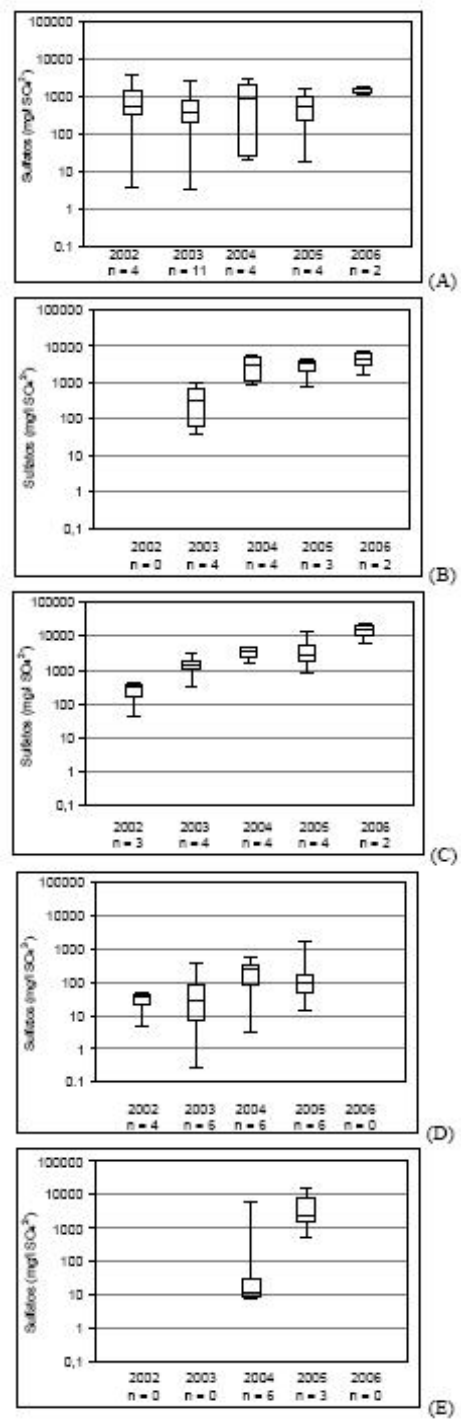


- 매립지 1, 2, 3에서는 높은 질산염 농도가 측정되었으나 대부분 100 mg/L 미만이고 시간 경과에 따라 낮아졌으며 매립지 4에서는 10 mg/L 미만으로 측정됨
- 매립지 1, 2, 3에서 황산염 농도 범위는 100~10,000 mg/L로 기존 문헌값 (100~2,000 mg/L)보다 높았고 증가되는 경향임
- 반면 RO 농축수가 재순환되지 않은 매립지 4의 황산염 농도는 10~1,000 mg/L 범위로 낮아 RO 농축수 매립지 재순환과 황산염 농도에 상관관계가 유추됨

II 침출수 처리 분야



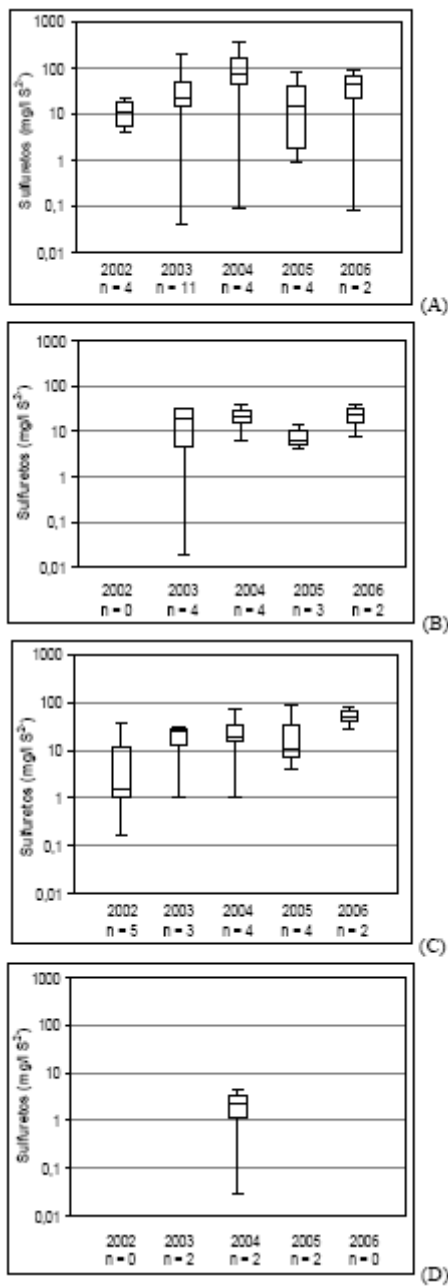
침출수 NO₃⁻ 농도 변화



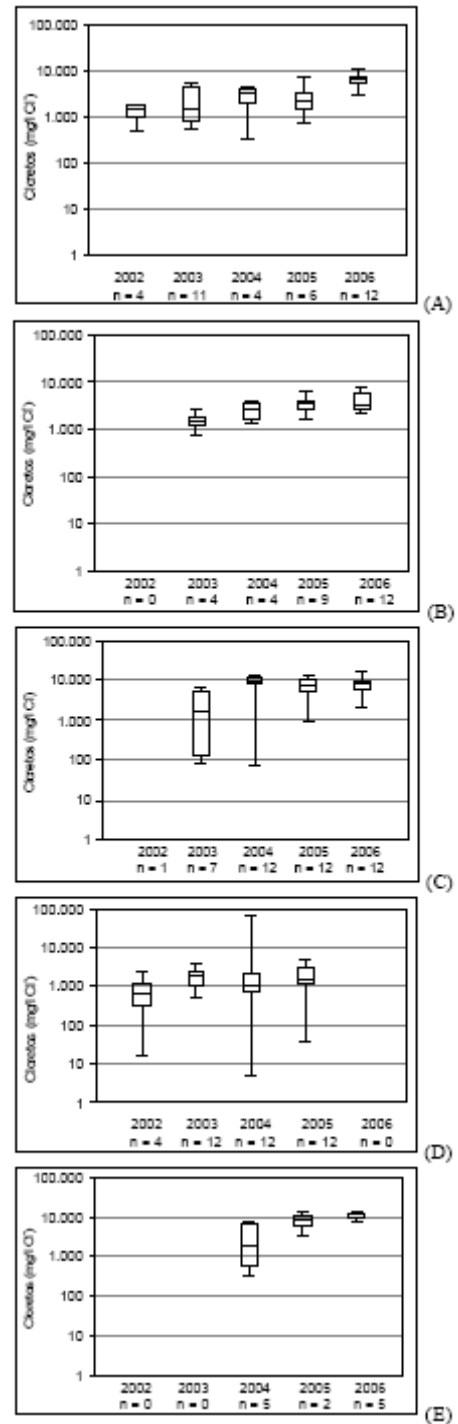
침출수 SO₄²⁻ 농도 변화

- 황화물(S²⁻, sulphides) 농도는 매립지 1(300 mg/L 이상), 3에서 높게 측정되었으며 매립지 4에서는 5 mg/L 이하로 낮게 측정됨
- 염화 이온 농도는 매립지 1, 2, 3, 5에서 1,000~10,000 mg/L 범위로 높게 측정되었으며 높아지는 경향임

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례



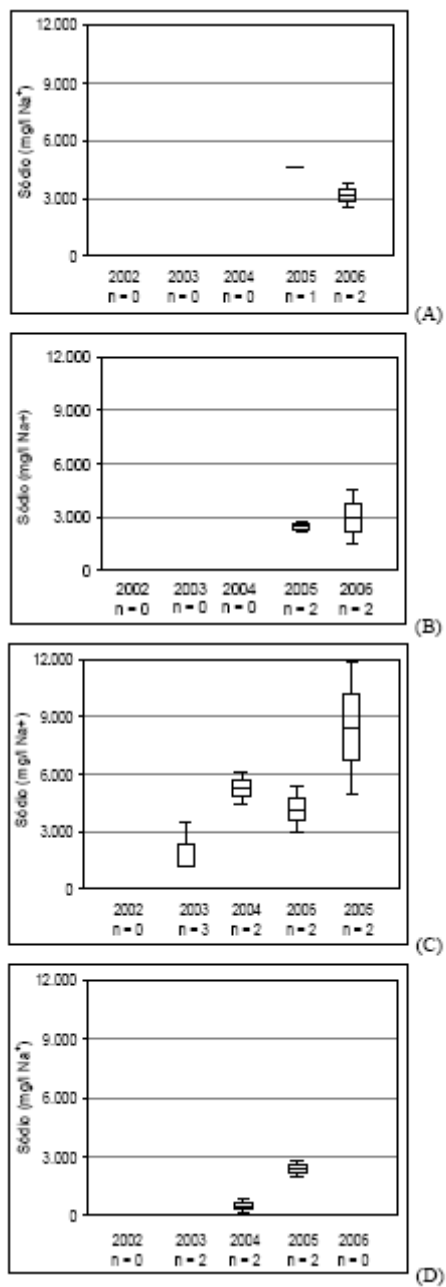
침출수 S²⁻ 농도 변화



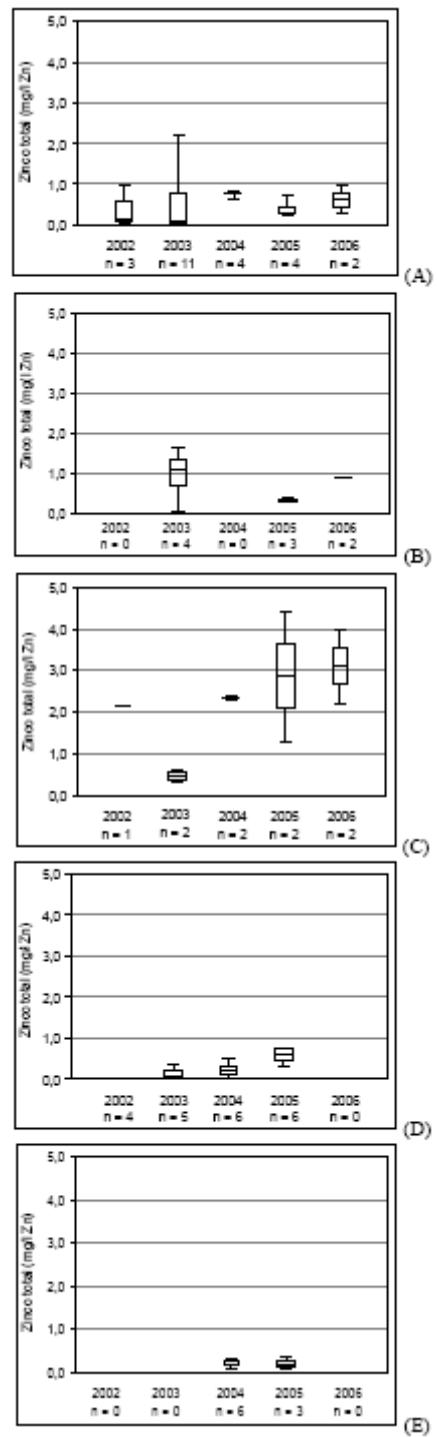
침출수 Cl⁻ 농도 변화

- 나트륨(Na⁺) 농도는 전체적으로 높아지고 있으며 매립지 3에서는 10,000 mg/L 이상 높았으나 매립지 4에서는 3,000 mg/L 미만으로 가장 낮게 측정됨
- 매립지 1, 2, 3에서 아연(zinc) 농도는 매립지 4에서 보다 높게 측정됨
- 위의 침출수 수질 분석 결과 나트륨, NH₃-N, 황화물 및 아연 농도가 높게 측정되어 혐기성 생물학적 활성도가 저해될 수 있음을 알 수 있음

II 침출수 처리 분야



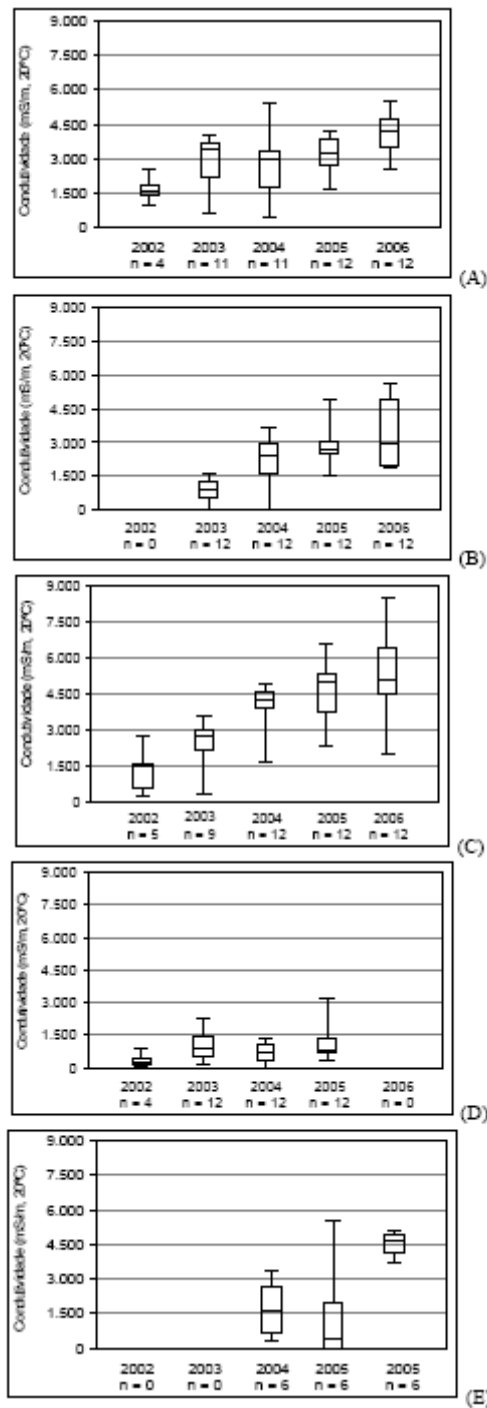
침출수 Na⁺ 농도 변화



침출수 아연 농도 변화

- 염(salt) 농도는 매립지 4(1,500 mS/m 미만)를 제외한 모든 매립지에서 증가되고 있음
- 매립지 3에서 전도도(2006년 6,000 mS/m 이상)는 매우 높고 점차 높아지고 있음
- RO 침출수 처리시스템 연구결과 전도도 10,000 mS/m가 시스템 운전조건 한계값임

2. 침출수 RO 농축수 재순환 사례



침출수 전도도 변화

- 일부 연구결과 RO 농축수 매립지 재순환시 매립가스 생산 증대 및 사후관리기간 단축 효과가 있으며 침출수 오염물 농도 변화는 미미하다고 보고 있음
 - 일부 실험실 연구결과에서는 수분 함량 및 질소화합물 농도가 규제 제한값을 초과하지 않음
- 침출수 매립지 재순환시 발생되는 침출수 염도 증가에 의한 폐기물의 혐기성, 호기성 생분해 영향을 조사하였음

II 침출수 처리 분야

- 생활폐기물 유기물의 무기화가 최적 혐기성 조건에서 가장 높았고 무기화가 침출수 염도 증가에 민감함을 알 수 있었음
- 염도가 0.8%에서 1.5% 정도(전기전도도 기준 1,250~2,344 mS/m)로 높아지면 혐기성 생물학적 분해도는 90% 저감됨
- 본 연구에서 침출수나 RO 농축수 재순환시 4개 매립지에서 유사한 문제가 발생되어 전기전도도 값이 중간값 기준 2,000~4,000 mS/m, 최대값 기준 5,500~8,500 mS/m로 측정됨
- 5개 매립지에 다른 침출수 처리 시스템이 적용되었으며 침출수 처리수의 수질은 다음 표와 같이 제시됨
- 처리 효율은 연간 농도 중간값으로 계산함
- 침출수 처리수 최대 허용 농도는 포르투갈 법적 기준보다 엄격한 IPPC (International Plant Protection Convention, 국제식물보호협약) 기준으로 제시됨
- 다음 표에 매립지 4에서 처리 효율이 마이너스를 나타내어 물리화학적 처리로 침출수 염이 제거되지 않음을 알 수 있음
- 이외 처리 효율은 높아 일부 질소화합물 농도를 제외하고 배출 기준이 준수됨을 알 수 있음

< 포르투갈 5개 위생매립지 침출수 처리 성능(2002~2006년 기준) >

수질	배출한계 (mg/L)	매립지1		매립지2		매립지3		매립지4		매립지5	
		처리 효율	배출수 농도	처리 효율	배출수 농도	처리 효율	배출수 농도	처리 효율	배출수 농도	처리 효율	배출수 농도
COD	125 ^a / 150 ^b	99.6	39.0	98.2	37.0	99.3	36.0	93.9	67.0	98.5	20.0
BOD ₅	25 ^a /40 ^b	99.6	18.0	98.3	6.0	99.5	4.0	96.1	22.0	97.7	5.0
NH ₃ -N	10	99.6	12.5	98.3	16.0	99.4	6.7	83.3	5.2	71.9	19.0
총질소	15	99.6	12.3	98.2	16.0	99.3	7.1	21.9	9.8	62.1	27.0
SO ₄ ²⁻	2000	96.9	19.5	98.1	8.0	98.2	1.0	-83.9	1000	59.8	11.0
S ²⁻	1.0	99.7	0.04	91.4	1.0	83.0	2.0	49.3	0.03	-	1.0
Cl ⁻	NA	NA	NA	NA	NA	90.9	305.0	-39.4	1650	97.8	59.0

^a 매립지 1, 3, 4 배출한계

^b 매립지 2, 5 배출한계

- 위 결과로부터 생물학적 처리(활성슬러지법, 포기산화지)와 RO 처리를 결합한 공정이 침출수 처리에 적절함을 알 수 있음
- 침출수 중 염도 및 NH₃-N에 의해 생물학적 처리시 미생물 활동이 저하되고 RO 멤브레인 부착물 형성으로 인해 폐수 침출수 처리 시스템 성능이 저하될 수 있음

○ 다음 표는 5개 매립지 침출수 처리수 수질의 연간 평균값, 중간값, 최소값, 최대값을 나타냄

- 침출수 처리수 중 오염물 농도가 높아 배출수 배출한계를 초과하는 경우가 있음
- 질소화합물($\text{NH}_3\text{-N}$)은 샘플의 46%, COD는 샘플의 11%, BOD_5 는 샘플의 21%가 배출수 배출한계값을 초과함
- BOD_5/COD 비율의 변화가 0.01에서 1로 커서 침출수 처리 시스템의 성능에 어려움이 예상됨

< 침출수 처리수 수질 농도 범위(2002-2006년 기준) >

수질 항목	평균	범위	시료수	배출한계 초과 샘플(%)
pH	6.8	4.4~9.0	360	28.3
전도도	324	0.00~1800	59	-
COD	60	6.0~412	360	10.8
BOD_5	15	1.0~233	359	20.9
BOD_5/COD	0.29	0.01~1.0	359	-
TOC	15	0.50~61	48	-
TSS	7.4	0.00~72	361	0.9
TDS	5544	0.68~123,000	50	-
$\text{NH}_3\text{-N}$	21	0.03~500	162	46.4
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	5.5	0.30~97	102	2.6
총질소	94	0.80~5,000	165	47.5
SO_4^{2-}	279	1.0~10,886	181	2.0
SO_3^{2-}	1.9	0.30~45	48	21.6
S^{2-}	2.3	0.02~108	177	21.3
총인	2.3	0.02~110	183	3.3
총철(total Fe)	0.59	0.025~8.2	150	4.9
CN^-	0.49	0.005~69	140	0.7
페놀	0.12	0.001~1.0	176	1.9
니켈	0.28	0.003~24	171	0.5

○ 포르투갈 5개 위생매립지에서 실시한 침출수 연구결과 RO 농축수가 매립지에 재순환된 경우(매립지 1, 2, 3, 5) COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, 황산염, 염소이온, 전도도가 문헌 예상값보다 많이 높음

- 매립지에 RO 농축수를 재순환함으로 침출수 오염물 부하량이 높아져 문제가 됨

II 침출수 처리 분야

- RO 농축수를 증발농축으로 처리할 수 있지만 RO 농축수 재순환에 대한 장단점 및 사례에 대한 더 많은 평가가 필수적임
 - 침출수 처리 시설의 처리효율은 일부 충분하지 못해 배출수 농도가 배출기준을 초과하여 측정됨
 - 특히 질소화합물, 황화합물, 유기물 농도가 높음
 - 침출수 처리 공정으로 생물학적 처리와 RO 처리 시스템이 결합된 경우 처리효율이 높게 나타남

3 침출수 RO 농축수 매립지 재순환 실험연구

3-1. 침출수 RO 농축수 재순환 기존 연구⁴⁾

- RO 멤브레인 침출수 처리는 99% 이상 제거효율이 높아 처리 마지막 단계나 제한된 경우 적용될 수 있음
 - RO 처리로 투과수 80% 회수시 5 kW/h/m³ 전력이 소요됨
 - RO 처리 단점으로 멤브레인에 부착물이 형성되고 농축수 처리가 필요함
 - 멤브레인 사용기한은 침출수 전처리에 따라 달라짐
- 침출수 RO 농축수는 재사용, 소각, 오염물 제거, 배출(지하수, 지표수) 및 매립 등으로 처리할 수 있음
 - 이외 RO 농축수 고화(비산재, 슬러지 혼합) 및 매립지 재순환(폐기물 분해 촉진)이 적용되고 있음
 - RO 농축수 매립지 재순환 처리 방법은 낮은 처리 비용으로 근래 적용되고 있음
- RO 농축수를 매립지에 재순환함으로 폐기물에 수분이 공급되어 분해가 촉진될 수 있으나 생분해되지 않는 오염물이 축적되어 농도가 높아질 수 있음
 - 일부 연구결과에 의하면 RO 농축수 재순환이 장기간 관점에서 적합하지 않다고 보고되고 있음
- RO 농축수를 매립지에 재순환함으로 유기물, 무기물이 산화물로 분해되고, 중금속이 유기물이나 진흙에 흡착되고, 결정화되어 불용성염이 형성되며 탄산염, 황화물, 황산염이 형성됨
- 이탈리아 Fosseto 매립지 현장에서 RO 농축수 재순환 실험이 수행됨
 - 1988년 매립이 시작되어 폐기물 전처리 후 매립되는 매립지임(100만 m³ 규모)
 - 매립지 일부를 분리하고 재순환 시스템을 구축하여 RO 농축수를 재순환함
 - 농축수 재순환으로 침출수 발생량이 증가되지 않고 매립지에 확산됨
 - 침출수 Ni, COD, Zn 농도는 높아졌으나 암모니아와 염소이온은 유기물에 흡착되어 희석됨
 - 바이오가스 생산량은 감소됨
- 독일 Wischhafen 매립지에 RO 농축수 재순환 영향이 평가됨
 - RO 농축수 매립지 재순환으로 COD, 암모니아 농도 및 전기전도도가 높아짐
 - 침출수 염도(salinity) 증가로 삼투압이 높아져 RO 멤브레인 운전압력이 높아짐

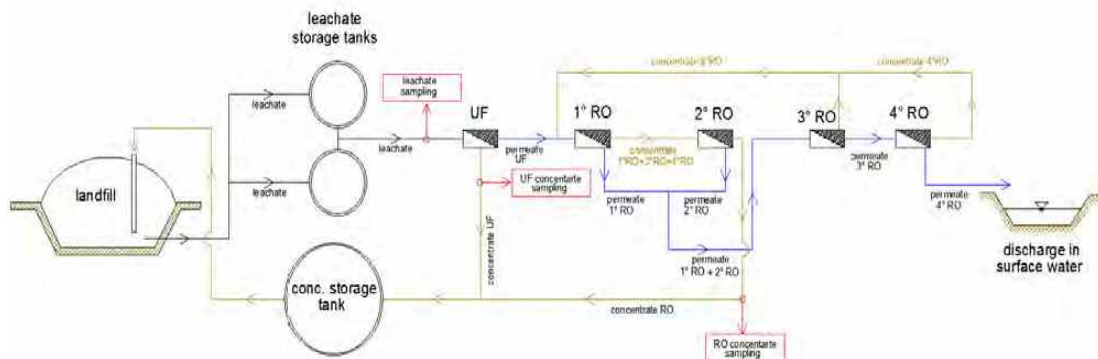
4. 'Reinjection of leachate reverse osmosis concentrate in the landfill body', Master Thesis, Enrico Scantamburlo, University of Padova, 2014-2015

II 침술수 처리 분야

- RO 운전압력이 높아지면 에너지 소비가 높아지므로 경제성이 확보될 때까지만 RO 플랜트가 운영될 수 있음
 - 침출수 고형물, 염 농도가 높아지면 멤브레인 부착물 생성이 촉진되어 산세척이나 역세척 주기가 단축됨
 - RO 멤브레인의 과도한 화학적 세척으로 멤브레인 수명이 단축되고 효율이 저하될 수 있음
- 실험실 규모 연구에서 침출수 농축수 재순환으로 폐기물 분해가 촉진되고 금속 이온이 메탄 생성 박테리아에 흡수된다고 보고됨
- 실제로 혐기성 소화조에 Ni^{2+} , Co^{2+} 주입으로 메탄생성율이 높아질 수 있음

3-2. RO 농축수 개요⁴⁾

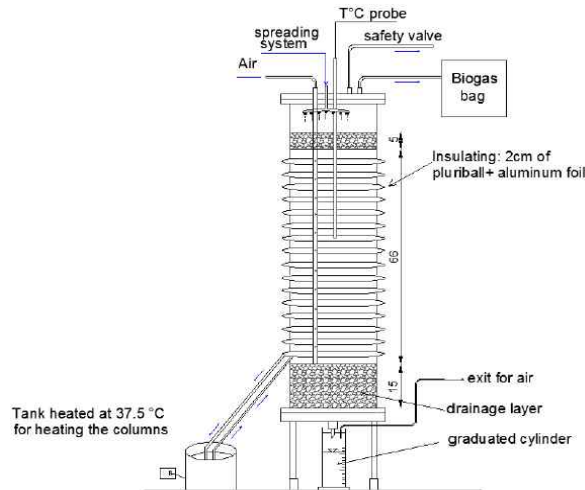
- RO 농축수 재순환 실험결과 바이오가스 생산량이 높아지나 암모니아 가스 생성 촉진
 - RO 농축수 재순환으로 염소이온 및 암모니아가 폐기물에 축적되는 것으로 관측됨
- 이탈리아 Sarcedo 매립지에 RO 농축수를 사용하여 실험함
 - Sarcedo 매립지(500,000 m³)는 1990년도 매립이 시작되어 약 10년 전(2005년 경)에 매립이 종료됨
 - 침출수 처리를 위해 2012년 RO 모듈이 설치되어 사용되고 있음
- 침출수를 균등화 탱크에서 균질화한 후 UF 멤브레인으로 전처리하여 특정 물질 제거
 - UF 농축액은 저장 탱크에 저장하고 UF 투과수는 RO 멤브레인으로 처리함
 - RO 1, 2단계에서 처리된 투과수는 3단계에서 처리되고 3단계 투과수는 4단계 RO로 다시 처리하여 붕소를 완벽히 제거함
- 3단계, 4단계 RO 모듈에서 발생한 농축액은 RO 1단계로 반송하여 처리함
 - 최종 RO 투과수는 인근 수로로 방출하고 2단계 RO 모듈 농축수는 저장 탱크에 보냄
 - 생성된 UF, RO 농축액은 저장탱크에서 혼합 후 매립지에 주입함
 - 혼합액은 UF 농축액 20~25%, RO 농축액 75~80%로 구성됨
 - 전체 생성된 침출수 농축액은 전체 침출수 유입량의 25~30% 정도임



이탈리아 Sarcedo 매립지 침출수 RO 처리 흐름도

3-3. 실험 방법⁴⁾

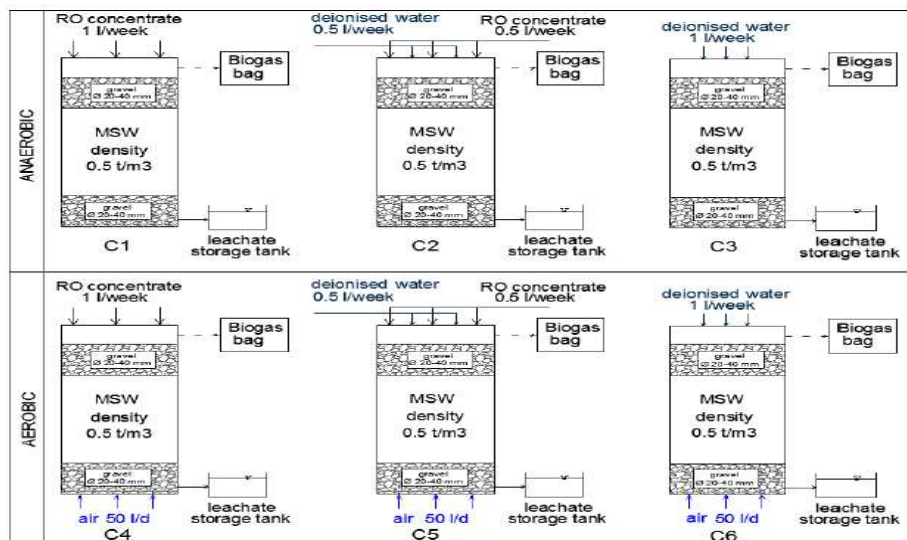
- 약 100 kg 생활폐기물을 파쇄, 스크린하여 40 mm 이상 폐기물을 선별하여 실험함
- 테스트를 위해 6개 투명유리 칼럼을 사용하고 각 칼럼에 14.7 kg 폐기물을 주입함
- RO 농축수 주입전 초순수물 5 L를 주입하여 폐기물 수분을 33%에서 50%로 높여 침출수가 1~2 L 생성됨
- 생성된 침출수는 7일 동안 수동으로 재순환하여 실제 매립지를 모사함



칼럼 구성도

< 6개 칼럼 주입 조건 >

		주입 조건	폭기 조건
혐기성 조건	C1	100% RO 농축수	0 L/일
	C2	50% RO 농축수 + 50% 물	0 L/일
	C3	100% 물	0 L/일
호기성 조건	C4	100% RO 농축수	50 L/일
	C5	50% RO 농축수 + 50% 물	50 L/일
	C6	100% 물	50 L/일



6개 칼럼 주입 흐름도

II 침출수 처리 분야

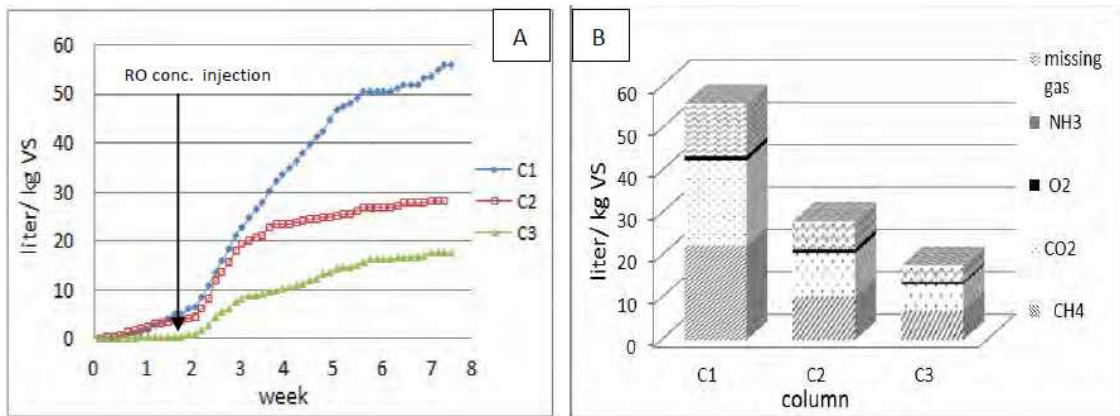
- 칼럼 3개는 혐기성 조건이고 3개는 호기성 조건으로 운전됨
 - RO 농축수 주입량을 50%, 100%로 달리하여 주입하고 침출수는 매일 포집하여 pH, 전기전도도를 측정함
 - 침출수를 6개 용기에 저장하여 주 단위로 pH, 전도도, COD, NH_4^+ , TKN, Cl^- 을 분석함
 - 2주 단위로 TOC, TC를 분석하였고 BOD는 생물학적 분해 공정을 제어하기 위해 비정기적으로 분석함
- 침출수와 농축수 수질은 다음과 같음
 - 침출수 pH는 7.85 정도로 중성 또는 약알칼리성으로 메탄생성 조건이 형성되었음
 - 침출수 유기물 농도는 매우 낮고 NH_4^+ (암모니아), TKN(총킬달질소) 농도는 비슷하여 모든 질소가 암모니아로 환원되었음
- 농축수는 생물학적 분해가능량이 적은 용액으로 고분자 화합물 및 생물학적 분해 불가능한 화합물이 멤브레인에 의해 대부분 제거되어 농축수에 축적됨
 - RO 농축수 염(salts), Cl^- , TS, VS, NH_4^+ 농도가 높아 RO 멤브레인 제거율이 높음
 - RO 플랜트의 COD 제거율은 90% 이상이고, 암모니아 제거율은 98.5% 이상, TS 제거율은 98% 이상임

< 침출수, UF 농축수, RO 농축수 수질 농도 >

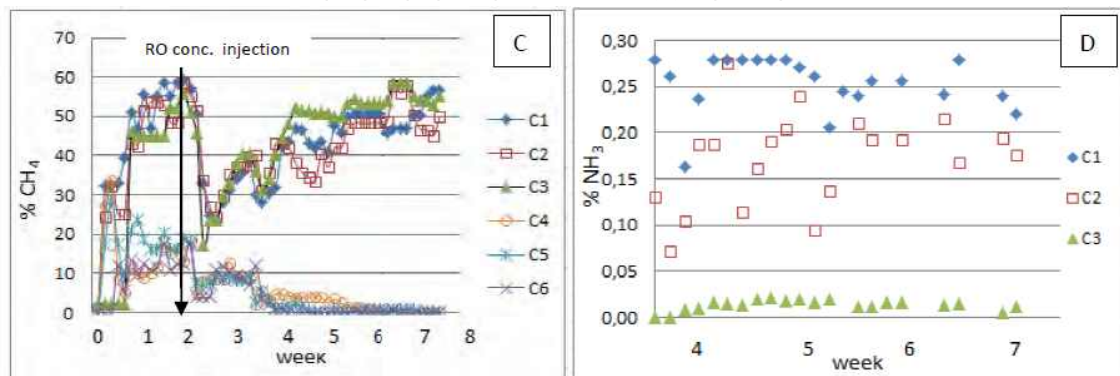
	침출수	UF 농축수	RO 농축수	이탈리아 법 규정	제거율(%)
pH	7.85	7.94	7.52		
전도도(mS/cm)	12.88	12.94	27.8		
COD(mg O_2/l)	1,591	1,994	2,198	160	>90
TC(mg C/l)	1,740	1,810	2,340		
TOC(mg C/l)	374	433	719		
NH_4^+ (mg N/l)	1,122	1,108	2,388	15	>98.5
TKN(mg N/l)	1,169	1,207	2,571		
Cl^- (mg Cl^-/l)	855	488	1,823	1,200	
TS(mg/l)	4,750	5,240	15,355	80	>98
VS(mg/l)	1,035	1,438	4,048		
% H_2O	99.53	99.48	98.47		

3-4. 실험방법⁴⁾

- 혐기성 조건 칼럼 C1, C2의 바이오가스 생산량은 20일까지 비슷하고 10~15일 후 가스 발생속도가 높아짐
 - C1 칼럼에서 바이오가스 생산량이 C2보다 2배 이상, C3보다 3배 이상 높아짐
 - 농축수 주입으로 폐기물 중 영양분 확산이 촉진되어 박테리아 활성 및 분해 속도가 높아짐
- 바이오가스 중 CH₄/CO₂ 비율은 일정하여 농축수에 의한 메탄생성 박테리아의 저해는 없음
 - 바이오가스 중 암모니아 농도는 주입된 농축수 양에 따라 달라짐
 - 황화수소(H₂S) 농도는 1,230 ppm 이상으로 높아 기기로 측정되지 못함



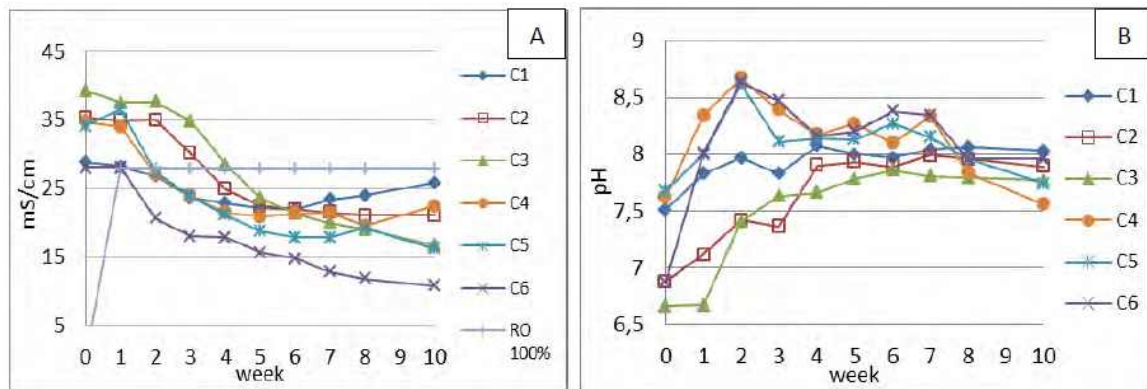
< 누적 바이오가스 생산량 및 가스 구성 >



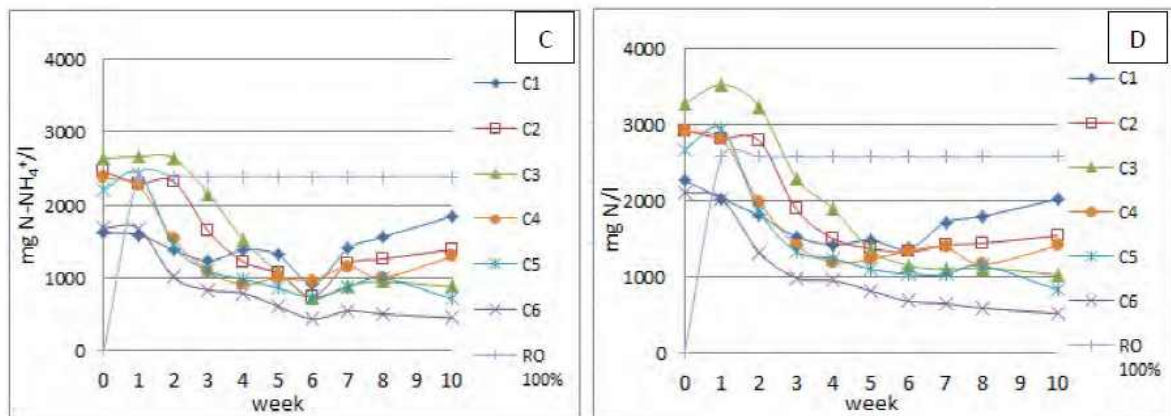
< 바이오가스 중 메탄 분율(%) 및 암모니아 농도 >

- 초기 단계 후 전기전도도는 모든 칼럼에서 유사하게 나타남
 - 물만을 주입한 C3, C6에서는 전기전도도가 지속적으로 감소됨
 - C2, C4, C5에서는 6주 후 정적인 상태에 도달하였으나 C1에서는 높아짐
 - RO 농축수 100% 주입시 호기성 조건에서 전기전도도가 혐기성 조건에서 보다 약간 낮아짐
 - C1과 C3, C4와 C6 비교시 RO 농축수 재순환으로 인해 침출수에 염이 축적됨

II 침출수 처리 분야



침출수 전기전도도 및 pH 변화



침출수 암모니아 및 총킬달질소 농도변화

- 암모니아와 총킬달질소 변화 경향은 모든 칼럼에서 비슷함
 - 호기성 조건 칼럼 C4, C5, C6에서는 암모니아와 총킬달질소가 급격히 감소 후 일정하게 유지됨
 - 혐기성 조건에서는 침출수 암모니아 농도가 안정화된 후 높아지면서 바이오가스 생산량이 감소됨
 - 이는 미생물 활성도 저감을 의미하며 7주 후부터 바이오가스 생산량이 거의 없음
- 칼럼 C1에서 암모니아 농도는 칼럼 C2에서 보다 농축수 주입량이 2배로 많아 더 빨리 높아짐
 - 칼럼 C1, C3 비교시 RO 농축수 주입으로 암모니아가 매립지에 축적됨
 - 암모니아 제거를 위한 최적 방법은 폭기임
- 총킬달질소는 유기물 분해, 가수분해 및 세척으로 저감됨
 - 호기성 칼럼에서 암모니아 농도가 낮은 것은 질산·탈질에 기인함
 - 호기성 칼럼에서 NO₂는 검출되지 않았으나 20 mg/L 미만 NO₃가 측정됨
 - 100% RO 농축수가 주입된 혐기성 칼럼에서 암모니아 농도가 높아 폭기로 분자 질소로 환원하여 처리 할 수 있음

○ 부분적 질소 물질수지가 다음과 같이 제시됨

- 주입량은 농축수 질소 함량과 폐기물 질소 함량이고, 유출량은 침출수 질소와 바이오가스 질소임
- 칼럼 C1, C4에서 질소 축적은 100% 농축수 주입이 원인임
- 호기성 칼럼에서 질소 축적은 탈질로 제거된 질소 축적이 가능하지 않기 때문임
- 이로인해 C3(혐기성 조건)에서 질소 축적량이 C6(호기성 조건)에서 질소 축적량보다 적음

< 질소 물질 수지 >

칼럼	RO 농축수 mg N/kg TS	침출수 mg N/kg TS	가스 mg N/kg TS	폐기물 mg N/kg TS	축적량 mg N/kg TS
C1	1,932	1,409	38	11,769	8,370
C2	966	1,405	6	11,769	7,440
C3	0	1,305	1	11,769	6,579
C4	1,932	1,072	0	11,769	8,745
C5	966	968	0	11,769	7,883
C6	0	681	0	11,769	7,204

< 질소 물질 수지 비율 >

칼럼	RO 농축수 %N, +	침출수 %N, -	가스 %N, -	폐기물 %N, +	축적량 %
C1	16.4	12.0	0.3	100.0	104.1
C2	8.2	11.9	0.1	100.0	96.2
C3	0.0	11.1	0.0	100.0	88.9
C4	16.4	9.1	0.0	100.0	107.3
C5	8.2	8.2	0.0	100.0	100.0
C6	0.0	5.8	0.0	100.0	94.2

< 농축수 주입 전후 침출수 BOD₅/COD 변화 >

칼럼	BOD ₅ /COD 농축수 주입 전	BOD ₅ /COD 농축수 주입 후
C1	0.52	0.12
C2	0.51	0.27
C3	0.58	0.51
C4	0.58	0.17
C5	0.49	0.23
C6	0.42	0.06

II 침출수 처리 분야

- 모든 칼럼에서 초기 침출수 COD 농도는 38,000~82,000 mg/L 정도로 초기 이후 폐기물 세척 및 생물학적 분해로 급격히 감소됨
 - COD 저감속도가 낮아져 6주 동안 3,300~9,900 mg/L 정도로 유지됨
 - COD 농도가 높아 농축수 주입 영향 평가가 어려움
- 초기 BOD₅/COD 농도 비교시 호기성 조건에서 물만 주입된 칼럼 6에서 지속적으로 낮아짐
 - 호기성 조건에서 농축수가 주입된 C4(농축수 100%), C5(농축수 50%)에서 BOD₅/COD 비는 큰 차이 없음
 - BOD 농도는 농축수 재순환 실험 전후에 측정하여 93~99% 제거됨
 - 초기 평균 BOD₅/COD 비는 0.5~0.6에서 9주 후 0.06~0.5로 낮아짐
- 부분적인 탄소 물질 수지가 다음 표와 같이 제시됨
 - 유입량은 농축수 탄소 함량과 폐기물 탄소 함량이고 유출량은 침출수 및 바이오가스임
 - 실험 2개월 후 탄소 축적량은 여전히 높고 칼럼 C1에서 탄소 축적량은 바이오가스 생산량이 높아 칼럼 C2, C3 보다 약간 낮음
 - 칼럼 C1, C2, C3에서 바이오가스에 의해 제거된 탄소량은 침출수에 의해 제거된 탄소량보다 많음

< 탄소 물질 수지 >

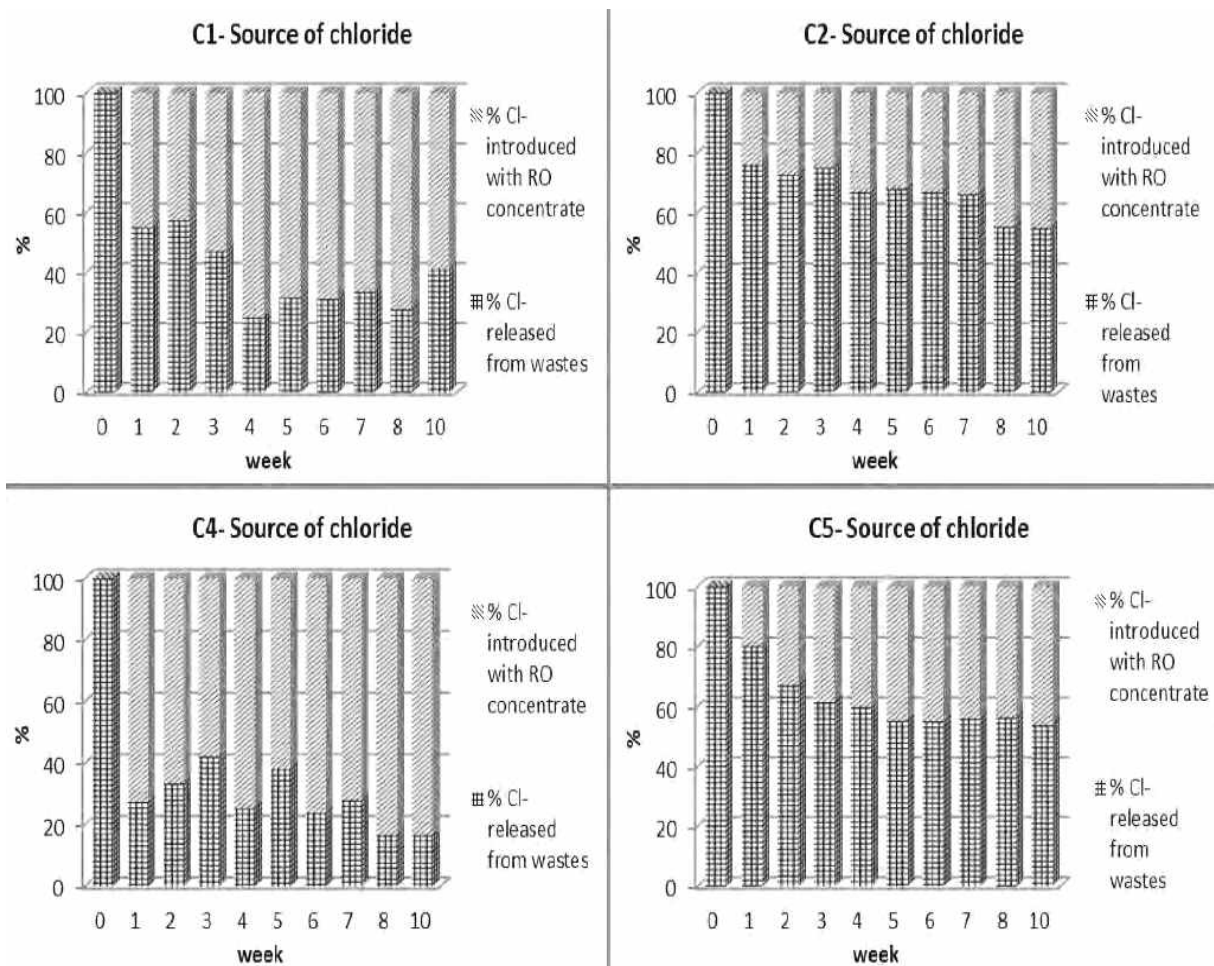
칼럼	RO 농축수 g /kg TS	가스 g C/kg TS	침출수 g C/kg TS	폐기물 g C/kg TS	축적량 g C/kg TS
C1	1.758	18.41	6.328	6,468	6,445.02
C2	0.879	9.08	7.91	6,468	6,451.89
C3	0	5.88	7.34	6,468	6,454.78
C4	1.758	14.24	5.282	6,468	6,450.23
C5	0.879	9.79	4.232	6,468	6,454.86
C6	0	15.03	2.926	6,468	6,450.05

< 탄소 물질 수지 비율 >

칼럼	RO 농축수 %C, +	침출수 %C, -	가스 %C, -	폐기물 %C, +	축적량 %
C1	0.03	0.10	0.28	100.0	99.6
C2	0.01	0.12	0.14	100.0	99.8
C3	0.00	0.11	0.09	100.0	99.8
C4	0.03	0.08	0.22	100.0	99.7
C5	0.01	0.07	0.15	100.0	99.8
C6	0.00	0.05	0.23	100.0	99.7

○ 침출수 염소이온 농도는 시간 경과에 따라 감소됨

- 혐기성 조건 칼럼 C1, C2, C3에서는 3주째 Cl⁻ 농도가 최고로 높아진 후 점차로 감소됨
- 호기성 칼럼에서 염소이온은 혐기성 칼럼에서보다 낮음
- 농축수가 주입되지 않은 C3, C6 칼럼에서 염소이온 농도는 지속적으로 낮아짐
- 반면 C1, C4(100% 농축수 주입), C2, C5(50% 농축수 주입) 칼럼에서는 염소이온 농도가 일정하게 유지됨
- 농축수로 주입된 염소이온이 침출수로 유출되었음



총염소 유출량에 대한 RO 농축수 및 폐기물 기여 비율

○ 이론적으로 장기적인 관점에서 농축수로 주입된 모든 염소량은 유출된 염소량과 같아야 함

- 부분적인 염소 물질수지가 다음 표와 같이 제시됨
- RO 농축수와 폐기물에서 염소량은 주입량이고 침출수 염소가 유출량임
- 염소 물질 수지 비율에서 칼럼 내 염소 축적이 100% RO 농축수 주입시 가장 높음

II 침출수 처리 분야

< 염소 물질 수지 >

칼럼	RO 농축수 mg Cl ⁻ /kg TS	침출수 mg Cl ⁻ /kg TS	폐기물 mg Cl ⁻ /kg TS	축적량 mg Cl ⁻ /kg TS
C1	1,370	2,623	3,239	1,986
C2	685	2,448	3,239	1,476
C3	0	2,213	3,239	1,026
C4	1,370	2,144	3,239	2,465
C5	685	1,903	3,239	2,021
C6	0	1,611	3,239	1,628

< 염소 물질 수지 비율 >

칼럼	RO 농축수 %Cl ⁻ , +	침출수 %Cl ⁻ , -	폐기물 %Cl ⁻ , +	칼럼 잔류량 %
C1	42.30	80.98	100.0	61.3
C2	21.15	75.58	100.0	45.6
C3	0.00	68.32	100.0	31.7
C4	42.30	66.19	100.0	76.1
C5	21.15	58.75	100.0	62.4
C6	0.00	49.74	100.0	50.3

○ 다음 표는 각 칼럼에서 주단위 수분 함량을 나타냄

- 약 50%의 수분을 유지하기 위해 매주 1 L의 액체가 주입됨

< 칼럼별 평균 수분 함량 >

	C1 수분(%)	C2 수분(%)	C3 수분(%)	C4 수분(%)	C5 수분(%)	C6 수분(%)
초기수분	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
1주	47.0	48.4	50.5	48.4	49.8	48.8
10주	48.0	48.9	52.9	52.1	51.9	51.7

3-5. 결론⁴⁾

○ 침출수 RO 처리는 제거 효율이 높은 기술이나 RO 농축수 처리는 환경적으로나 경제적으로 문제가 됨

- RO 농축수 처리 방법 중 하나인 RO 농축수 매립지 재순환의 영향을 평가함
- 10주간 칼럼 실험결과 농축수 주입으로 폐기물 내 유해물질이 축적됨
- 암모니아 농도는 6주까지 감소되다가 6주 이후 높아지기 시작함
- 100% 농축수 주입시 바이오가스 내 가스상 암모니아 농도는 2,700 ppm까지 높게 측정됨

- 농축수 주입으로 메탄생성 박테리아 활성도가 저해되지 않아 바이오가스 내 CH_4/CO_2 비율이 변화되지 않고 바이오가스 생산량이 높아짐
 - 농축수가 주입된 칼럼에서 폐기물 내 탄소 축적은 약간 낮고 바이오가스 생산량은 높았음
 - BOD_5/COD 비율에서 농축수 주입으로 침출수 생물학적 안정도가 높아짐
- 결론적으로 농축수 재순환으로 생물학적 활성도가 높아져 폐기물 분해가 촉진되어 매립지 사후관리 기간이 단축될 수 있음
 - 반면 100% 농축수가 주입된 칼럼에서 염소이온 축적이 높아 RO 농축수 주입으로 침출수 염이 축적됨
 - 향후 장기적인 관점에서 RO 농축수 주입에 따른 영향 평가가 필요함

참고문헌

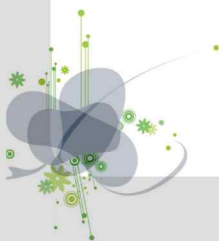
1. 'Leachate Pre-Treatment Using Reverse Osmosis', Peter Baker, P.E. Seneca Meadows, Inc.
2. 'Reverse Osmosis-Based Leachate Treatment System at a New York Landfill', Patrick Stanford(Rochem), Peter Baker(Seneca Meadows Landfill), May 23 2012
3. 'Assessment study on the leachate management options in five municipal solid waste landfill facilities', Marta Alexandra Ribeiro Pedroso, Instituto Superior Técnico 2007
4. 'Reinjection of leachate reverse osmosis concentrate in the landfill body', Master Thesis, Enrico Scantamburlo, University of Padova, 2014-2015



자원화 분야



1. SRF 시설 국외 사례



세부목차

1. 벨기에 IOK MBT 시설	123
2. 영국 런던 Southwark MBT 시설	126
3. 독일 Dresden MBT 시설	129
4. 이탈리아 Montanaso MBT 시설	131
5. 독일 Rügen MBT 시설	133
6. 영국 MBT 플랜트 사례	135
7. 독일 MBT 플랜트 사례	137
참고문헌	142

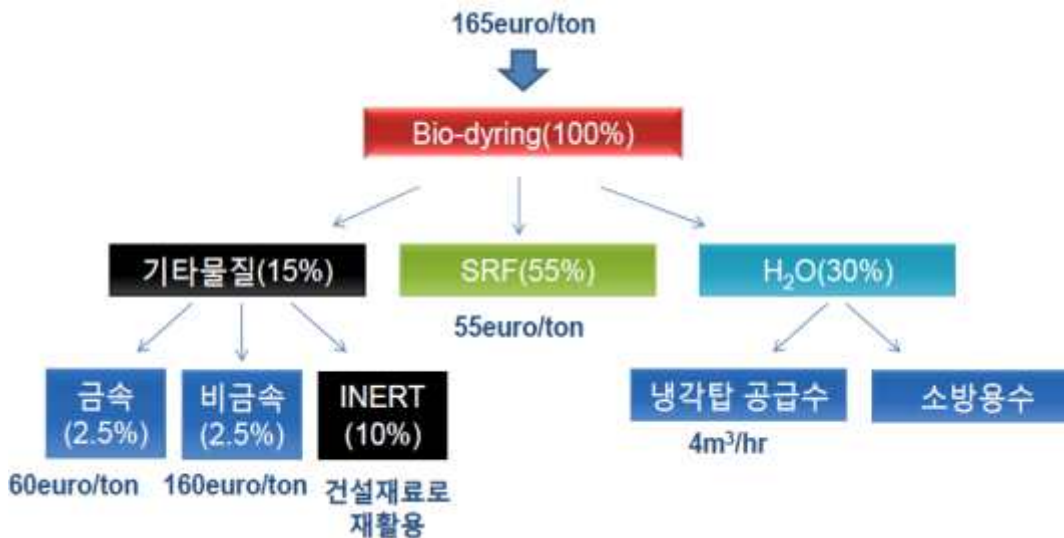
1 벨기에 IOK MBT 시설

□ 시설개요¹⁾

- 위치 : 벨기에 Eindhoutseheide
- 시설형태 : MBT(Mechanical Biological treatment)
- 대상 폐기물 : 생활폐기물, 사업장폐기물
- 규모 : 150,000톤/년(생활 : 90,000톤/년, 사업장 : 60,000톤/년)
- 가동개시 : 2006년

□ 시설의 주요사항

- 반입폐기물 중 음식물류폐기물 등 약 35%정도의 유기물 포함
※ 정원폐기물 등은 별도 수거하여 재활용되며 본 시설에 반입되지 않음
- 사업비는 33백만유로(약 450억원)가 소요되었으며, 재원은 EU, 지방정부, 민간 사업자가 공동으로 조달·건설
- 반입된 폐기물 100%를 생물학적 건조 후 선별하여 SRF 생산



< 벨기에 IOK MBT 플랜트 물질수지 >

- 바이오드라이닝 시설 주요 특징
 - 적용 공법 : 독일 Herhof 방식(콘크리트 터널형)
 - 운전기간 : 7일

1. '산자부『저품질 혼합폐기물의 연료화를 통한 열에너지 생산기술』연구과제 관련 국외출장 결과 보고', SL공사, 윤수경(2015.9)

III 자원화 분야

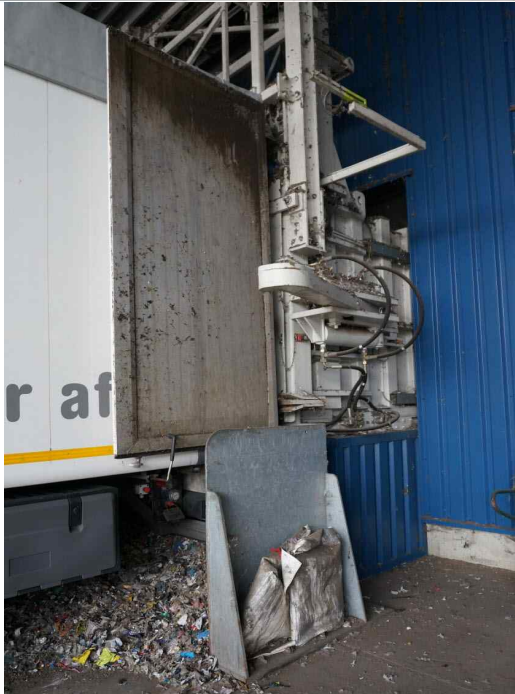
- 규모 및 개수 : 5 m×5 m×30 m, 13개(1개조는 여유분)
- 송풍량 : 13,000~17,000m³/hr(약 1.5 L/VS · kg/min)
- 송풍방향 : 양압
- 온도 : 최초 55℃까지 도달하도록 공기주입, 이후 48℃ 유지
- 수분 : 반입폐기물 45% → 건조후 폐기물 15~20%
- 모니터링 항목 : 무게, 온도관찰을 통해 송풍량 및 바이오드라이닝 종료시기 확인(조정)
- 바이오드라이닝 터널바닥에는 무게측정설비(로드셀)가 설치됨
- 반응기 내부 공기순환 및 열교환 통해 응축수 배출 · 수집
- 발생 분진 포집해 필터처리 후 공기는 재순환, 분진은 압축해 SRF로 활용
- 응축수는 별도 수처리(호기, 혐기공정)를 거쳐 냉각 용수 및 소방용수, 청소수 등으로 활용되고 있음
- 건조 폐기물은 기계적 선별 거쳐 SRF로 생산
- 생산 SRF특성
 - 형태: Fluff 타입(pellet 타입으로도 생산가능)
 - 발열량 : 16,000~17,000 MJ/ton (3,800~4,050 kcal/kg)
- 시설내 강한 음압을 통한 외부 악취누출 최소화로 시설주변에서 악취 거의 확인되지 않음
- 악취 포집 후 800~850℃로 연소(RTO 적용)

□ 시사점

- 대규모 상용시설에 바이오드라이닝 기술 적용(사전 건조)통해 SRF 수율을 55%까지 높게 달성함을 확인함에 따라, SRF생산시설에 생물학적 건조시설 적용이 매우 유용한 것으로 판단됨
- 미생물 활동을 이용하여 저비용으로 폐기물을 건조함으로써, 후속 공정의 선별율을 높임
- Bio-drying 시설의 구조 및 제어방법을 단순화시킴으로써 운전 및 유지관리를 용이하게 함
- 폐기물 반입수수료 및 배출 재활용물질들의 안정적인 가격형성으로 MBT시설의 경제성 충분히 확보
- MBT시설의 폐기물 반입수수료(165유로/톤)가 소각시설 수수료(100유로/톤)보다 더 높게 책정됨
- 생산 SRF 55유로/톤(반입대비 55%), 철금속 60유로/톤(반입대비 2.5%), 비철금속 160유로/톤(반입대비 2.5%)에 판매

1. SRF 시설 국외 사례

□ 관련 사진



2 영국 런던 Southwark MBT 시설

□ 시설개요¹⁾

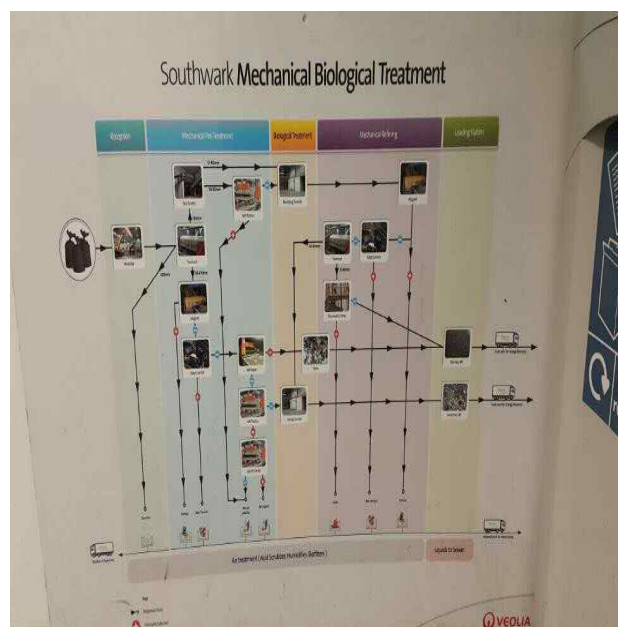
- 위치 : 영국 런던
- 시설형태 : MRF(Materials Recovery Facility) + MBT(Mechanical Biological Treatment)
- 대상 폐기물 : 생활폐기물, 사업장폐기물
- 규모 : 132,000톤/년(MRF시설), 120,000톤/년(MBT시설)
- 가동개시 : 2012년

□ 시설의 주요사항

- 해당시설은 영국 런던 33개구 중 하나인 Southwark의 혼합 재활용품 선별시설(MRF)과 MBT시설, 대형폐기물 중간처리시설(TS), 폐가전처리 및 재활용시설로 구성된 통합폐기물처리시설임
- 파쇄 및 트롬멜 선별 후 생물학적 건조
- 폐기물 수집인원은 120명, 수거차량은 40대 운영중임
- 시설인근에 주민들이 많이 살고 있어 지역주민을 대상으로한 시설의 가치창출에 대한 홍보사업과 폐기물 배출 등에 대한 다양한 교육프로그램을 진행중임



< Southwark MBT 시설 전경 >



< Southwark MBT 시설 공정 흐름도 >

- 본 시설의 설치·운영으로 지역의 폐기물 재활용율이 20%(2008년)에서 34%(2013년)로 증가
- 매립률은 2008년 대비 2014년에 90%이상 감소
 - ※ 영국은 전처리하지 않은 폐기물 매립시 80파운드/톤의 매립세가 부과됨
- MRF(Material Recovery Facility)시설 주요특징
 - 선별 공정 주요 단계에 인력 선별과정을 거치도록 되어 있음
 - 주요 선별공정은 입도, 풍력, 광학선별로 구성되어졌으며, 국내 공공재활용품 선별시설의 일반적인 구성과 동일함. 다만, 선별효율을 높이기 위해 주요 선별 공정은 2개 라인으로 구성되어 있음
 - 카드보드, 종이, 비닐, 플라스틱, 병, 철 및 비철금속 분류하여 종류별 압축결속 후 판매
- 바이오드라잉 시설 주요 특징
 - 주요 공정은 반입 후 파쇄, 선별(250 mm 이상, 80~250 mm, 40~80 mm, 40 mm 미만)하여 80 mm 미만의 폐기물은 바이오드라잉 터널에 투입·처리
 - 바이오드라잉 적용 공법 : 콘크리트 터널형
 - 운전기간 : 12일
 - 12개 터널 중 6개는 40 mm미만의 폐기물을 건조하며 처리용량은 개당 250톤이고, 다른 6개는 40~80 mm 폐기물을 건조하며 개당 400~500톤 처리 가능
 - 송풍량 : 12,000 m³/hr
 - 송풍방향 : 양압
 - 온도 : 53℃까지 도달 및 유지하도록 공기주입
 - 수분 : 반입폐기물 40% → 건조후 폐기물 20~25%
 - 무게감량률 : 30%
 - 바이오드라잉 시설에서 발생하는 배기가스는 세정(산성용액)을 거쳐 알칼리성 약취 물질을 제거하고, 습도 조절 후 바이오필터에서 최종 처리하여 대기로 방출
 - 터널 상부에 카트리지 적용으로 균등하게 폐기물 투입 가능
- MBT시설을 거친 잔재물의 최종 매립량은 1.5% 수준임

□ 시사점

- 바이오드라잉 상용시설의 다양한 적용위치 및 운전방법 확인
 - IOK 시설(생물학적 건조 후 입도선별)과 대조적으로 사전 파쇄 및 입도선별 후 크기별로 생물학적 건조 진행

III 자원화 분야

- IOK 시설대비 적은 송풍량, 장기간의 운전통한 건조 진행
- 두 개 시설의 적용위치, 운전방법 등 비교를 통해 우리 폐기물 특성에 보다 효율적으로 적용할 수 있는 방법 모색 필요

○ 지역주민과의 관계증진 위한 다양한 노력 및 홍보방법 등은 벤치마킹 필요

- 사회적 가치 산출을 통해 기업의 투입비용이 얼마나 사회에 환원되는지를 정량적으로 제시 및 홍보
- 지형을 고려한 건설시공으로 주변의 냄새영향을 최소화하도록 설계
- 지역주민 채용 및 지역을 위한 자금지원을 통해 주변 환경개선(나무심기 등)과 지역주민대상 환경교육 등을 실시

☐ 관련 사진



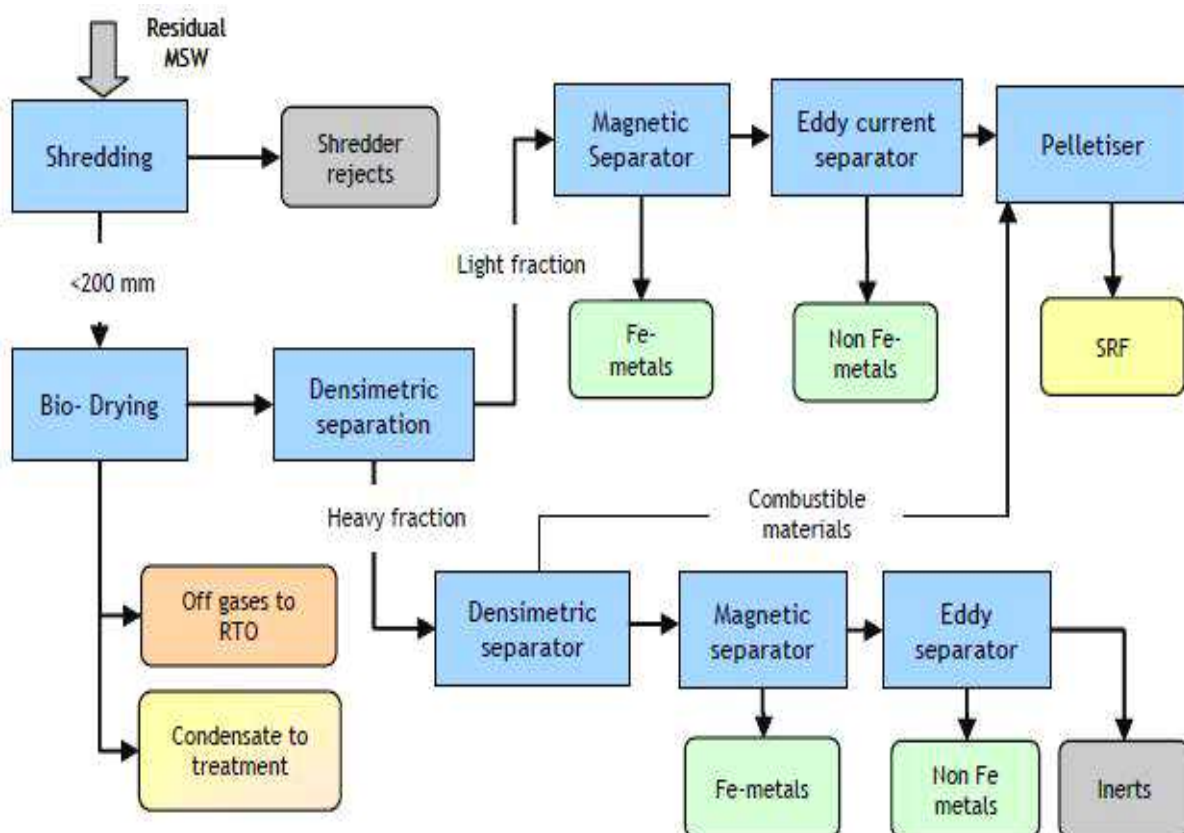
3 독일 Dresden MBT 시설

□ 시설개요²⁾

- 위치 : 독일 Dresden
- 시설형태 : MBT(Mechanical Biological Treatment)
- 규모 : 약 85,000톤/년
- 가동개시 : 2001년

□ 시설의 주요사항

- 폐기물 파쇄 후 200 mm 미만 폐기물을 생물학적으로 건조하여 선별하고 SRF 연료 생산



< 독일 Dresden MBT 공정 흐름도 >

2. 'Mechanical-Biological Treatment : A Guide for Decision Makers processes', Policies & Markets(2005)

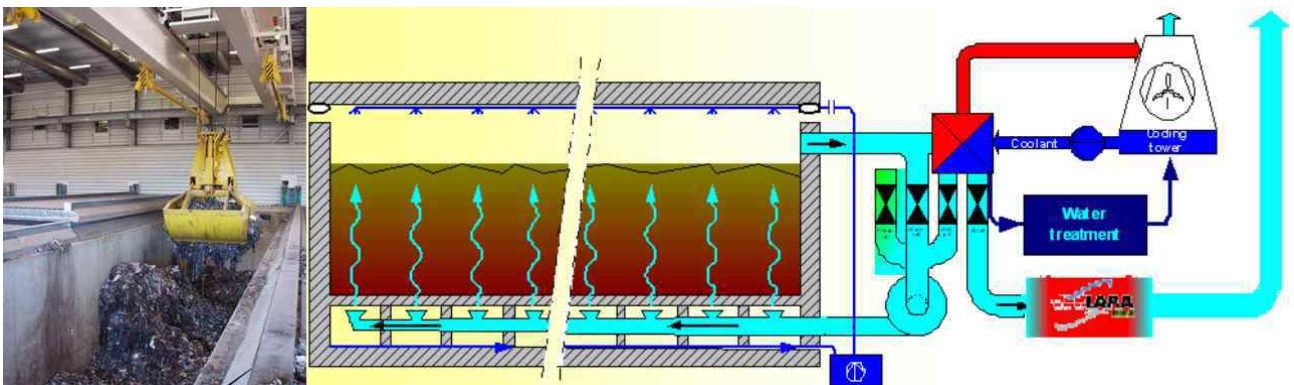
III 자원화 분야

○ 생물학적 건조에 Herhof 기술 적용

- Herhof-Rotteboxes라 불리는 배치(batch) 유형의 폐쇄형 컨테이너에서 생물학적 건조
- 양압식 송풍으로 폐기물을 통과한 고온의 습한 공기는 열교환기를 거쳐 재순환되고 일부 산소 공기가 투입됨
- 박스별로 제어가능하여 홀(hall) 방식을 이용하는 경우보다 성능이 우수함

○ 생물학적 건조 반응기는 약 280톤 폐기물을 담을 수 있는 600 m³의 박스형 구조

- 폐기물 중량 30% 감소 및 배출 수분 함량 12% 이하



< Herhof 생물학적 건조 방식 >

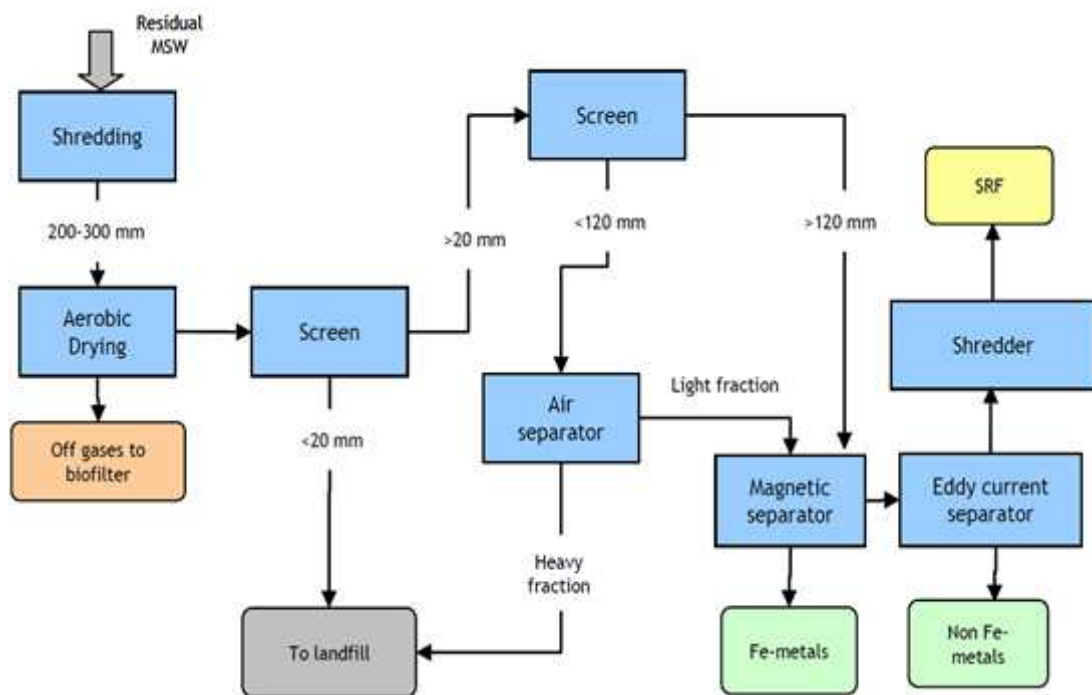
4 이탈리아 Montanaso MBT 시설

□ 시설개요²⁾

- 위치 : 이탈리아 Montanaso
- 시설형태 : MBT(Mechanical Biological Treatment)
- 대상 폐기물 : 생활폐기물
- 규모 : 60,000톤/년

□ 시설의 주요사항

- 반입폐기물을 200~300 mm로 파쇄 후 생물학적 건조·선별하여 SRF 생산
 - 배출물질 : SRF 30,000톤/년, 철 및 비철금속 1,800~3,000톤/년, 잔재물 12,000톤/년, 폐수 600톤/년, 배출가스 14,400톤/년



< 이탈리아 Montanaso MBT 시설 공정 흐름도 >

○ Eco-deco 생물학적 건조 기술 적용

- 폐쇄된 홀(hall) 형태로 크레인을 통해 폐기물 투입 및 배출
- 배출 공기의 온도에 따른 공기 흡입량 조절
- 생물학적 건조 운영기간은 평균 12~15일, 최적 온도범위 55~70℃ 수준

III 자원화 분야

- 건조 성능은 Herhof 보다 떨어지나 시설비가 저렴함
- Eco-deco 기술은 이탈리아 내 11개 시설에 적용 또는 계획



< Eco-deco 생물학적 건조 시설 >

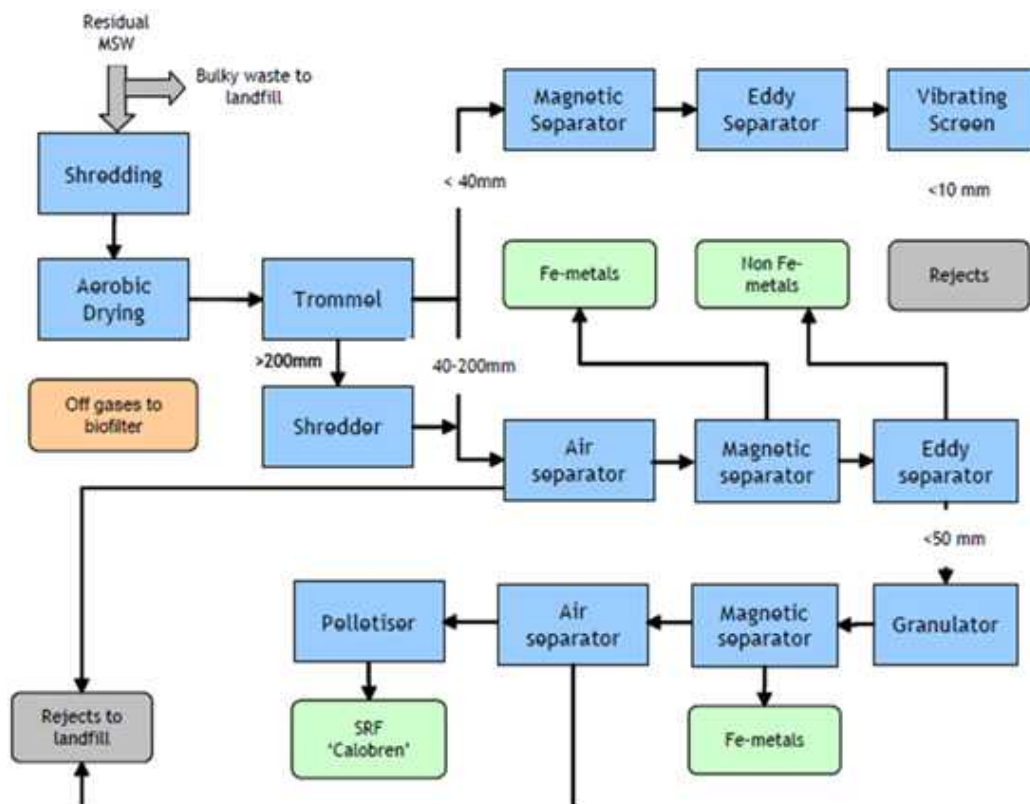
5 독일 Rügen MBT 시설

□ 시설개요²⁾

- 위치 : 독일 Rügen
- 시설형태 : MBT(Mechanical Biological Treatment)
- 대상 폐기물 : 생활폐기물
- 규모 : 20,000톤/년
- 가동개시 : 1999년

□ 시설의 주요사항

- 반입폐기물 파쇄 후 생물학적 건조 및 선별하여 SRF 생산 및 잔류물 매립
- Nehlsen 생물학적 건조 기술 적용
 - 컨테이너 1기에서 7일 동안 약 6톤의 폐기물 건조 처리
 - 부분적으로 배출 공기를 컨테이너 하부를 통해 공급하여 순환함
 - Nehlsen은 1990년대 중반 생물학적 기술을 개발한 독일 회사로 컨테이너를 이용한 건조공법 개발



< 독일 Rügen MBT 시설 공정 흐름도 >

III 자원화 분야



Newer container design attached to the process

Bio-drying container

< 독일 Rügen MBT 시설 및 생물학적 건조 컨테이너 >



< 독일 Nehlsen 생물학적 건조 현장 >

6 영국 MBT 플랜트 사례

□ MBT 플랜트 현황³⁾

- 2010년 폐기물 시설 보고서에 따르면 영국에 19개 MBT 시설이 설치되어 매년 약 273만톤이 처리되고 있음
- MBT 플랜트 당 5~31만톤 폐기물 처리

< 영국에 운영중인 MBT 플랜트 사례 >

장소	운전사	시설 용량	시설 특성
Waterbeach, Cambridgeshire	AmeyCespa	18만톤/년	
Leicester	Biffa	10만톤/년	불밀 및 혐기성 소화 공정 사용
Cotesbach, Leicestershire	New Earth Solutions	5만톤/년	생물학적 안정화 운전
Frog Island & Jenkins Lane, East London	Shanks	36만톤/년(2기)	생물학적 건조 공정 운전
Farington, Lancashire	Global Renewables	17만톤/년	기계적 선별 후 퇴비화 및 혐기성 소화공정 적용
Bredbury Parkway, Stockport & Reliance Street, Manchester	Viridor Laing	20만톤/년(2기)	혐기성 소화공정 적용
Southwark	Veolia	9만톤/년	생물학적 건조 운전



New Earth MBT 시설



Veolia Southwark 통합 폐기물 처리 시설
(MBT, MRF 시설 포함)

3. 'Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste', DEFRA, 2014. 2. 'www.defra.gov.uk'

□ 시설의 주요사항

- New Earth 지역에서 2011년 9월 운전이 시작되어 연간 20만톤 처리용량으로 5개 지역 생활폐기물 및 사업장생활폐기물을 처리함
 - MBT 시설이 미사용 산업부지에 설치되어 금속, 플라스틱을 회수하고 퇴비를 생산함
 - New Earth에서 13 MW 에너지 회수 플랜트를 설치하여 전기 생산을 기대하고 있음
 - 퇴비는 매립장 복토재 등으로 쓰임
- Greater Manchester 10개 도시 중 아홉 곳에서 협의하여 5개 MBT 시설을 설치하여 4개 혐기성 소화시설에서 재활용되지 않은 폐기물 45만톤을 처리함
 - Reliable Street 시설(연간 10만톤 처리용량)에서 폐기물의 선별, 파쇄 등 기계적 선별 후 습식 혐기성 소화조(25일 체류)에서 바이오가스가 생산되어 열병합발전소에 사용됨
 - 또한 연간 5개 시설에서 매년 고형연료가 27만 5천톤 생산되어 열병합발전소에 연료로 공급

7 독일 MBT 플랜트 사례

□ MBT 플랜트 현황⁴⁾

- 독일에 현존하는 45개 MBT 시설의 처리용량은 5,300만톤/년임
 - 이 시설 중 12개 시설은 바이오가스를 생산하는 혐기성 소화시설이고 다른 14개 시설은 MBS(호기성 생물학적 건조) 플랜트임
 - 거의 모든 MBT 플랜트가 2001~2005년에 재건축되거나 리모델링되어 2005년 6월 이후부터 적용된 플랜트 법적요건을 준수함

< 2007년, 2010년(MBS) 독일 MBT 플랜트 현황 >

생물학적 처리 기술 유형	전체 소화	부분 소화	호기성 처리	호기성 생물학적 건조(MBS)	전체
전체 용량[1,000t/a]	888	432	2,006	1,984	5,310
설치 수	8	4	19	14	45

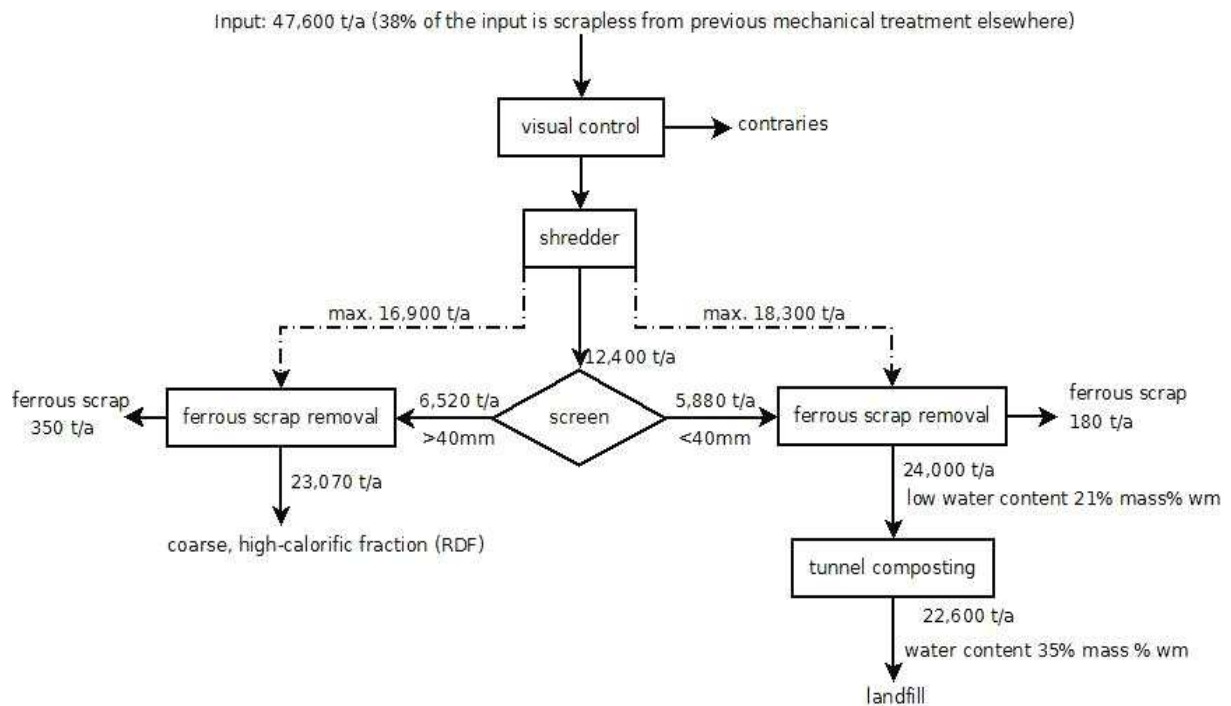
□ 퇴비화 MBT 플랜트

- 2004년에 건설된 호기성 생물학적 처리 MBT 시설은 터널형 퇴비화 플랜트로 연간 47,000톤의 폐기물을 처리함
 - 반입폐기물 구성은 생활폐기물 30%, 미세입자 폐기물 55%, 대형폐기물 14%, 목재 1%임
- 폐기물 반입 후 파쇄되고 금속 선별기 통해 고칼로리 40 mm 이상 크기의 폐기물과 40 mm 미만 생분해성 유기물을 분리함
 - 미세 입자는 생물학적 처리 플랜트에서 처리되고 큰 입자는 컨테이너 이송기에 적재됨
- 생물학적 처리 단계에서 40 mm 미만인 미세입자를 연간 24,000톤 처리할 수 있음
 - 퇴비화는 30개 터널에서 6~8주 체류시간을 거쳐 진행됨
 - 컨베이어 벨트 시스템으로 자동으로 유기성폐기물을 퇴비장소로 이동시킴
- 플랜트 운전자에 따르면 2009년 연간 719톤 철금속이 재활용되었고 연간 4,531톤 목재가 선별되어 소각로에서 에너지 생산에 쓰임

4. 'Discussion paper on the use of MBT to treat mixed putrescible waste', wasteconsult international, 2014. 1.

III 자원화 분야

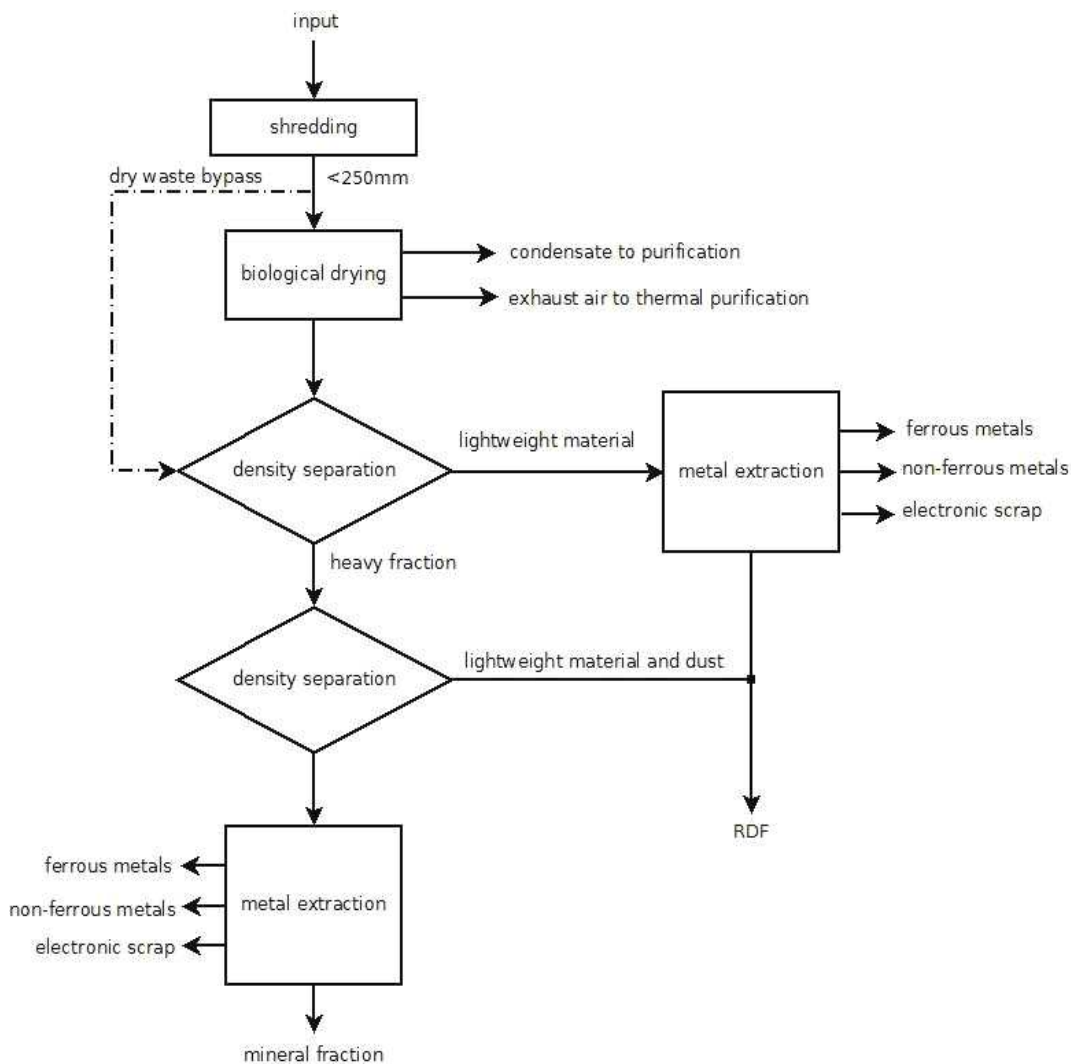
- 고칼로리 폐기물은 연간 17,336톤이 소각로에서 처리되고 매립장에서 처리되는 폐기물은 연간 20,167톤임



< 호기성 MBT 공정 흐름도 >

□ 생물학적 건조 MBT 플랜트

- 2006년 설치된 생물학적 건조 MBT 시설은 연간 135,000톤의 폐기물이 처리됨
 - 반입폐기물은 생활폐기물 및 도시폐기물 82%, 대형폐기물 12%, MT 시설 폐기물 1.7%, 혼합 건설폐기물 1.5%, 산업폐수처리시설 슬러지 1.0%, 기타 1.1%로 구성됨
- 지하 병커에 폐기물이 유입되면 선별없이 파쇄 및 건조됨
- 파쇄 후 9개 퇴비박스에 폐기물이 나뉘어져 7일 동안 생물학적 건조 및 미생물에 의해 발생된 열로 안정화됨
- 생물학적 건조 이후 디스크 스크린, star 스크린 및 2개의 진동 스크린을 거쳐 크기별로 폐기물을 분리하고 공압 테이블 및 풍력 선별기로 비중별로 폐기물을 분리함
- 건조 중 발생된 배출가스는 열교환기에 주입하여 수분을 제거한 후 RTO로 처리함
- 연간 30,000m³ 규모의 열교환기에서 발생된 응축수는 암모니아, COD, BOD를 저감하기 위한 플랜트에서 처리함
- 2009년에는 철금속 3,380톤, 비철금속 395톤이 재활용됨
 - 또한 연간 목재 3,325톤, 2차 연료 57,900톤(저위발열량 14,000 kJ/kg) 및 RDF 6,010톤(저위발열량 12,600 kJ/kg)이 생산되어 발전소에서 대체 연료로 공급됨



< MBS 시설의 기계적·생물학적 안정화 공정 흐름도 >

○ 응축수는 배출가스 처리 방법에 따라 달라짐

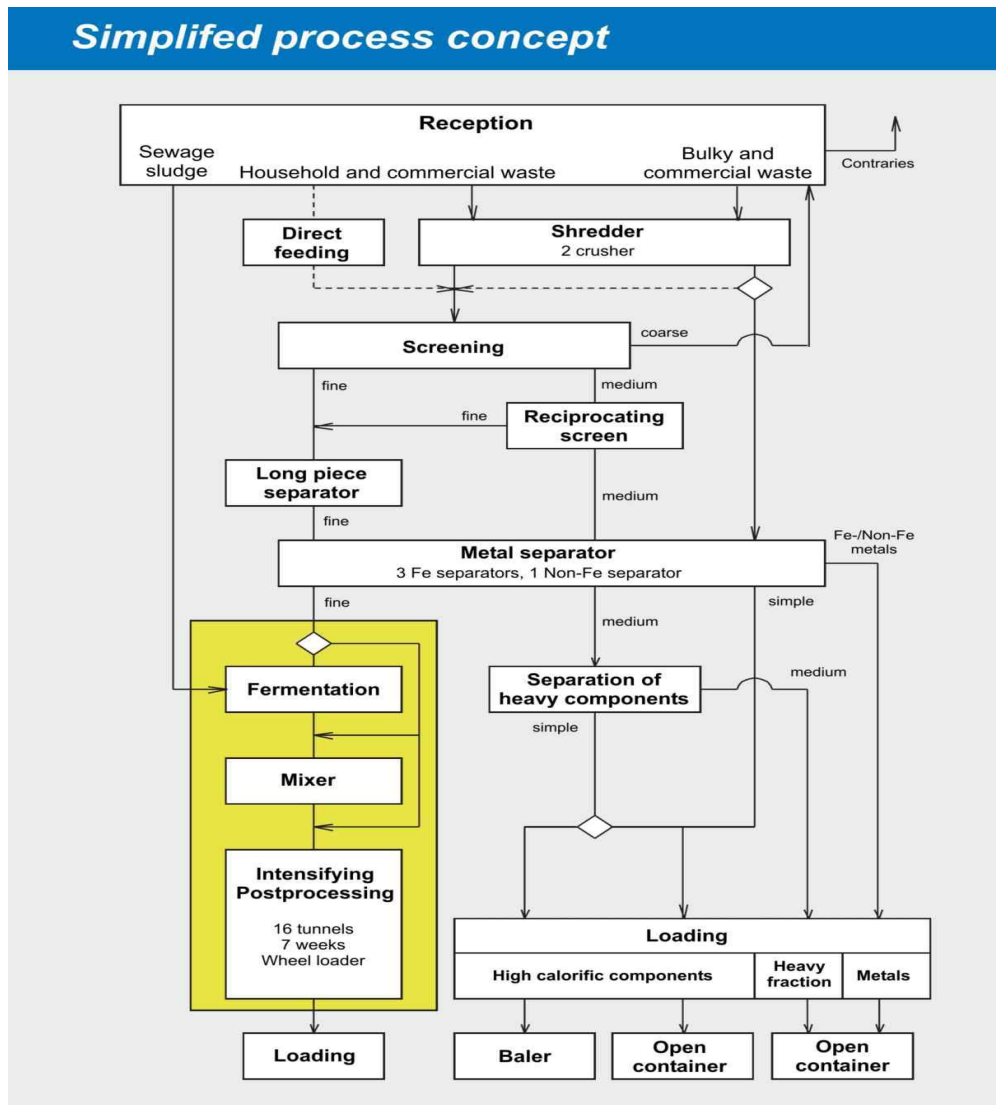
- 독일 법에서 MBT 배출가스를 열처리하도록 규정함
- 배출가스 처리에 소모되는 에너지 소비를 최소화하기 위해 배출가스 대부분을 순환함
- 과열을 방지하기 위해 수분 포화된 공기를 순환하여 냉각함

□ 건식 소화 및 터널형 퇴비화 MBT 플랜트

- 2006년 설치된 생물학적 건조 MBT 시설은 연간 135,000톤 폐기물이 처리됨
- 2005년도 설치된 건식 혐기성 소화 및 터널형 퇴비화 MBT 시설은 연간 115,000톤의 폐기물을 처리함
- 2009년 기준 유입폐기물은 생활폐기물 52%, 상업폐기물 35%, 슬러지 및 점성 폐기물 13%로 구성됨

III 자원화 분야

- 기계적 처리 단계에서 폐기물을 파쇄 후 선별하고 금속을 제거함
- 60 mm 이하 폐기물의 약 3분의2는 중온 건식 소화시 21시간의 체류시간이 소요됨
 - 소화되지 않은 폐기물은 32개 강제 폭기 터널에서 호기성 분해됨
 - 컨베이어 벨트로 퇴비화할 물질을 추가하고 7주 후 적재기로 퇴비물질을 제거함



< 건식 소화 및 퇴비화 MBT 공정 흐름도 >

- 유기물질이 건식 소화되어 생산된 메탄은 전기·열 생산 플랜트에 주입되어 연료로 사용됨
 - 연간 철 금속은 1,799톤, 비철금속은 231톤 재활용됨
 - 입자가 150 mm 보다 작은 폐기물에서 2차 회수된 고형연료(저위발열량 15,000 kJ/kg)는 연간 40,000톤 생산되어 발전소 연료로 쓰임

- MBT 시설 공정 후 연간 25,000톤이 매립됨

□ 습식 소화 MBT 플랜트

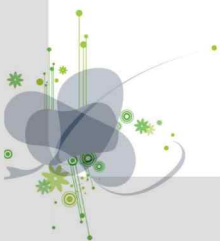
- 2008년도 설치된 2단 중온 습식 소화 및 습식 산화 MBT 시설은 연간 133,000톤의 폐기물을 처리함
 - 2009년 기준, 반입폐기물은 생활폐기물 79%, 대형폐기물 13%, 상업폐기물 7%로 구성됨
- 기계적 처리 공정에서 폐기물은 파쇄 후 선별되어 60 mm 이상 폐기물은 금속 제거 후 고형연료 생산 공정으로 보냄
- 펄퍼(pulper)와 물을 1:4 비율로 추가하여 미세입자를 파이프에 이송가능한 부유물로 전환시킴
- Grit chamber로 플라스틱 및 목재 등 경량 물질과 불활성 물질 등 무거운 물질을 제거함
- 가수분해 및 산생성 단계는 소화시설 이전 분리된 단계로 완전 혼합되어 부유물질과 침전을 방지하여 분해물질을 균질화함
- 가수분해 단계 후 2개의 4,800 m³ 소화기에 분해물질이 주입되고 소화기 상부 교반기로 완전 혼합됨
- 습식 산화공정으로 2개의 폭기 완전혼합 라인 각각에 3개의 교반기가 갖추어져 공기(2,400 m³/h)가 각각의 교반기로 준비되어 공기방울이 바닥에 공급됨
- 폭기 후 3개의 경사형 원심분리기에 응집제를 사용하여 고액분리 실시
- 이후 건조기로 소화 생성물을 건조하여 매립에 적합한 수분으로 맞춤
- 배출가스 처리를 위해 폭기 공정의 환기장치를 제어하여 아산화질소 형성을 방지함
 - 95% 이상 효율의 RTO 처리로 배기가스에 탄소를 산화함
 - 산 스크리버로 MBT 플랜트 배기가스(NH₃) 처리
- 매년 MBT 플랜트에서 22,000m³ 폐수가 발생됨
 - 발생된 폐수는 폐수처리 플랜트 및 도시슬러지 처리 시설에서 처리됨
- 2009년 연간 철·비철 금속의 3,688톤이 재활용됨
 - 저위발열량 12,266 kJ/kg인 RDF 연료가 60,153톤 생산되어 에너지 생산에 사용됨
 - 소각장에서 연간 1,344톤의 불순물이 소각되었고 매립장에서 23,587톤이 매립됨
- 바이오가스는 2개 가스 엔진이 설치된 열병합발전소에서 열과 전기로 변환됨
 - CHP 플랜트는 2×634 kW_{heat}, 2×658 H_{el}의 용량 시설임

참고문헌

1. '산자부『저품위 혼합폐기물의 연료화를 통한 열에너지 생산기술』연구과제 관련 국외출장 결과 보고', SL공사, 윤수경(2015.9)
2. 'Mechanical-Biological Treatment : A Guide for Decision Makers processes', Policies & Markets(2005)
3. 'Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste', DEFRA, 2014. 2.
'www.defra.gov.uk'
4. 'Discussion paper on the use of MBT to treat mixed putrescible waste', wasteconsult international, 2014. 1.

III 자원화 분야

2. 유럽 폐기물 성상 및 MBT 시설 특성

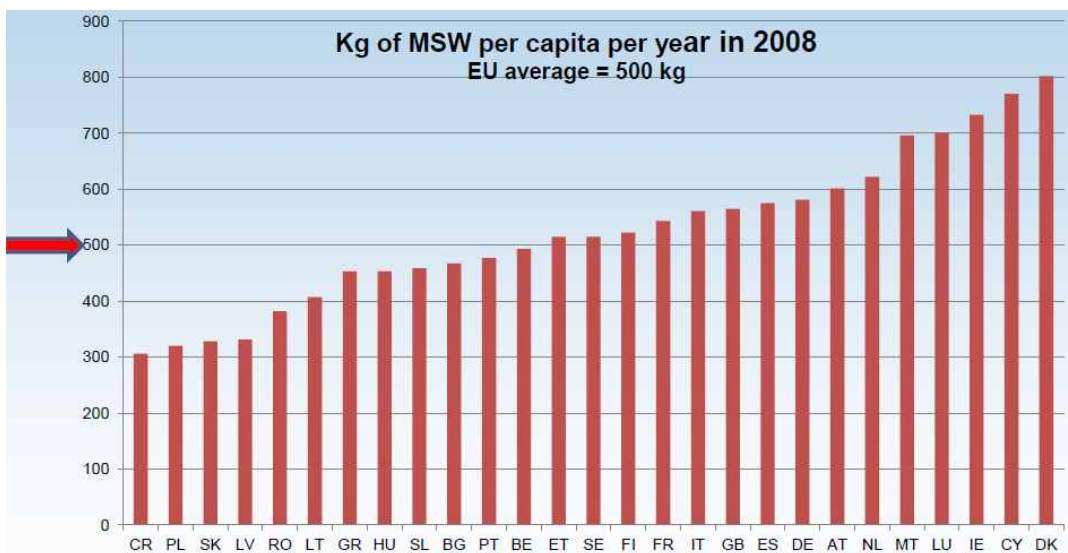


세부목차

1. 유럽 폐기물 처리 현황	147
2. 유럽 폐기물 성장	151
3. 소각시설 대비 MBT 시설의 장단점	160
4. MBT 시설 법적기준	164
5. MBT 시설 사례(오스트리아, 독일)	166
참고문헌	171

1 유럽 폐기물 처리 현황

- EU 매립 법규(Landfill Directive, 1999/31/EC) 의하면 생분해가능한 폐기물이 매립되는 총량을 1995년 대비 2009년까지 50% 감축하고 2016년까지 35% 줄여야 함¹⁾
 - 이로써 수질과 토양 오염을 방지하고 온실가스인 메탄 배출과 물질 손실을 최소화 하기 위함
- EU 27개국 1인당 연간 폐기물 발생량은 2008년 기준 약 500 kg 임¹⁾

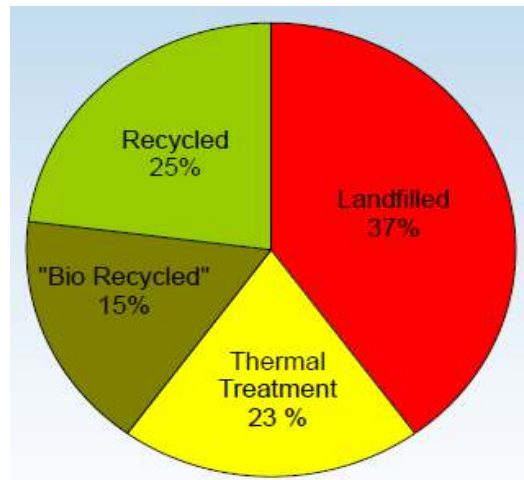


< EU 27개국 연간 1인당 폐기물 발생량(2008년 기준, Eurostat 2010)¹⁾ >

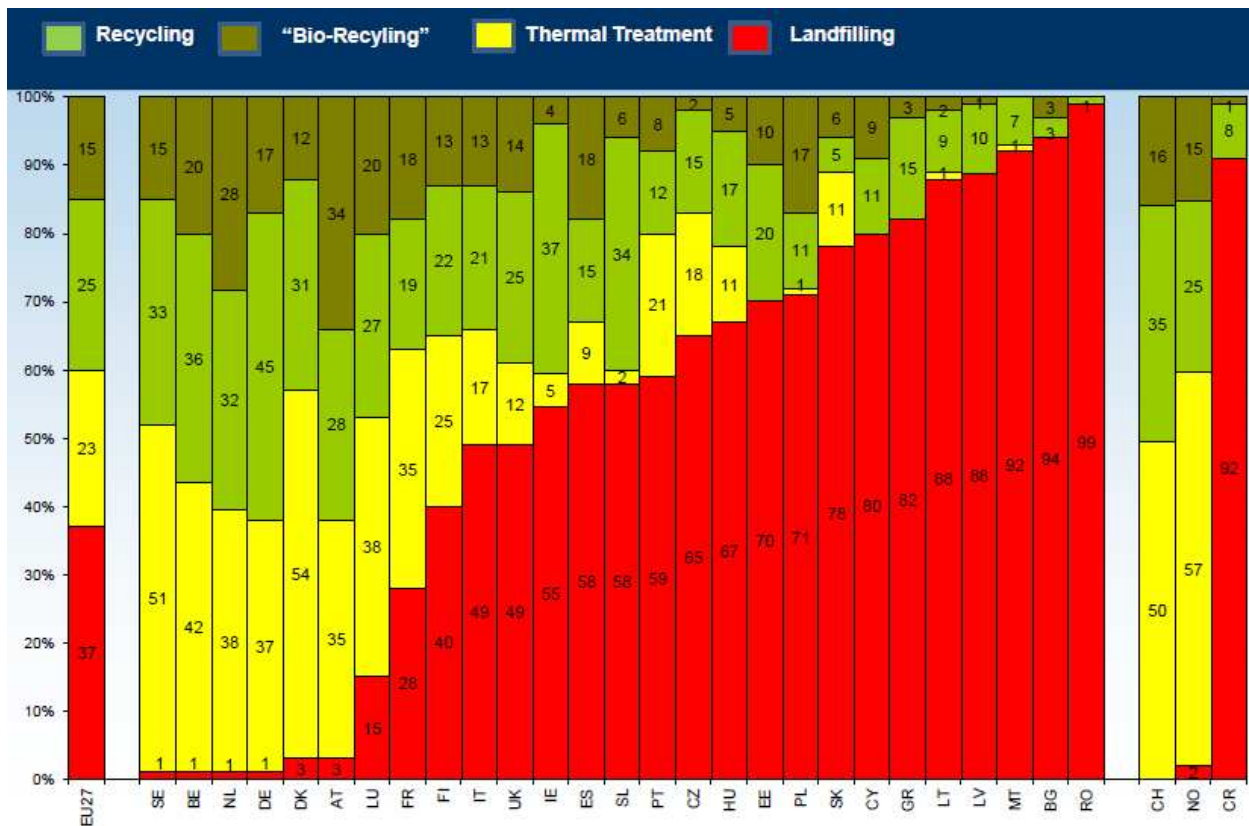
- 유럽위원회에서는 2030년까지 재활용 가능한 모든 폐기물의 매립을 금지하기 위해 2030년까지 폐기물 매립 제한 도입 제안²⁾
 - 2025년까지 종이, 유리, 금속 및 플라스틱의 재활용품 및 생분해성 폐기물 매립 금지 방안 채택
- 2011년 기준 EU 27개국 폐기물(253만톤/년)의 37%는 매립됨
 - 폐기물의 23%는 열적 처리되고, 15%는 생물학적으로 자원화되고 25%는 자원화 되었음¹⁾

1. 'Integrated waste management of MSW across Europe Waste to Energy as a professional route to treat residual waste', Jan Manders Deputy President CEWEP, Houthalen Helchteren 16 October 2013
 2. 'Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe', EUROPEAN COMMISSION, Brussels, 2.7.2014

III 자원화 분야



< 2011년 EU 27개국 폐기물 처리현황(EUROSTAT)¹⁾ >



< EU 27개국 국가별 폐기물 처리현황(2011년 기준, EUROSTAT)¹⁾ >

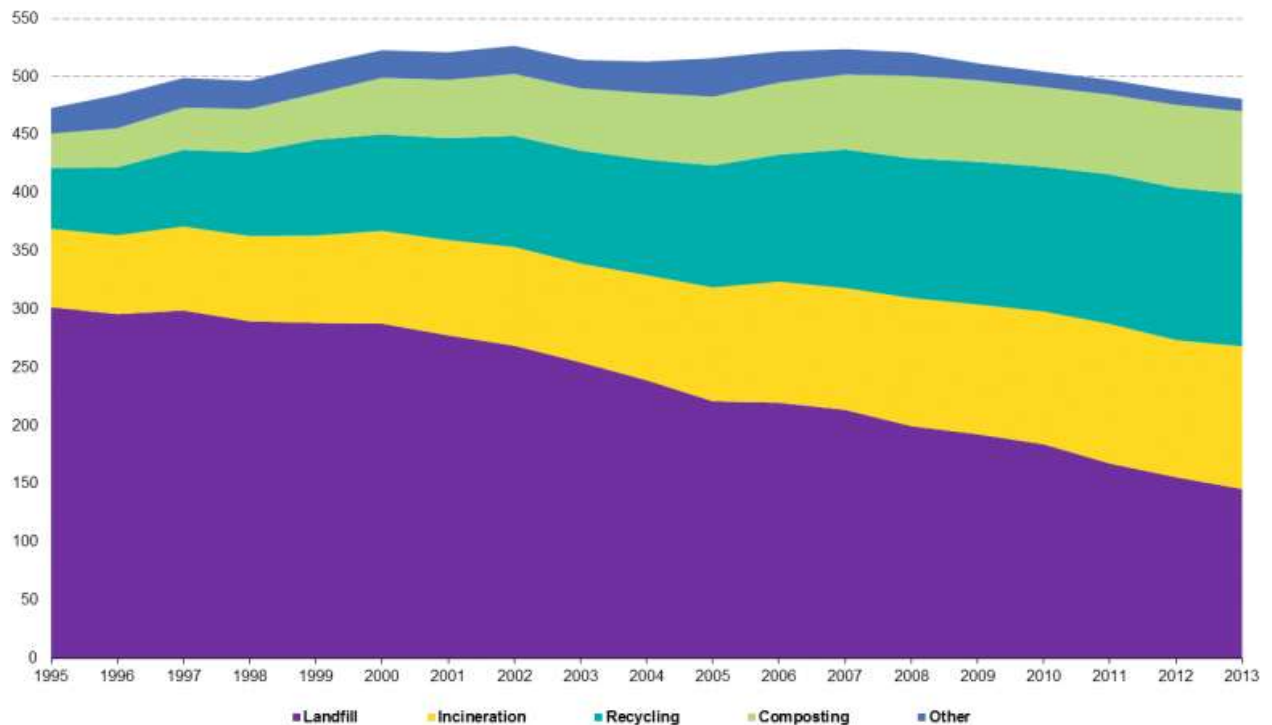
- 스웨덴, 벨기에, 네덜란드, 독일은 매립율이 1%에 불과하고 덴마크 오스트리아는 매립율이 3%에 불과함¹⁾
- 이들 나라의 열적 처리는 35~51% 정도이며 생물학적 자원화는 28~45% 정도이며 이외 자원화는 12~34% 정도임
- 스위스의 매립율은 약 0%, 노르웨이 매립율도 약 2% 정도임
- EU 27개국의 매립율이 1995년 63.8%에서 2013년 30.3%로 감소됨

2. 유럽 폐기물 성장 및 MBT 시설 특성

- 이는 포장폐기물의 분리 회수 및 재활용의 결과임²⁾
- 또한 2016년 6월 16일까지 생분해가능 폐기물량을 감축해야 하며, 2015년에는 생분해 가능한 폐기물 발생량의 35%까지 감축해야 함
- 이로써 퇴비화, 소각, MBT에 의한 전처리에 의해 유기성 폐기물의 매립률이 감소됨

Municipal waste landfilled, incinerated, recycled and composted in the EU-27																				
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	change (%) 1995-2013
	million tonnes																			
Landfill	144	142	143	140	139	139	135	131	124	117	109	108	106	99	96	92	84	78	73	-49%
Incineration	32	32	35	35	36	39	40	41	41	44	48	51	52	55	56	57	60	59	62	92%
Recycling	25	28	32	35	40	40	42	45	47	49	52	54	59	60	61	62	64	66	66	163%
Composting	14	16	17	18	19	24	24	26	26	28	29	31	32	35	35	34	34	36	36	153%
Other	10	14	12	12	12	11	12	12	12	13	16	13	11	10	7	7	6	6	5	-49%
	kg per capita																			
Landfill	302	296	299	290	288	288	278	269	255	239	221	220	214	200	193	184	168	156	146	-52%
Incineration	67	68	72	73	75	80	82	85	85	90	98	104	105	110	112	114	120	118	123	82%
Recycling	52	59	66	72	82	83	88	95	97	99	105	109	119	120	123	124	129	131	131	150%
Composting	30	34	36	37	40	49	50	53	54	57	59	62	64	71	70	68	69	71	71	141%
Other	22	29	26	24	25	24	24	24	24	27	33	27	22	20	15	13	13	12	11	-52%

< EU 27개국 1995년부터 2013년까지 폐기물 처리 현황(EUROSTAT³⁾) >

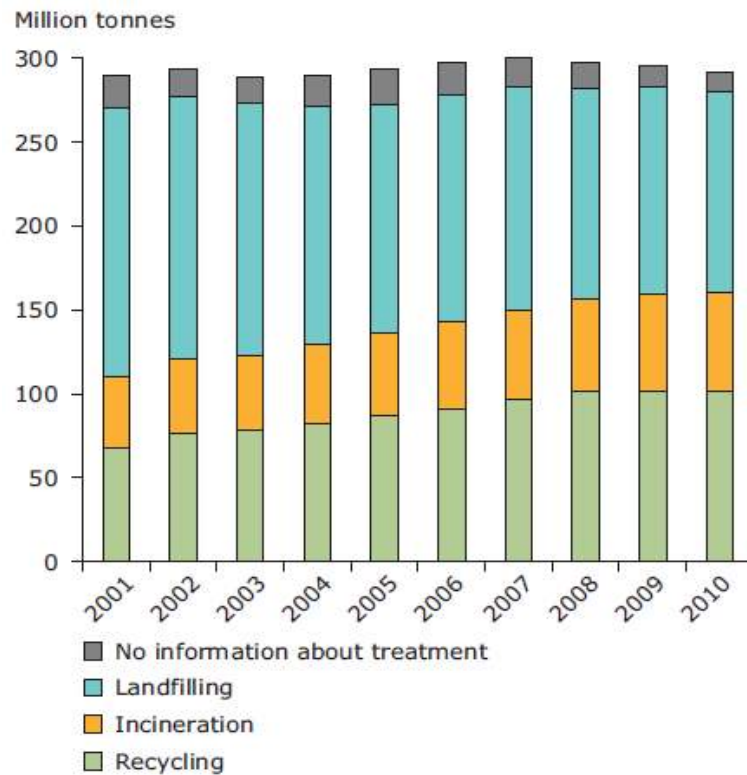


< EU 27개국 폐기물 처리 방법 변화 추이(KG/인, EUROSTAT³⁾) >

3. 'Municipal waste treated in Europe', Eurostat(2015.7)

III 자원화 분야

- 2001년부터 2010년까지 유럽 32개 국가의 폐기물 처리 현황은 아래 그림과 같음⁴⁾
- 매립은 약 4,000만톤 감소되었고 소각은 약 1,500만톤, 재활용은 약 2,900만톤 증가되었음
 - EU 27개 회원국의 경우 매립은 4,100만톤 감소되었으며 소각은 1,500만톤, 재활용은 2,800만톤 증가되었음



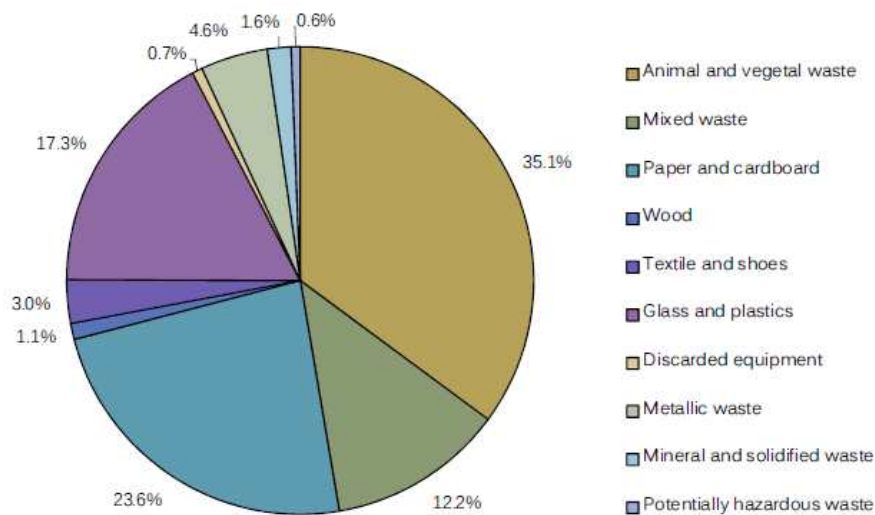
유럽 32개국 폐기물 처리 추이(2001-2010년)⁴⁾

4. 'Managing municipal solid waste, a review of achievements in 32 European countries to treat mixed putrescible waste', EEA Report No 2(2013)

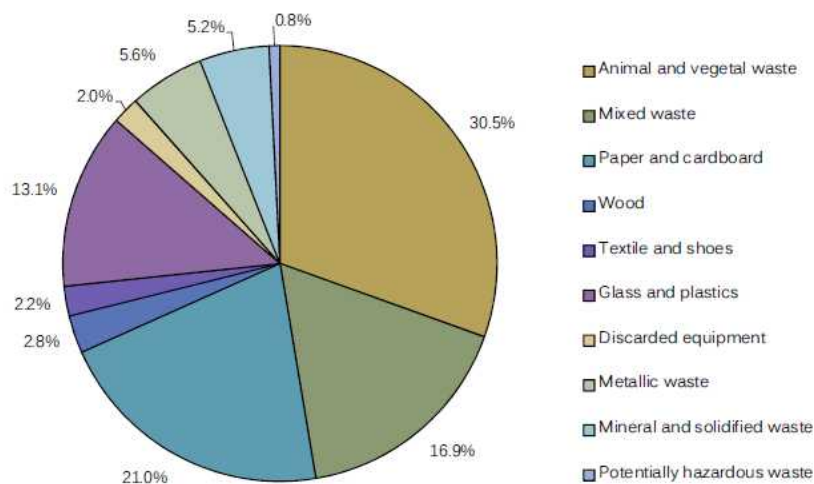
2 유럽 폐기물 성장

□ 유럽 32개국 폐기물 성장

- 2001년 영국에서 수거된 생활폐기물 중 동물 및 야채 폐기물이 35.1%로 가장 높고 종이 및 카드보드 23.6%, 유리 및 플라스틱 17.3% 순으로 높음⁵⁾
- 2001년 영국 전체폐기물(생활폐기물, 상업폐기물, 용량 큰 폐기물, 거리 폐기물 등)의 구성도 생활폐기물의 구성과 비슷함



영국 생활폐기물 구성(2001년)⁵⁾



영국 전체폐기물 구성(2001년)⁵⁾

5. 'Waste Profiling', FhG-IBP (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.), March 2014

III 자원화 분야

- 유럽환경기관(EEA) 연구에 의하면 유럽 전체폐기물의 30~40%는 생분해 가능한 주방 및 정원 폐기물임⁶⁾
 - 다음 표에서 유럽 일부 국가는 주방 및 정원 폐기물 비율이 적음
 - 나라별로 주방 및 정원 폐기물 비율이 다른 이유는 폐기물 관리 시스템이 다르고 사회적, 문화적 차이에 의함

< 유럽 국가 전체 폐기물 중 주방 및 정원폐기물 비율⁶⁾ >

주방 및 정원 폐기물 비율	국가
< 20%	노르웨이, 슬로베니아, 리투아니아
20~30%	불가리아, 덴마크, 아일랜드, 헝가리, 스위스, 라트비아
30~40%	독일, 프랑스, 이탈리아, 스웨덴, 영국
40~50%	오스트리아, 벨기에, 체코, 에스토니아, 핀란드, 룩셈부르크, 네덜란드, 폴란드, 루마니아, 스페인
50~60%	그리스, 포르투갈, 슬로바키아
60~80%	몰타

- 유럽 폐기물의 평균 저위발열량은 9 MJ/kg이고 수분은 30~40% 정도임⁵⁾
 - 유럽 생활폐기물 저위발열량은 5.1~11.6 MJ/kg으로 다름
 - 유럽 생활폐기물 에너지 중 생분해 폐기물 비율은 약 60% 정도임
- 폐기물의 수분은 폐기물의 구성에 따라 달라짐⁵⁾
 - 평균적으로 유럽 폐기물 수분 함량은 30~40% 범위임

6. European Environment Agency (EEA): Managing municipal solid waste - a review of achievements in 32 European countries (EEA report, No 2/2013). Publications Office of the European Union, Luxembourg (2013)

< 유럽 국가별 생분해 가능한 폐기물 분리수거 여부⁵⁾ >

국가	분리 수거	종이, 카드보드	음식물 폐기물	정원 폐기물	섬유	목재
오스트리아	국가적 차원 분리 수거					
벨기에	국가적 차원 분리수거					
덴마크	국가적 차원 분리수거				분리수거 안함	
핀란드	국가적 차원 분리 수거					
프랑스	국가적 차원 분리 수거					
독일	국가적 차원 분리 수거					
에스토니아	지역적 분리 수거				정보 없음	
그리스	국가적 차원 분리수거		분리수거 안함	국가적 차원 분리수거	분리수거 안함	
아일랜드	국가적 차원 분리 수거					
이탈리아	국가적 차원 분리 수거					
리히텐슈타인	국가적 차원 분리 수거				분리수거 안함	
리투아니아	국가적 차원 분리 수거				분리수거 안함	
네덜란드	국가적 차원 분리 수거					
노르웨이	국가적 차원 분리 수거					
폴란드	국가적 차원 분리 수거				정보 없음	
포르투갈	국가적 차원 분리 수거					
루마니아	지역적 분리 수거	정보 없음		지역적 분리 수거	정보 없음	
슬로베니아	국가적 차원 분리 수거				정보 없음	
슬로바키아	국가적 차원 분리 수거				정보 없음	
스웨덴	국가적 차원 분리 수거				분리수거 안함	
에스파냐	국가적 차원 분리 수거				분리수거 안함	
스위스	국가적 차원 분리 수거				정보 없음	
터키	지역적 분리 수거				정보 없음	
영국	국가적 차원 분리 수거					분리수거 안함

III 자원화 분야

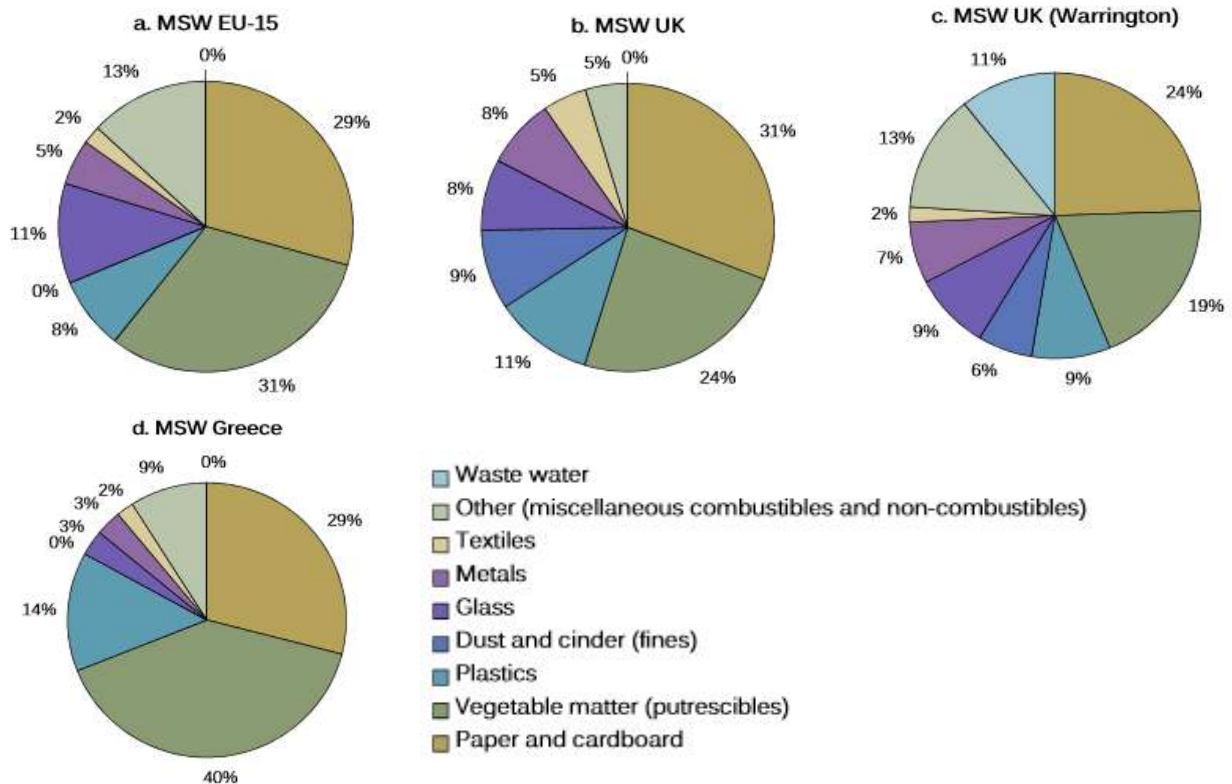
< 유럽 국가별 혼합된 생활폐기물(잔류 폐기물)의 저위발열량 및 생분해 에너지 비율⁵⁾>

국가명	저위발열량(MJ/kg)	생분해 에너지 비율(%)
스위스	11.6	58
노르웨이	11.0	64
아일랜드	10.9	58
스웨덴	10.7	75
영국	10.5	63
포르투갈	10.4	50
핀란드	10.1	55
이탈리아	10.0	59
오스트리아	9.7	49
프랑스	9.5	59
독일	9.5	67
벨기에	9.4	53
네덜란드	9.2	70
룩셈부르크	8.7	58
스페인	8.7	62
그리스	8.6	62
덴마크	8.5	65
헝가리	7.8	45
불가리아	7.2	48
폴란드	7.2	54
루마니아	7.1	52
슬로바키아	6.6	51
터키	5.5	68
체코	5.1	68

○ 다음은 유럽 폐기물 샘플의 구성과 저위 발열량, 수분 함량, 연소가능한 폐기물 함량 및 불활성 폐기물 함량을 보여줌⁵⁾

- 분석결과 생활폐기물의 저위발열량과 비슷함
- 영국 폐기물 수분 함량은 약 31%이고 연소가능한 폐기물 함량은 약 45% 정도이고 불활성 폐기물 함량은 약 24% 정도임

2. 유럽 폐기물 성장 및 MBT 시설 특성



< 유럽 폐기물 샘플 구성⁵⁾ >

< 유럽 폐기물 샘플 저위발열량 및 수분, 연소가능한 폐기물, 불연성 폐기물 함량⁵⁾ >

	EU 15개국 폐기물	영국 폐기물	워링턴(영국) 폐기물	그리스 폐기물
저위발열량 (MJ/kg)	8.5	10.60	9.27	9.75
수분(%)	-	31.20	31.56	-
연소가능한 폐기물(%)	-	44.60	43.32	-
불연성 폐기물(%)	-	24.20	25.12	-

□ 잔류 폐기물 구성

○ 잔류 폐기물은 분리 배출 후 종량제 봉투에 버려지는 혼합 폐기물을 의미함⁷⁾

- 지역과 계절에 따라 잔류 폐기물 구성이 다름

○ 잔류 폐기물의 60~70%는 생물학적으로 분해가능함⁷⁾

- 플라스틱은 10~20%, 불활성 폐기물(유리 포함)은 약 10% 정도임

- 금속은 3~4%, 화학적으로 유해한 폐기물은 2% 정도임

- 잔류폐기물 1톤 중 수은 1~3g, 카드뮴 약 10 kg, 황 3~5 kg, 염소 6~12 kg 정도 포함됨

III 자원화 분야

< 오스트리아 환경부 환경 관리 계획(2011년) 잔류폐기물 구성⁷⁾ >

잔류폐기물 종류	구성 비율
유기성폐기물	20.5%
종이, 판지, 포장용 판지	12.4%
위생적인 폐기물	8.2%
플라스틱 및 경량 폐기물	9.7%
복합 물질	9.5%
섬유	5.8%
유리	4.3%
불활성 물질	3.4%
금속	2.9%
유해 폐기물	1.2%
기타	2.5%
잔류 미세 폐기물	19.6%
	100%

□ 독일 Ennigerloh 지역 MBT 시설 폐기물 성상

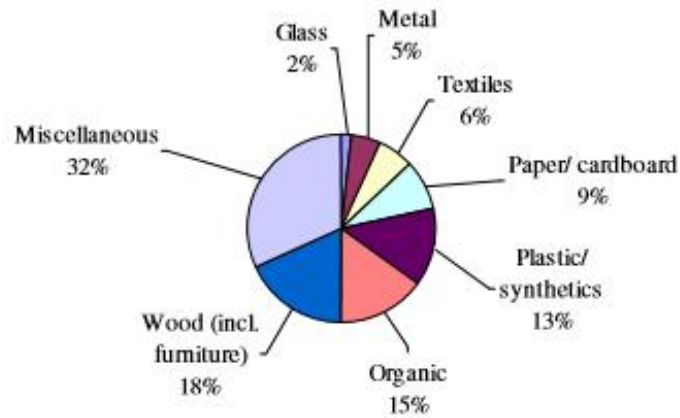
- 1995년 독일 Ennigerloh 지역 폐기물 성상 조사 결과는 아래 그림과 같음⁸⁾
- 기계적 선별 시설로 반입된 사업장 폐기물의 약 50%, 생활폐기물의 약 28.5%가 RDF 생산에 사용됨⁸⁾



< 독일 Ennigerloh 지역 MBT 시설⁸⁾ >

7. 'Analysis of the EU Acquis and Bulgarian Legislation on the Biowaste Management and the Residual Fraction of Household Waste, Part III Residual Waste Management Strategy, Final Report – 10', Franz Neubacher, September 2012

2. 유럽 폐기물 성장 및 MBT 시설 특성



< 독일 Ennigerloh 지역 폐기물 구성⁸⁾>

< Ennigerloh 지역 MBT 시설 반입폐기물의 최종 처리 비율⁸⁾>

	상업용 폐기물	생활폐기물
생물학적 처리	20%	50%
소각	23%	10%
금속 재활용	6%	2.5%
수분	1%	9%
RDF	50%	28.5%

< Ennigerloh 지역 MT 시설 2005년 8월 1일부터 9월 25일까지 반입폐기물 구성⁸⁾>

혼합된 생활폐기물	63.29%
혼합된 상업용 폐기물	17.82%
기타 폐기물	9.88%
혼합된 포장폐기물	7.17%
퇴비화되지 않는 폐기물	1.45%
폐플라스틱	0.35%

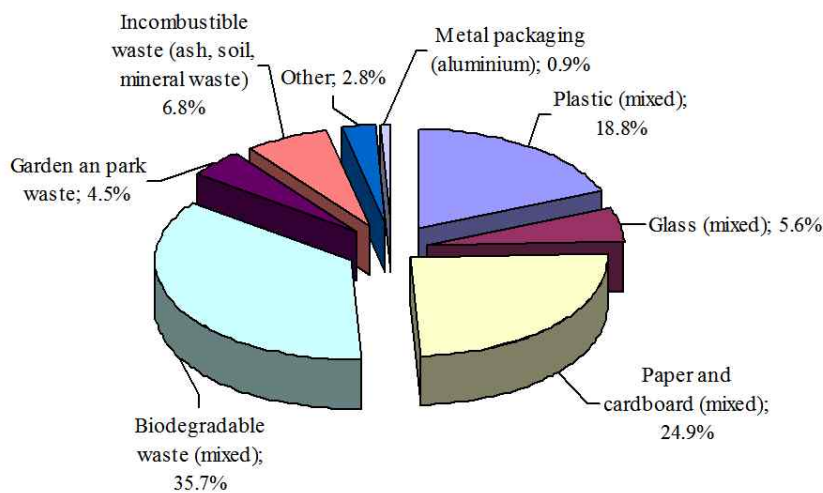
< Ennigerloh 지역 MT 시설 연간 반입폐기물 구성⁸⁾>

연소 가능한 폐기물	85%
기타 폐기물	8%
혼합된 포장폐기물	4%
플라스틱 및 고무	1%
퇴비화되지 않는 폐기물	1%

8. 'Mechanical Biological Treatment Case Study 1: Ennigerloh Germany', Report to IEA Bioenergy Task 36, Nicole Jaitner(2007.4)

□ 유럽 라트비아 폐기물 성상

- 라트비아 잔류폐기물은 플라스틱, 종이, 카드보드 구성 비율이 높아 평균 10.8 MJ/kg으로 열량이 높음⁹⁾
- 라트비아에서는 MBT 공정으로 건조공정 없는 물리적 처리 공정이 제안됨⁹⁾
 - 건조없이 폐기물의 물리적 선별이 가능한 경우 적용됨
 - 기계적 선별 공정은 드럼 선별, 자력 선별, PVC 분리 선별로 구성됨
 - 생물학적 공정은 폭기에 의한 퇴비화임



< 라트비아 폐기물 구성⁹⁾ >

< 라트비아 폐기물 구성 비율 및 발열량⁹⁾ >

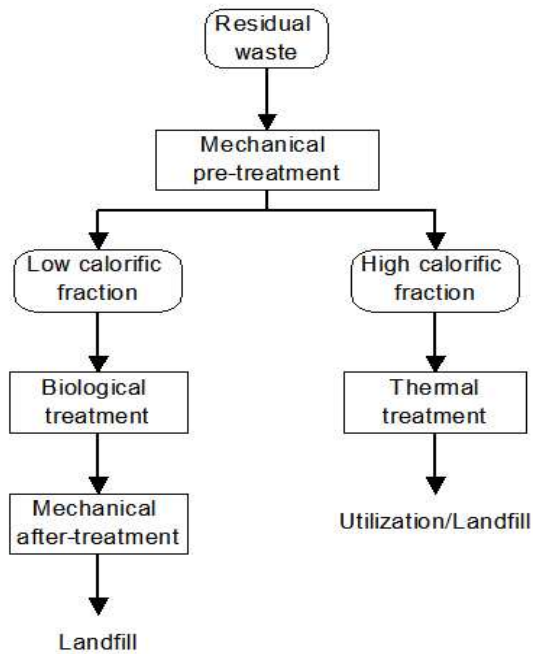
	구성 비율(%)	발열량(MJ/kg)
금속 포장재	0.9	0
플라스틱(혼합)	18.8	32.9
유리(혼합)	5.6	0
종이, 카드보드(혼합)	24.9	11.0
생분해 가능한 폐기물(혼합)	35.7	3.6
정원 폐기물	4.5	3.8
연소불가능한 폐기물	6.8	3.6
기타	2.8	5.8
	100(합계)	10.8(평균)

9. 'Development of mechanical biological treatment of municipal waste in Latvia on the basis of a pilot-project in "Viduskurzeme"', Dipl.-Ing. Joerg Wagner, INTECUS Waste Management and Environment-Integrating Management

○ 수분 함량이 높아 기계적 선별이 어려운 폐기물에 건조 안정화 MBT 공정을 제안함⁹⁾

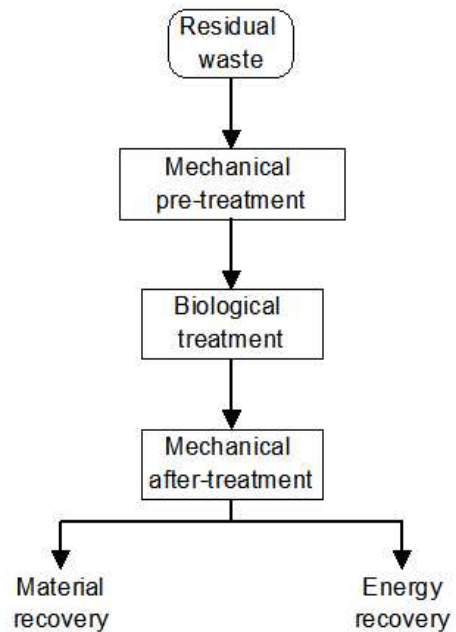
- 폭기에 의한 퇴비화로 생물학적 안정화 후 기계적 선별 실시
- 생물학적 안정화 후 폐기물 크기가 작아져 PVC 분리가 어려운 단점있음

Final rotting process



< 기계적 선별 후 생물학적 안정화 MBT 공정 흐름도⁹⁾ >

Dry stabilization process



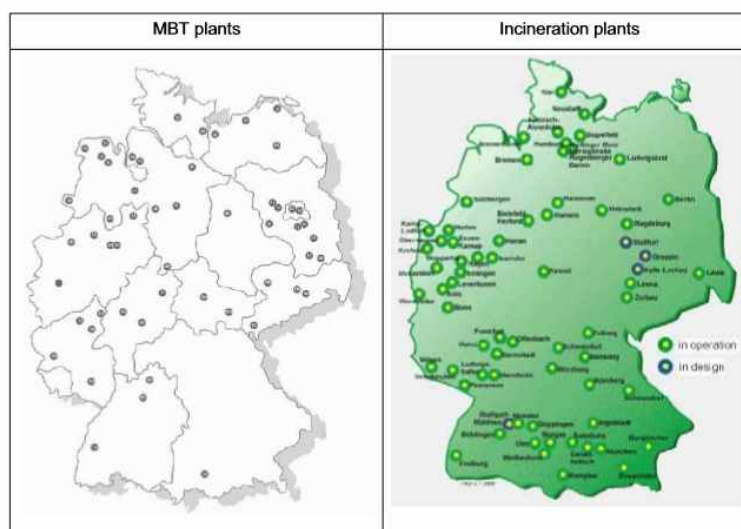
< 건조 안정화 후 기계적 선별 MBT 공정 흐름도⁹⁾ >

○ 독일에서 MBT 투자 비용은 반입폐기물 1톤당 250~360 유로 정도임⁹⁾

- 독일에서 적용하는 RTO 배출가스 처리가 라트비아에서는 필요없어 비용이 낮아짐
- 라트비아에서는 반입폐기물 톤당 150~200 유로 투자 비용이 예상됨

3 소각시설 대비 MBT 시설의 장단점

- MBT 처리 목적은 매립지 사용 기간을 최대화하기 위해 매립되는 폐기물량을 최소화하기 위함¹⁰⁾
 - 생물학적 분해 가능한 폐기물을 전처리하여 매립시 매립가스에 의한 기후 변화 최소화
 - 매립되는 위험한 폐기물을 최소화하여 침출수에 의한 지하수 오염 최소화
 - 물질 선별과 고형연료나 바이오가스 생산에 의한 물질 및 에너지 회수
- 독일 및 중유럽에서는 MBT 시설의 필요요건이 적어 소규모 운전시 경제적 운전 가능¹⁰⁾
- MBT 시설은 반입폐기물 구성 및 양 변화에 소각로보다 덜 민감함¹⁰⁾
- MBT 시설에서 재활용 가능한 물질회수 가능¹⁰⁾
- MBT 처리로 물 및 돌의 연소를 최소화 할 수 있어 고열량 폐기물의 에너지 회수 가능¹⁰⁾
- 소각로의 높은 온도에서의 열적 처리를 MBT에서는 피할 수 있어 유독가스 배출 위험 감소¹⁰⁾
 - RDF 연소시는 해당되지 않음
- 소각로보다 MBT 시설의 주민 반대가 적음¹⁰⁾
- 독일 잔류폐기물은 MBT 시설과 소각에 의해 처리되고 있음¹¹⁾
 - MBT는 대규모 매립지 인근이나 농촌지역에 설치되고 소각로는 인구 밀도가 높은 도시지역에 주로 설치됨
 - MBT 및 소각로에 대한 선호도는 주정부의 정치적 결정에 의해 영향 받음



< 독일 MBT 및 소각로 설치 위치¹¹⁾ >

10. 'Discussion paper on the use of Mechanical Biological Treatment(MBT) to treat mixed putrescible waste', Wasteconsult International(2014.1)

- 자원 수요가 높아지면서 폐기물에서 재활용 가능한 물질 회수가 중요해지고 있음¹¹⁾
 - MBT는 기계적 공정 및 생물학적 공정으로 개별 폐기물 특성에 맞추어 자원 회수할 수 있음
- 폐기물에서 재활용 가능한 물질의 에너지 회수를 위해 MBT는 중요함¹¹⁾
 - MBT 시설은 SRF 연료, 바이오가스, 재활용 가능 물질 회수가 가능하며 매립에 적합하도록 폐기물을 처리할 수 있음
- 독일 15개 MBT 시설의 성능을 조사한 결과 MBT 시설은 고에너지 효율과 탄소 배출 절감 성능이 입증됨⁷⁾
 - 15개 MBT 시설에서 처리된 폐기물이 갖는 에너지 중 32%가 시설 외부에서 사용됨
- 15개 MBT 시설 조사결과에서 독일 모든 MBT/MBS/MPS 시설의 성능을 추정한 결과⁷⁾
 - 약 200만 MWh 전기 생산, 1,500만 MWh 열 및 공정 증기 생산
 - 약 100~140,000 Mg 금속 회수, 플라스틱, 목재, 황산 암모늄 용액 등 물질 회수
 - 110~140 만 Mg CO₂ 온실가스 배출량 저감

< 15개 MBT 시설과 소각 시설 에너지 효율 및 온실가스 배출 비교⁷⁾ >

		MBT		소각로(에너지회수)
		평균	범위	
발열량(MJ/kg)		8.2	6.9~9.8	10.1
에너지효율	전기(%)	18	0~31	10
	열(%)	14	0~40	27
	전체(%)	32	14~51	37
기후	kg/CO ₂ eq	250±30	40~480	120~160

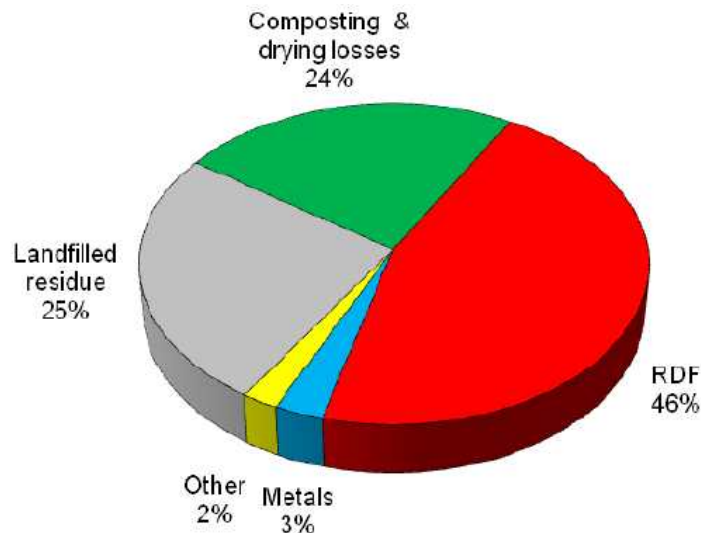
- MBT 생물학적 처리 공정에서 혐기성 소화나 호기성 분해에 의해 유기물이 50~75% 분해됨⁷⁾
 - MBT 처리 후 폐기물 매립시 메탄이 생성될 수 있으므로 메탄산화를 위한 복토층이 필요함
 - MBT 생물학적 처리로 매립지 침출수 발생량이 줄어들고 침출수 TOC, COD, BOD 농도가 90% 이상 낮아짐

11. 'Basics of MBT and waste management system in Germany', WaMatthias Kuehle-Weidemeier, Wasteconsult international, Langenhagen, Germany, International Symposium MBT 2005

III 자원화 분야

○ MBT 설계는 폐기물 구성에 따라 달라짐⁷⁾

- 생물학적 처리 공정은 RDF, 퇴비 및 안정화된 매립물 등 생성물에 맞추어 선택할 수 있음
- 최신 자동 선별 기술로 물질 회수 비율을 과거 2~3%에서 10~15%까지 높일 수 있음
- 유기물이 발생원에서 분리된 경우 생물학적 건조를 적용할 수 있음
- 회수된 물질 품질과 재활용 시장(이동 거리)이 적절해야 자원 회수로의 수입 발생



2001~2010년 독일 15개 MBT 시설 생산물 비율⁷⁾

○ RDF는 RDF 전용 연소시설, 시멘트 킬른 및 석탄 화력발전소에서 사용될 수 있음⁷⁾

- 연소 시설에는 낮은 품질의 RDF를 연료로 사용할 수 있음
- 발열량이 높은 RDF 연소시 수냉 그레이트 시스템이 구비된 소각로에서 사용될 수 있음

○ RDF 유동상 연소 시스템에서 발열량 높은 RDF가 연소될 수 있음⁷⁾

- RDF는 최대 입자 크기, 금속 및 불활성 함량의 조건이 준수되어야 함

○ 시멘트 킬른에서 RDF를 사용하기 위해 입자 크기가 20~30 mm 미만으로 처리되어야 함⁷⁾

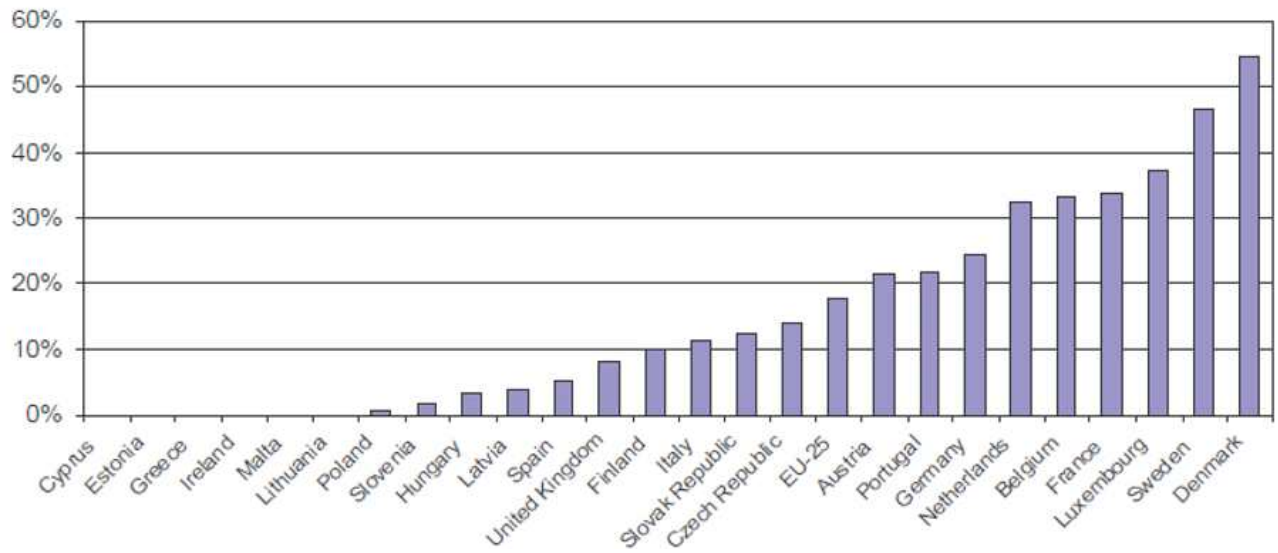
- RDF 발열량은 가능한 높고 염소 함량은 0.7% 미만으로 낮아야 함

○ RDF가 석탄 화력발전소에 사용되는 비율은 적지만 사용되는 RDF 양은 상당함⁷⁾

○ RDF는 폐기물로 분류되어 소각로 배출가스 처리 기준이 RDF 연료 사용시설에 적용됨⁷⁾

- 소각로 배출가스 처리는 비용이 높고 RDF를 연료로 사용하는 경우 비용 상승
- 시멘트 킬른에서는 RDF를 무상으로 반입하거나 일부는 RDF 판매로 약간의 수익 발생

2. 유럽 폐기물 성장 및 MBT 시설 특성



< EU 25개국 폐기물 소각 비율(2008년 기준, EUROSTAT) >

4 MBT 시설의 법적 기준

□ 오스트리아 MBT 법적 기준

○ 오스트리아 MBT 시설 환경 기준은 다음과 같음⁷⁾

< MBT 시설 배출기준(2002년 오스트리아 MBT 가이드라인)⁷⁾ >

MBT 배출기준 항목		MBT 배출기준
총탄소 유기물질	- 30분 평균	40 mg/m ³
	- 일일 평균	20 mg/m ³
	- 질량비	100 g/t _{폐기물}
NO ₂ 의 질소산화물	- 30분 평균	150 mg/m ³
	- 일일 평균	100 mg/m ³
암모니아		20 mg/m ³
다이옥신/퓨란		0.1 ng/m ³
총 먼지		10 mg/m ³
악취		500 악취/m ³

○ 오스트리아 매립 지침에 의하면 MBT로 처리된 폐기물 건기준 열량이 6,600 kJ/kg 미만이면 매립가능함⁷⁾

- 총열량 기준은 폐기물에너지화 플랜트에서 에너지 높은 연료를 사용하도록 하기 위함

< MBT 처리공정 후 잔재물의 매립기준(2002년 오스트리아 MBT 가이드라인)⁷⁾ >

특성 인자	기준값
4일 후 호흡도	7 Mg O ₂ /g TS
21일 후 인큐베이터 테스트에 의한 가스 생산	20 NI/kg DS
21일 후 발효 테스트에 의한 가스 생산	20 NI/kg DS

□ 독일 MBT 법적 기준

○ 독일에서는 MBT 시설에서 처리 후 잔재물을 매립하기 위해 필요한 요건으로 TOC, 최대발열량, 호흡도 기준 준수가 필요함⁷⁾

2. 유럽 폐기물 성상 및 MBT 시설 특성

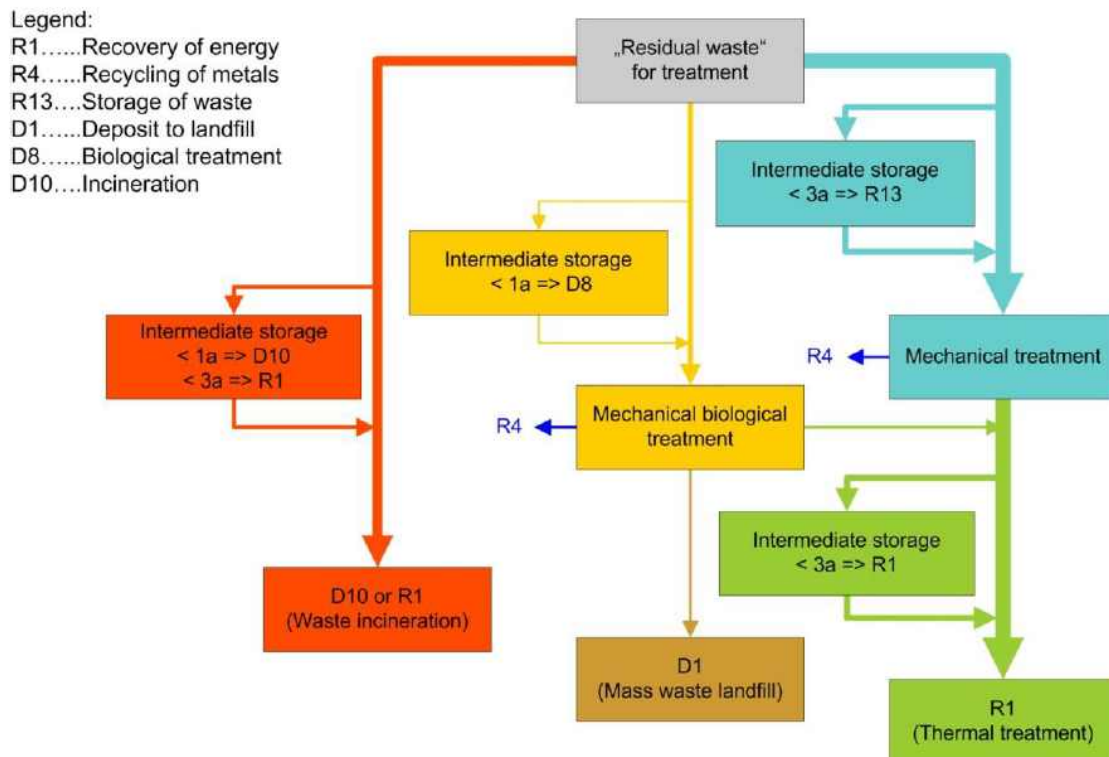
< MBT 처리 후 폐기물을 매립하기 위한 독일 기준⁷⁾ >

특성인자		매립지 1등급	매립지 2등급
건조 잔류물의 유기물 함량	연소 손실 기준	≤ 3%(질량)	≤ 5%(질량)
	TOC 기준	≤ 1%(질량)	≤ 3%(질량)
총열량(Ho)			≤ 6,000 kJ/kg
TOC			≤ 300 mg/L
건조 잔류물의 생분해도	호흡도		≤ 5 mg/g
	발효 테스트로 생산된 가스 비율		≤ 20 l/kg

5 MBT 잔류폐기물 처리 현황(오스트리아, 독일)

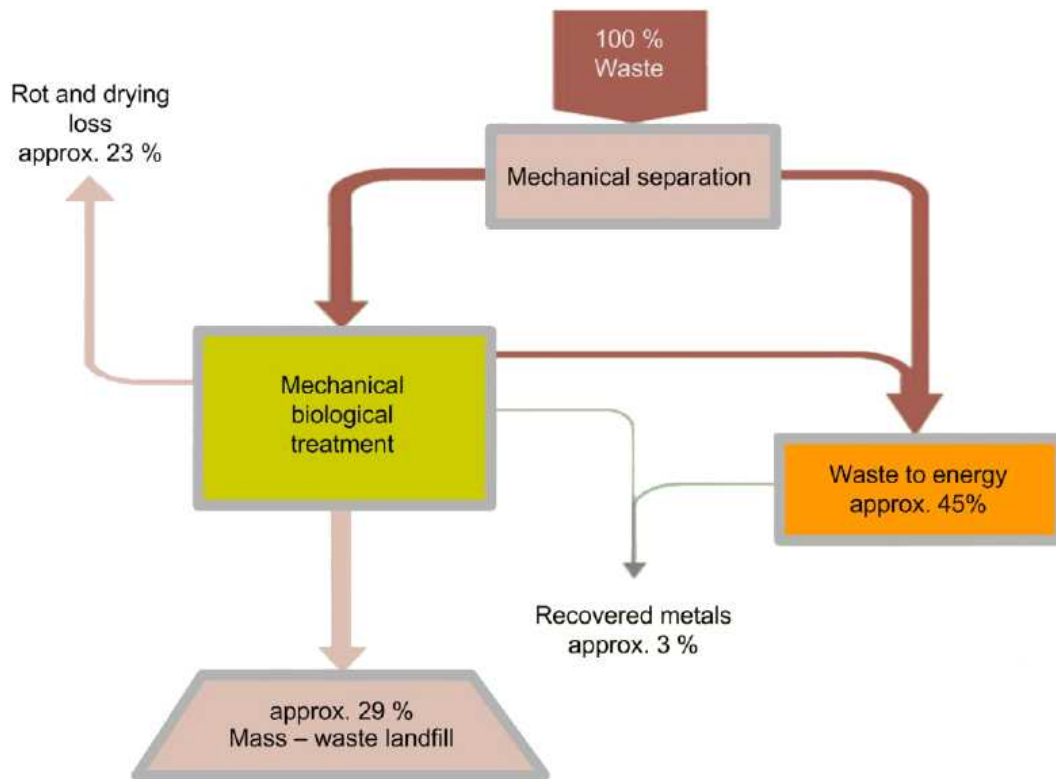
□ 오스트리아 잔류폐기물 처리 현황

- 1988년 매립세가 도입되어 폐기물 반응도 및 재활용 정도에 따라 매립세 차별 부과⁷⁾
- 1997년부터 총유기탄소(TOC) 5% 초과 폐기물의 매립 금지 도입⁷⁾
 - 2003년까지 기존 매립지에 총유기탄소 기준 적용을 위한 유예기간 허용
- 2001년 7월 16일 유해한 폐기물 매립 금지 실시⁷⁾
- 잔류 폐기물 처리를 위해 최근 폐기물 소각이 급속히 증가되고 있음⁷⁾
- 오스트리아에서는 처리되지 않은 폐기물의 매립금지로 다음과 같은 처리 방법이 허용됨⁷⁾



< 오스트리아 잔류폐기물 적정 처리 방법⁷⁾ >

- 오스트리아에 2009년 약 390만톤 폐기물이 발생되어 재활용 가능한 물질은 분리 수거되고 약 170만톤 잔류폐기물이 발생됨⁷⁾
 - 약 130만톤은 소각 처리되고 약 40만톤은 MBT 플랜트에서 전처리됨
- 금속 등 물질 회수를 위한 기계적 선별 처리와 폐기물 에너지화 플랜트는 증가 추세에 있음⁷⁾
- 오스트리아 MBT 플랜트에 평균적인 물질 흐름은 다음 그림과 같음⁷⁾



< 오스트리아 MBT 플랜트 물질 흐름⁷⁾ >

○ 오스트리아 MBT 시설 처리 목적은 다음과 같음⁷⁾

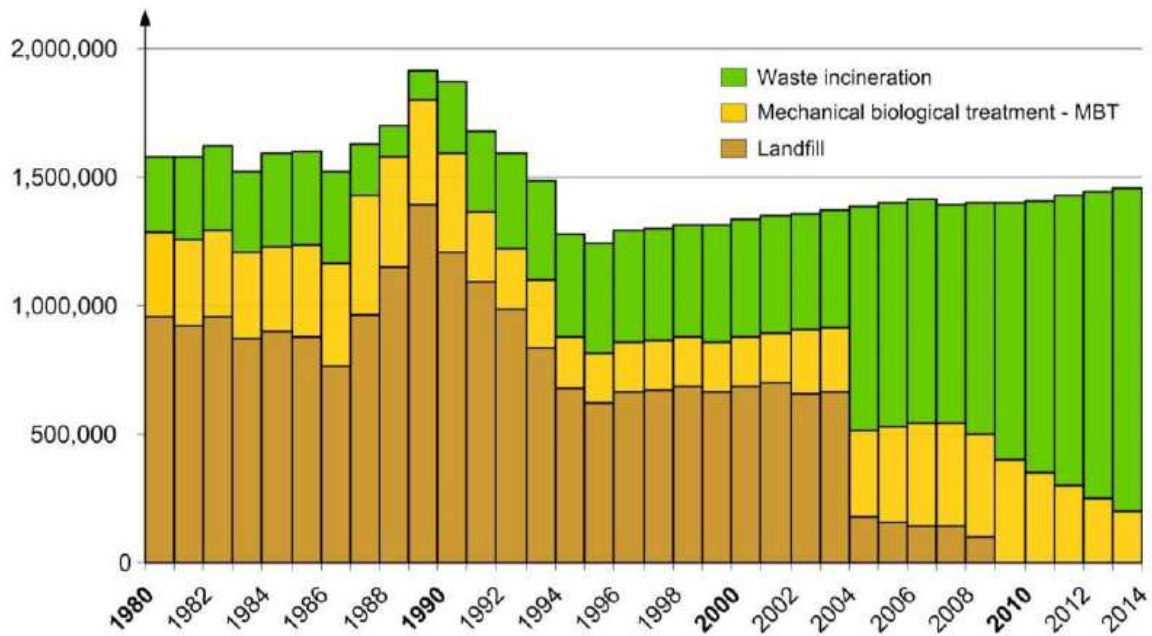
- 매립 전 매립기준(폐기물 최대 발열량 및 DOC) 준수를 위해 폐기물 전처리 및 안정화 목적
- 폐기물 에너지화 플랜트인 유동상 시스템에서 폐기물 열적처리
- RDF 생산(시멘트 생산에 연료로 사용)
- 폐기물 퇴비 및 토양개량제 생산

○ 안정화된 퇴비 생성물은 사용이 제한적이므로 퇴비 판매로 인한 수입은 극히 제한적임⁷⁾

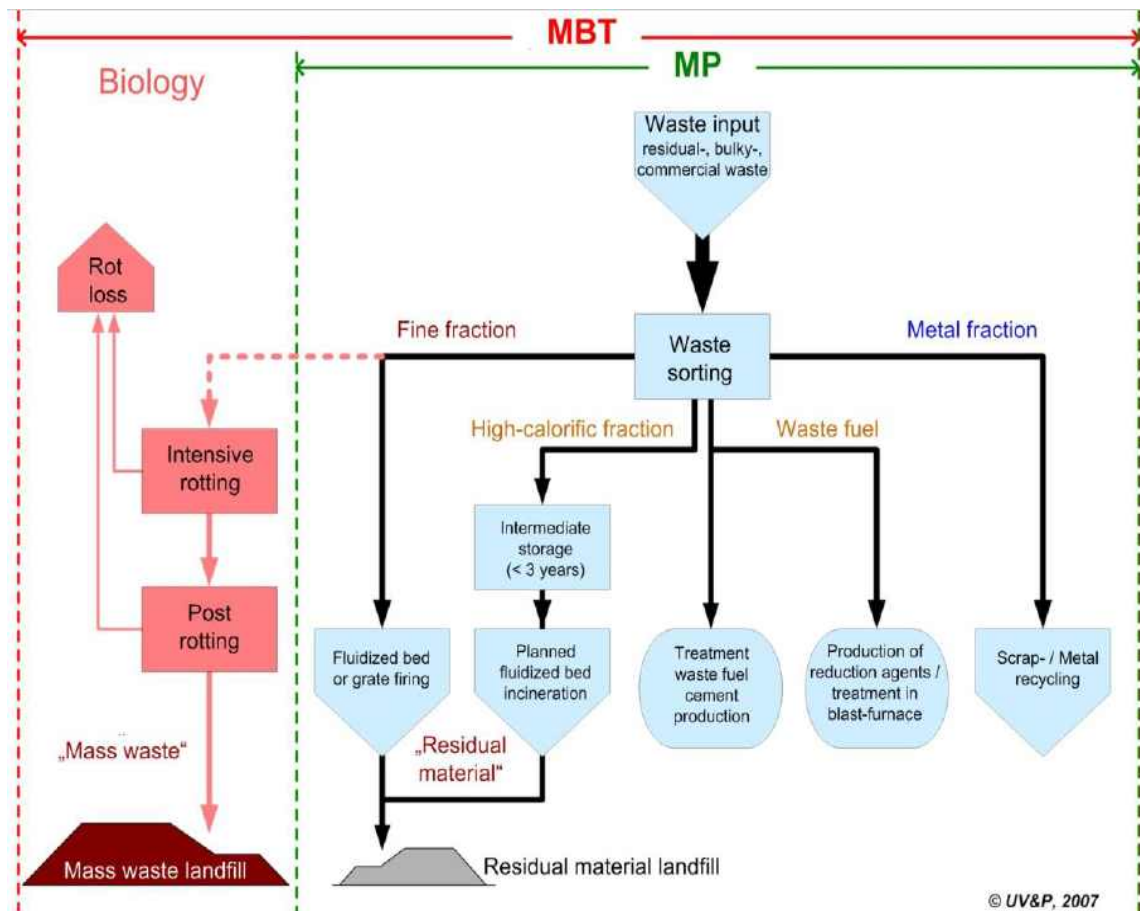
○ 오스트리아에서는 2009년 이후 매립되는 양은 거의 없고 소각되거나 MBT 시설에서 처리됨⁷⁾

III 자원화 분야

Figures expressed in tons per year



< 1980년부터 2013년까지 오스트리아 잔류폐기물의 발생 및 처리 추이⁷⁾ >



< MBT 시설 폐기물 처리 및 에너지 회수 공정도⁷⁾ >

- 최근 폐기물에너지화 소각 플랜트가 증가됨⁷⁾
 - 16개 유동형 소각 플랜트에서 폐기물을 소각하거나 혼합 연소하고 있음
 - 2009년 기준 거의 모든 폐기물이 유동상 시스템에서 소각되었음
- 연소되는 폐기물 중 약 7% 만이 시멘트 생산 대체 연료로 혼합연소되고 있음 (2012년 약 456,000톤)⁷⁾
 - 발열량 높은 일부 폐기물만이 시멘트 생산 연료로 사용됨

□ 독일 MBT 시설 현황¹²⁾

- 독일에서는 46개 MBT(30개), MBS(13개), MPS(3개) 플랜트에서 연간 5,759,600톤이 처리되고 있음
 - MBT(Mechanical-Biological Treatment) 플랜트에서는 기계적 분리선별로 물질을 회수하고 RDF 연료를 생산하며 작은 입자 폐기물은 생물학적 처리(분해 및 소화)하여 매립 기준 준수
 - MBS(Mechanical-Biological Stabilization) 플랜트에서는 전체 폐기물을 생물학적으로 건조하여 유기물 함량을 줄인 후 기계적 분리 선별함
 - MPS(Mechanical-Physical Stabilization) 플랜트에서는 화석연료를 사용하여 폐기물을 건조기에서 건조함
- MBT 플랜트에서 생물학적 처리 공정으로 터널형 호기성 분해, 건식 소화, 습식 소화, 박스·채널·건초의 더미(windrow), percolation이 적용되고 있음
 - MBT 플랜트에서 생물학적 처리로 안정화된 폐기물은 2등급 매립지에서 매립됨
 - 매립가스 생성이 최소화되고 1.3톤/m³ 밀도로 압밀될 수 있으며 침출수 생성량이 절감됨

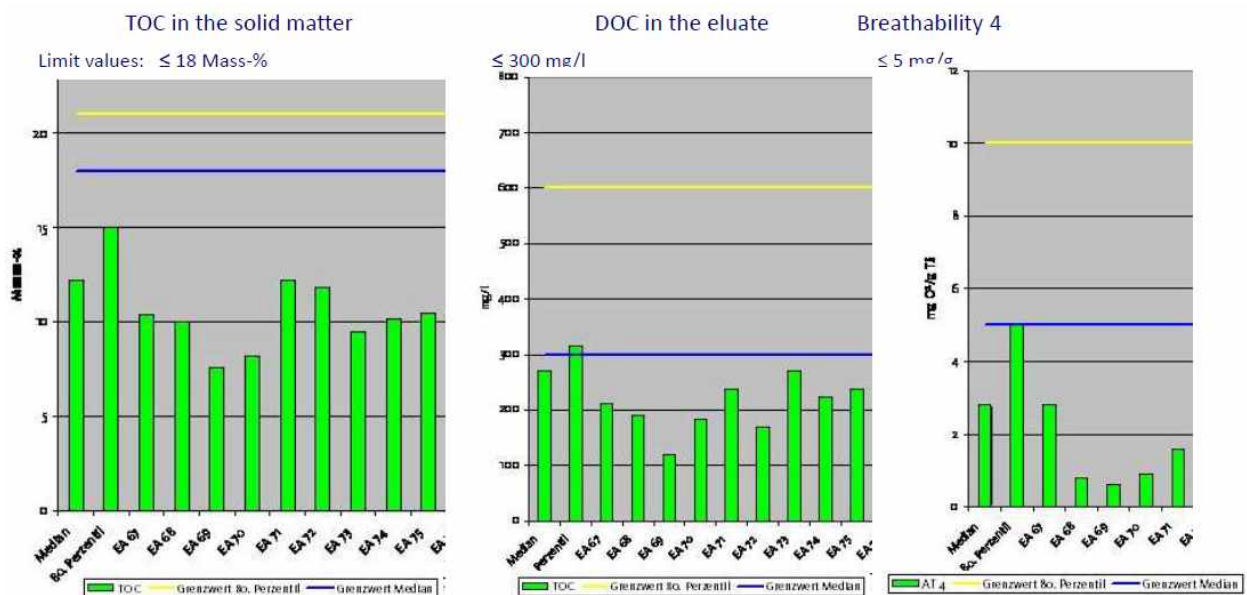
< 독일 30개 MBT 플랜트 생물학적 공정 구성 >

30개 MBT 플랜트	생물학적 처리 공정	구성 비율
	터널형(10~15주 호기성 분해)	55%
	건식 소화(3주, 90~120 m ³ /톤 폐기물)	21%
	습식 소화(습식 소화 3주, 호기적 안정화 5일)	15%
	박스, 채널, 건초의 더미	6%
	percolation	3%

12. 'Mechanical-Biological waste Treatment(MBT) Actual state of affairs and perspective in Germany', Ennigerloh(2011.5.19.)

III 자원화 분야

- 독일 MBT Ennigerloh 시설에서 전처리 후 폐기물 TOC, 용출액 DOC, 호흡도가 거의 매립기준 한계 수치 미만으로 측정됨



< 독일 Ennigerloh MBT 시설 전처리 후 매립전 폐기물 매립기준 항목 분석 >

- MBS 플랜트에서는 전체 반입폐기물을 생물학적 건조 처리 후 기계적 분리선별함
 - 폐기물 수분 함량을 약 40%에서 약 20% 정도로 낮출 수 있음
 - 터널, 채널이나 컨테이너에서 생물학적 건조 후 폐기물 기계적 선별 효율이 높아짐
- MPS 플랜트에서는 폐기물을 화석연료로 건조하는 공정이 기계적 공정에 사용됨
 - 다단계 선별 공정으로 오염물을 분리할 수 있음
- MBT 시설 배출가스 처리를 위해 바이오필터와 공기 세척이 사용되거나 먼지 필터가 사용되고 산 스크리버, RTO 등이 같이 사용되기도 함
 - 이에 MBT 시설 배출가스는 독일 배출 기준을 준수하고 있음
- MBS 플랜트에서는 전체 폐기물이 생물학적 건조된 후 기계적 선별분리됨
 - 폐기물 수분 함량이 약 40%에서 약 20%로 감소되며 미생물 분해열로 수분이 증발됨
 - 생물학적 건조 후 선별분리가 용이해짐
- MPS 플랜트에서는 화석연료로 폐기물을 건조하고 선별 분리함
 - 생물학적 처리없이 기계적, 물리적인 공정으로 물질 종류별로 선별됨
 - 다단계 선별 공정으로 물질 회수

참고문헌

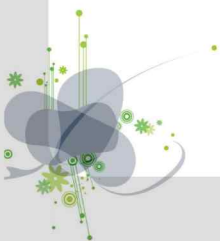
1. 'Integrated waste management of MSW across Europe Waste to Energy as a professional route to treat residual waste', Jan Manders Deputy President CEWEP, Houthalen Helchteren 16 October 2013
2. 'Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe', EUROPEAN COMMISSION, Brussels, 2.7.2014
3. 'Municipal waste treated in Europe', Eurostat(2015.7)
4. 'Managing municipal solid waste, a review of achievements in 32 European countries to treat mixed putrescible waste', EEA Report No 2(2013)
5. 'Waste Profiling', FhG-IBP (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.), March 2014
6. European Environment Agency (EEA): Managing municipal solid waste - a review of achievements in 32 European countries (EEA report, No 2/2013). Publications Office of the European Union, Luxembourg (2013)
7. 'Analysis of the EU Acquis and Bulgarian Legislation on the Biowaste Management and the Residual Fraction of Household Waste, Part III Residual Waste Management Strategy, Final Report – 10', Franz Neubacher, September 2012
8. 'Mechanical Biological Treatment Case Study 1: Ennigerloh Germany', Report to IEA Bioenergy Task 36, Nicole Jaitner(2007.4)
9. 'Development of mechanical biological treatment of municipal waste in Latvia on the basis of a pilot-project in "Viduskurzeme"', Dipl.-Ing. Joerg Wagner, INTECUS Waste Management and Environment-Integrating Management
10. 'Discussion paper on the use of Mechanical Biological Treatment(MBT) to treat mixed putrescible waste', Wasteconsult International(2014.1)
11. 'Basics of MBT and waste management system in Germany', WaMatthias Kuehle-Weidemeier, Wasteconsult international, Langenhagen, Germany, International Symposium MBT 2005
12. 'Mechanical-Biological waste Treatment(MBT) Actual state of affairs and perspective in Germany', Ennigerloh(2011.5.19.)



자원화 분야



3. 해외 폐자원에너지타운 관련 사례



세부목차

1. 해외 폐자원에너지타운 사례	177
2. 해외 폐자원에너지타운 관련 에너지 지원 정책	184
참고문헌	187

1 해외 폐자원에너지타운 사례

1-1. 독일 괴팅겐 '유크(Juhnde) 마을'^{1,2)}

- 마을 개요 : 니더작센 주 괴팅겐시 15분 거리 위치한 농지 1,300 ha, 산림지 800 ha, 약 200세대(약 750명) 거주
- 마을 장점 : 도농교류 가능, 농경지와 산지에 충분한 양의 바이오매스 연료 확보 가능, 다양한 주민조직 운영
- 사업추진 방식 : 주민협동조합 방식(주민의 70% 협동조합 가입)
- 시설종류 : 혐기성 소화를 통한 바이오가스 생산시설, 목질 보일러(겨울철용), 마을 열배관망
 - 바이오매스 열병합 발전소 건설(5,000 MWh/년) : 가축분뇨, 건초를 발효하여 메탄생성
 - 9호의 농가에서 1,30 ha의 농지 경작하여 밀과 옥수수 등 건초 생산
 - 6호의 축산농가에서 40여 마리의 소와 돼지 사육 및 축산분뇨 30 m³/일 공급
 - 800 ha 숲에서 추가 난방에 필요한 목재(400톤/년) 공급(재생되는 수목 양의 10% 정도)



< 바이오 에너지 마을 독일 유크 마을^{2,3)} >

1. '친환경 에너지타운 추진을 위한 국내외 추진현황 검토 및 정책과제 연구', 국토연구원, 왕광익, 노경식, 2014
 2. '친환경에너지타운 업무 매뉴얼', 환경부, 2015.9

III 자원화 분야

○ 생산 에너지 형태 및 생산된 에너지 활용 현황 : 열 활용 및 전기 생산

- 지역 주민의 70%(142가구)가 열병합발전(700 kWh)과 목질보일러(550 kWh)에서 생산한 열을 지역난방시스템으로 공급받음
- 전력생산 과정에서 발생한 열과 온수(연간 생산량 6,00 MWh, 연간 소비량 4,000 MWh)는 6 km 배관망을 통해 각 가정에 0℃, 최대 4.5 bar 압력으로 공급됨
- 전기 판매로 연간 약 13억 6천만원 수익 창출 및 3,300톤의 이산화탄소 감축 효과

1-2. 독일 바덴-뷔텐베르크 주 ‘마우엔하임’¹⁾

○ 시설종류 : 가축목장에서 수거한 축산분뇨 이용하여 바이오가스 생산, 우드칩 시설

○ 생산 에너지 형태 및 생산된 에너지 활용 현황 : 바이오가스로 발전 및 열 공급망 수송

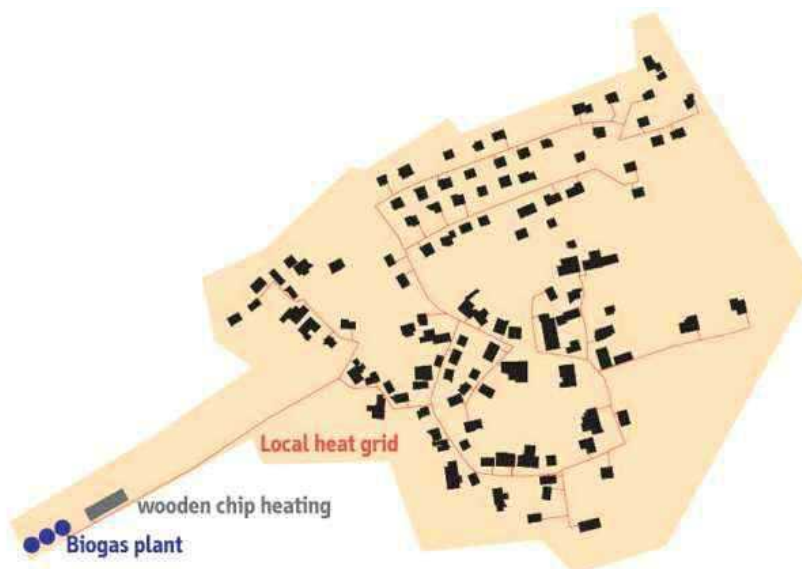
- 바이오가스 시설 및 우드칩 시설 : 약 200만 kWh 전기 생산
- 재활용 가능한 폐열로 약 180만 kWh 전기 생산

○ 에너지 지원 정책

- 재생에너지를 활용해 생산된 전력을 전력회사에서 구입하도록 규정
- 차액은 정부에서 지원하여 20년간 최저가격 보장

○ 에너지 활용 현황 : 독일의 바이오 에너지 마을은 열병합 발전기에서 생산된 전력으로 마을에 에너지 자급 및 잉여 전력 전력회사에 판매

- 주민들의 참여로 법인설립 및 자금 조달



< 마우엔하임의 내부 열 공급망²⁾ >

3. '녹색도시 협력체계 관련 국내외 사례조사', 성균관대학교 녹색도시건축연구센터(2014.11)

1-3. 오스트리아 뮈레크(Mureck)¹⁾

- 마을 개요 : 오스트리아 동남쪽 끝 슬로베니아와 인접한 농촌마을
 - 슬로베니아 국경에 위치하여 에너지 및 식량 자급 필요(약 1,700명)
 - 주민의 주도로 인근대학(그라츠), 정부, 컨설팅 업체의 협력관계 구축
- 시설종류 : 바이오디젤 판매 전용 주유소, 우드칩 이용 지역난방, 가축분뇨 바이오가스 생산 및 전기생산, 태양열 전력생산
- 에너지 활용 현황 : 자체적으로 생산하는 바이오디젤로 차량 연료 공급 및 지역 난방 해결 후 남은 에너지 외부 판매
 - 170% 에너지 자립 성공
 - 뮈레크 마을과 그라츠 시에서 수거한 폐식용유로 바이오디젤을 연간 1,000만 L 생산하여 100여개의 지역에 차량용 연료 제공(연매출 1,000만 유로 달성, '11년)
 - 약 510여개 농가에서 재배한 유채로 바이오디젤을 생산하고 바이오디젤과 유채 찌꺼기(유박)를 농민에게 공급
 - 농민은 유박을 돼지사료로 활용하고 돼지 분뇨는 바이오가스회사에서 메탄을 만들어 전기 생산하여 오스트리아 전력공사에 판매
 - 바이오가스 시설 액비는 농장에서 유기질 비료로 활용(물질 순환)
- 바이오가스 플랜트⁴⁾
 - 원료 : 액체 비료, 가공하지 않은 식물 원료, 옥수수, 사일리지(가축의 겨울 먹이), 글리세린(바이오디젤 부산물)
 - 바이오가스 원료는 반경 6 km 지역에서 재배됨
 - 생산된 전력은 계통연계를 통해 판매되고 열은 지역난방시스템을 통해 전달됨
 - 에너지 원료에서 생산, 판매, 수익 지역의 환원으로 지역 중심 자원·에너지·경제 순환 시스템 구축
- 에너지 지원 정책
 - 오스트리아 국가 투자기금 50%와 농부들의 투자금으로 바이오디젤회사 설립
 - 지방정부 및 지역차원 재정지원

III 자원화 분야

< 무레크 마을 에너지시설 추진체계 >

구분	바이오디젤회사 (SEEG)	지역난방회사 (나베르메)	바이오가스회사 (외코스트룸)
운영	570명 주민 투자자 - 120만 유로 공동투자 - 정부 30% 지원	SEEG+2명의 농부 투자 - 난방파이프 : 국가 50% + 주민 50%	니베르메 + 7명의 농부투 자
원료	농가에서 재배한 유채 (10%), 마을에서 30 km 떨어진 그라츠시에서 수거한 폐식용유(90%)	숲에서 간벌한 잡목, 폐 목재 이용한 열병합 발 전	인근 20여개 돼지 농장의 분뇨 및 인근 농장 옥수 숫대, 밀짚, 유채대 등 혼 합하여 메탄 생산
연간 생산량	1천만 L	8,500 MHW	8,400 MHW
용도	무레크 지역 자동차 연료 공급 및 타 지역 판매	무레크 지역 난방 85% 공급	무레크 지역 전력 100% 공급



< 무레크 에너지파크 전경 >

1-4. 오스트리아 비엔나 슈퍼텔라우 소각장¹⁾

○ 시설종류 : 소각장

- 연간 250,000톤의 폐기물을 처리하여 60 MW 증기(지역난방 공급) 및 전기 생산

4. '친환경에너지타운 조성을 위한 새로운 정책개입 방안', 과학기술정책연구원, 장영배, 이정필, 조보영(2014.03)

3. 해외 폐자원에너지타운 관련 사례

- 에너지 활용 현황 : 생산된 전기는 소각시설 자체 사용 및 인근 6만여 세대 급탕을 무상 공급(아파트 37% 공급)
 - 급탕 무상공급으로 아파트 난방비가 절감되어 아파트 가격 상승
 - 잉여 전기는 판매하여 환경에 재투자
- 소각장을 리모델링 하여 소각장을 예술의 경지로 끌어올려 비엔나의 관광지로 부상하여 경제적 효과 도모
 - 시민들이 소각처리과정을 감시할 수 있는 전광판 설치
 - 다이옥신과 악취가 발생하지 않도록 최첨단 기술 도입



< 비엔나 슈피텔라우 소각장 리모델링 전(좌) 후(우) 모습²⁾ >

1-5. 오스트리아 귀싱¹⁾

- 마을 개요 : 28개 마을 구성, 지역 인구 2만 7천명(귀싱시 4천여명)
 - 40여개의 재생에너지 시설이 운영되어 필요 전기의 2배 이상 생산
 - 지역정부 주도로 에너지자립
- 시설종류 : 바이오매스 열병합 발전소
- 에너지 활용 현황 : 옥수수과 풀을 발효시켜 만든 메탄가스로 인근 천2백 가구에 전기와 난방열 공급
 - 난방수요의 85%, 전력수요의 150%에 해당하는 열, 전력 생산
 - 난방용 열 기업들에게 저렴하게 제공하여 새 기업 유치 도모
 - 목재 2.5톤을 태워 2 MW의 전기와 4.5 MW의 난방용 열 획득
 - 남은 전기와 열 팔아 얻는 수익은 한 해 250만 유로(약 36억원)로 10년 지나면 투자금 회수 가능 전망



< 귀성의 바이오퉴크놀로지를 활용한 발전소²⁾ >

1-6. 일본 오가와마치 마을¹⁾

○ 시설종류 : 음식물쓰레기 바이오가스 플랜트 시설

- 연간 3,600 m³ 바이오가스 생산

○ 운영방식

- 오가와마치 지방정부로부터 음식물쓰레기 처리 대가로 연간 100만엔의 운영 위탁금 받음
- 음식물쓰레기를 보내주는 가정에 로컬머니 3,000엔을 돌려주어 지역시장에서 사용할 수 있게 함
- 부산물인 유기성 퇴비는 2,000엔/톤에 판매
- 바이오가스 생산으로 연간 화석연료 238톤 대체, 188톤 화학비료 대체효과, 182톤 쓰레기 연소 연료 절약 효과

1-7. 일본 오사카 마이시마 소각장¹⁾

○ 에너지 활용 현황 : 전기 생산과 자원 판매로 재정적 수입 확보

- 공장의 전기와 조명은 자체 생산한 전기로 가동하고 남은 전기는 전기회사에 판매하여 연간 90억원 수익 창출
- 타지 않는 쓰레기는 잘게 잘라서 텍스타일과 알루미늄으로 분해하고 분리하여 비철금속으로 판매하여 약 11억원의 수익 창출
- 소각장 1년 예산은 169억원이나 전기수익 90억원, 자원재활용 수입 11억원, 쓰레기 차량 반입수수료 등 182억원으로 수익 창출

1-8. 일본 이와테 현 쿠즈마키¹⁾

- 마을 개요 : 일본 이와테현 쿠즈마키 산지(면적 : 434.99 km²)에 2,733 세대 거주
- 시설종류 : 축산바이오매스 발전, 목질계 바이오매스 발전, 풍력발전, 태양광발전
 - 축산분뇨 이용한 바이오가스 발전 및 축분뇨와 목질계 바이오매스를 혼합한 메탄 발효 이용

1-9. 해외 폐자원에너지타운 성공요인¹⁾

- 선진국에서는 친환경 에너지 자립에서 주민 소득 증대로 성공적인 운영
- 국가의 정책적 지원이나 보조금보다 민간 주도화 주민들의 적극적인 참여가 필수적임
 - 자발적인 협동조합 및 법인회사 설립을 통한 수익창출 및 이익금을 재투자하는 선순환 자립 경제구조 구축
- 풍부한 에너지화 자원(축산분뇨, 목질계) 보유로 규모의 경제 달성
- 기획 단계부터 에너지화 자원 고려한 경제성 분석 등을 장기간 수행하여 성공 확률 극대화

2 해외 폐자원에너지타운 관련 에너지 지원 정책

2-1. 폐기물 정책과 에너지 정책과의 연관성⁵⁾

- OECD 29개국의 2008년도 신재생에너지 공급량은 약 38,356만TOE로 각국의 1차 에너지 공급량의 평균 14.7% 정도임
 - 신재생에너지 의존 비율은 미국 5.3%, 독일 4.6%, 일본 3.2%, 덴마크 18.5%, 프랑스 7.5%, 영국 2.8%임
- 폐자원에너지화 정책을 폐기물 정책 또는 에너지 정책의 일환으로 다루고 있음
 - 유럽은 발전된 기술을 토대로 공급사업자 중심의 바이오매스 생산 및 보급확대, 기술개발과 실증을 지원하는 프로그램을 각국 또는 EU 차원에서 마련하고 있음
- 2007년 G8 정상회의에서 “EU기후변화 패키지” 수립
 - 2020년까지 1990년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하고 에너지 효율성을 20%까지 증진하고, 전력생산에 있어 재생에너지의 비율을 30%로 확대하며, 재생 에너지를 이용한 지역 난방비율을 14%로 확대 목표 설정
- 독일은 2050년까지 전체에너지 가운데 80% 이상을 대체에너지에서 생산 목표
 - 재생에너지의 종류별 지원액을 합리적으로 조정 운영하여 전력생산의 재생에너지 비율 증진
- 영국은 2020년까지 화석연료의 15%를 재생에너지로 대체 목표
 - 바이오가스와 바이오메탄 주입은 이 목표 이행에 가능성이 있는 기술로 평가하여 2015년까지 바이오메탄의 7 TWh 주입을 계획함
- 오스트리아는 최종 에너지 총소비 대비 재생에너지 공급 목표 할당량을 2020년까지 34%로 함
- 프랑스는 2020년까지 바이오가스 에너지로 555 kTOE 열량을 생산하고 625 MW 전력시설을 설치하고자 함

5. '유기성폐자원의 효율적 에너지화를 위한 관리체계 구축방안 연구', 한국환경정책평가연구원, 한상운 (2013.03)

2-2. 폐기물에서 에너지 생산시 인센티브 현황⁵⁾

○ 유럽지역 폐기물 에너지화 지원 정책

- 영국과 프랑스는 발전차액지원제도(feed-in tariff), 독일은 열병합발전시설에 대한 발전차액지원제도, 스웨덴과 스위스는 시장주도 발전에 관한 정책적 지원 실시
- 유럽은 바이오가스를 직접 배관에 주입하거나 고질화한 바이오메탄을 유통하는 체계를 운영 중임

○ 독일은 '재생에너지법(EEG 2000)'의 발전차액지원보장 제도 운영

- 재생에너지 발전사업자를 직접 지원하기보다 만들어진 재생에너지를 시장에서 우선적으로 소비될 수 있도록 하기 위해 제도 운영
- 전력사용이 높은 업체들이 재생에너지 생산업체에서 제공하는 전기를 의무적으로 구입하고 비용 일부를 면제해주는 발전차액지원보장제도를 운영함으로써 20년간 수익을 보장하여 사업의 안정적 유지 가능(사업의 안정성 확보)
- 2000년 제정 당시 EEG는 20년간 발전차액지원제도를 보장하되 운전시작 시부터 매년 1%씩 감소하는 정책 시행
- 소규모시설에 대한 지원을 강화하는 등 발전규모별 차등지원제도 실시

○ 네덜란드는 생산비용과 에너지 가격 차이에 해당되는 발전차액 보조금을 12년간 지원하고 있음

- 네덜란드는 약 130개의 바이오가스 시설과 13개의 바이오메탄 시설을 운영 중임
- 매립가스, 유기성폐기물과 산업폐기물에서 발생된 가스 및 농업기반 바이오매스에서 발생된 가스를 그리드에 주입함
- 천연가스 공급 그리드가 확산되어 있고 낮은 열량의 일반가스 이외 고열량 가스 수송 파이프라인 시스템이 있음

○ 영국은 발전차액지원제도 및 재생에너지의무제도 실시

- 국가가스그리드에 주입된 바이오메탄에 대한 재생 열에너지 인센티브 제공
- 하수에서 발생한 바이오가스는 최고 가스 가격으로 지원금 지급(6.8펜스/kWh)
- 재생에너지의무제도로 영국 전력 공급자들이 재생에너지원으로 발전한 전력 비율을 높이도록 하며 재생에너지원에 따라 발전 MWh 당 재생에너지 의무이행 증명서 부여
- 발전차액지원제도는 5 MW까지의 소규모 전력시설에 재정적 지원 제공
- 바이오가스에서 발생한 전력은 시설 규모에 따라 kWh당 9.4~14펜스를 지원받고 전체 전력 가격에 대한 지원금을 받음

III 자원화 분야

○ 오스트리아 발전차액지원 실시

- 2012년 농업기반 바이오가스 시설에 대한 발전차액지원은 kWh당 13~18.5 유로 센트임
- 15년 동안 발전차액제도를 유지하고 20년 동안 후속 발전차액제도 허용
- 지방정부는 재생에너지, 에너지절약 및 효율성있는 시설 및 조치에 대해 투자금으로 연간 7백만 유로 예산 받음

○ 프랑스는 2011년부터 바이오메탄 가스에 대한 발전차액제도 도입

- 발전차액은 시설 용량에 따라 6.4~9.5 유로센트/kWh 지원
- 바이오가스 에너지 효율적 사용에 대해 최대 4유로센트/kWh 장려금 지원
- 발전차액제도 이외 프랑스 환경청, UE 펀드 또는 지역위원회 보조금 제도 등이 있음

○ 일본에서 폐기물 처리업자 등이 실시하는 고효율 폐기물 에너지 이용 시설 및 바이오매스 이용 시설의 정비 사업에 보조 시행

< 일본 폐기물에너지화 보조금 지원 대상범위 및 지원수준⁶⁾ >

대상범위	지원수준
폐기물 고효율 열 회수 바이오매스 발전 바이오매스 열공급 바이오매스 열병합발전 폐기물 연료 제조 바이오매스 연료 제조	고효율 열 회수 또는 연료 생산에 따라 추가적으로 발생하는 시설 정비비 (보조대상 시설 정비비용의 1/3 한도)
쓰레기 발전 네트워크 열수송 시스템	지원대상 설비 정비비용의 1/2

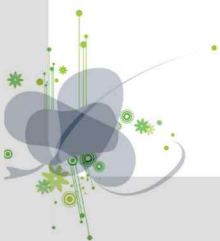
6. '폐기물에너지 산업의 네트워크 활성화와 가치사슬 구축을 위한 과제', 산업연구원, 곽태종(2013.12)

참고문헌

1. '친환경 에너지타운 추진을 위한 국내외 추진현황 검토 및 정책과제 연구', 국토연구원, 왕광익, 노경식, 2014
2. '친환경에너지타운 업무 매뉴얼', 환경부, 2015.9
3. '녹색도시 협력체계 관련 국내외 사례조사', 성균관대학교 녹색도시건축연구센터(2014.11)
4. '친환경에너지타운 조성을 위한 새로운 정책개입 방안', 과학기술정책연구원, 장영배, 이정필, 조보영(2014.03)
5. '유기성폐자원의 효율적 에너지화를 위한 관리체계 구축방안 연구', 한국환경정책평가연구원, 한상운(2013.03)
6. '폐기물에너지 산업의 네트워크 활성화와 가치사슬 구축을 위한 과제', 산업연구원, 곽태종 (2013.12)

III 자원화 분야

4. 일본 음식물 바이오 가스화 사례

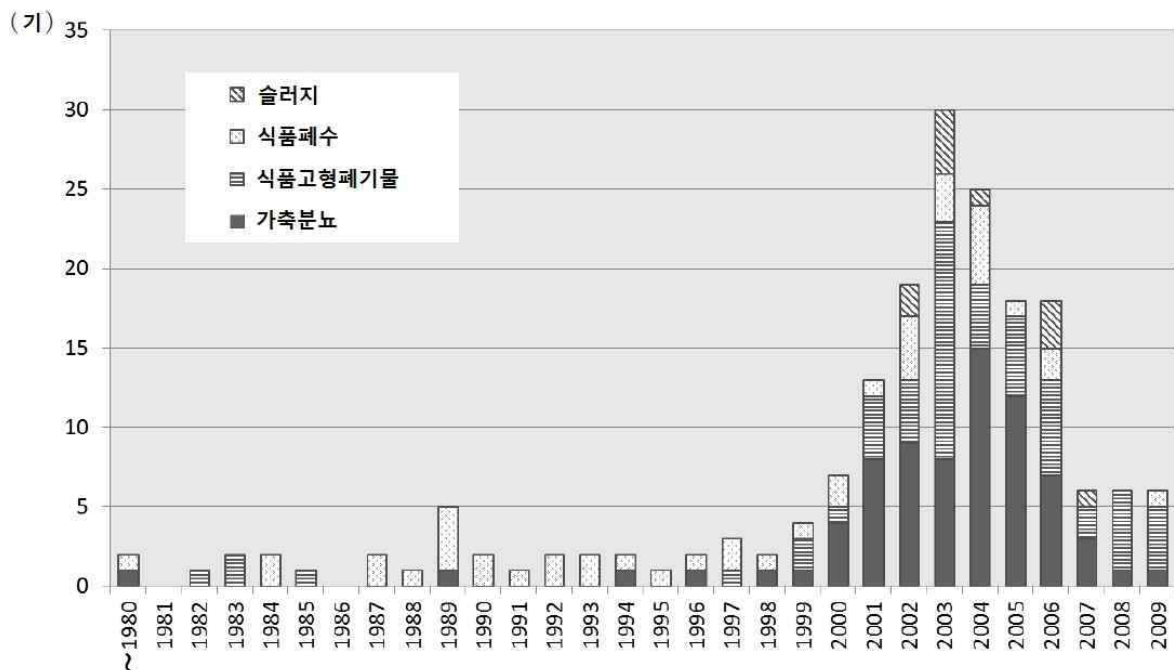


세부목차

1. 일본 바이오가스 플랜트 설치현황	193
2. 음식물 및 음폐수에서 생산된 바이오가스 활용 사례	195
참고문헌	210

1 일본 바이오가스 플랜트 설치현황

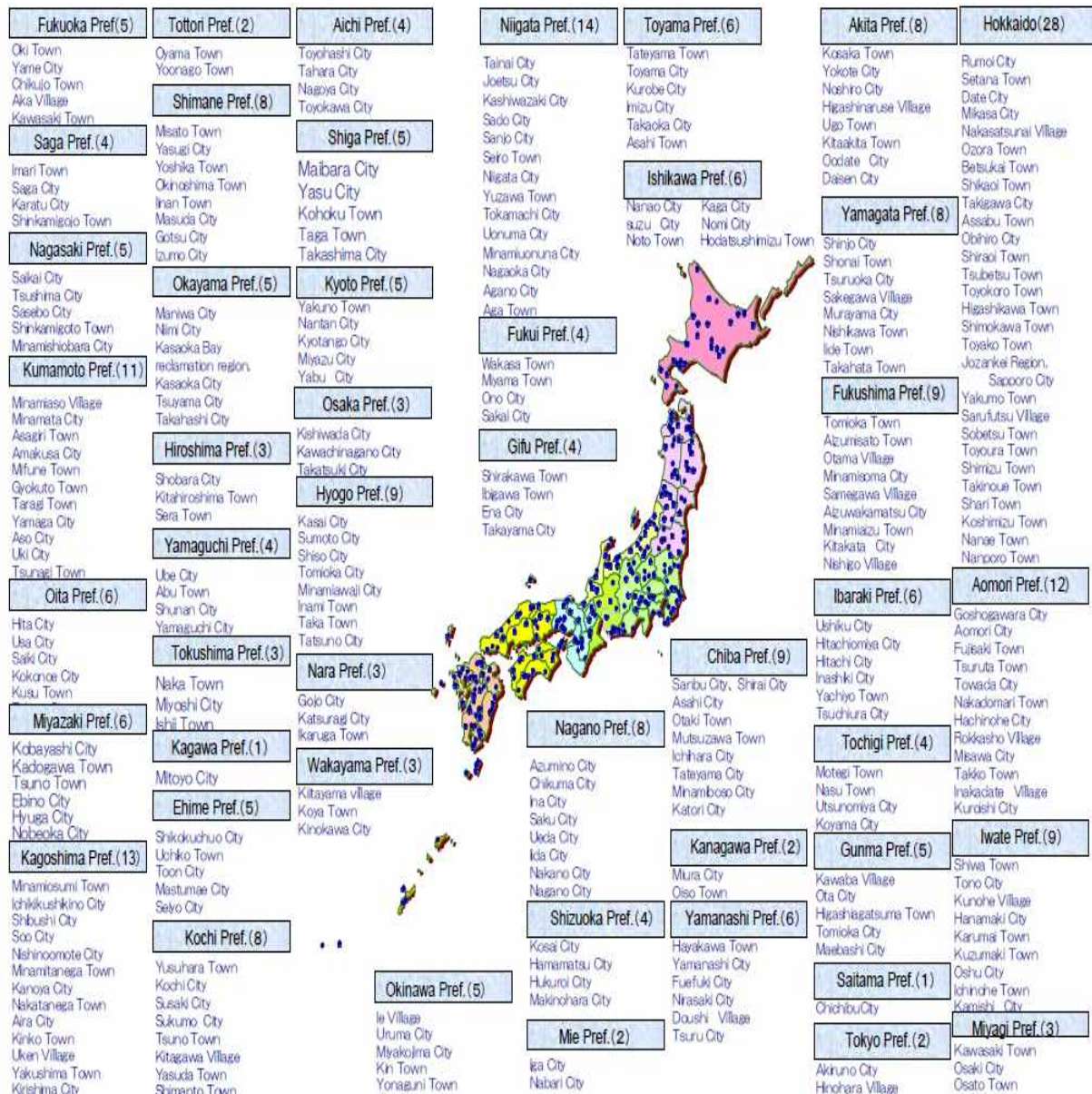
- 일본 지역환경자원센터, 유기자원협회(JORA), 신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)에서 플랜트 정보 자료집 작성
- 연간 바이오가스 플랜트 설치수는 2000년대 전반에 가장 많고 이후 연간 플랜트 설치수가 감소되었음
 - 2001년에 시행된 '순환자원 재생이용 등의 촉진에 관한 법률(식품재이용법)'로 바이오가스 플랜트에 대해 환경성, 농림수산성, 광역자치단체 등으로부터 다양한 보조금이 지급되어 플랜트 비용의 절반 이상을 절감할 수 있었음
 - 설치 후 플랜트 규모나 사양이 지역의 여건과 맞지 않거나 실제 운용단계에서 문제가 발생되어 신규도입이 정체됨
- 발전차액지원제도(FIT)가 2012년 7월 시행되어 2013년 10월 말까지 1년 3개월간 35건(총 5,213 kW) 바이오가스 플랜트 설비 인증 받음
- 2010년 11월 기준 일본 286개 바이오매스 타운 구축²⁾
 - 바이오매스 타운 중 60.4%인 162개소에서 메탄 발효로 바이오가스 생산



< 일본 내 연간 바이오가스 플랜트 설치수 >

1. '일본 바이오가스 이용 현황과 개선사례', 세계 에너지시장 인사이트 제14-15호(2014.5.2.)
 2. 'Introduction to basic biomass town concepts in Japan', Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries(2011.2)

III 자원화 분야



2010년 11월 기준 286개 바이오매스 타운

2 음식물 및 음폐수에서 생산된 바이오가스 활용 사례

2-1. 지바 유기성폐기물 바이오가스화 시설³⁾

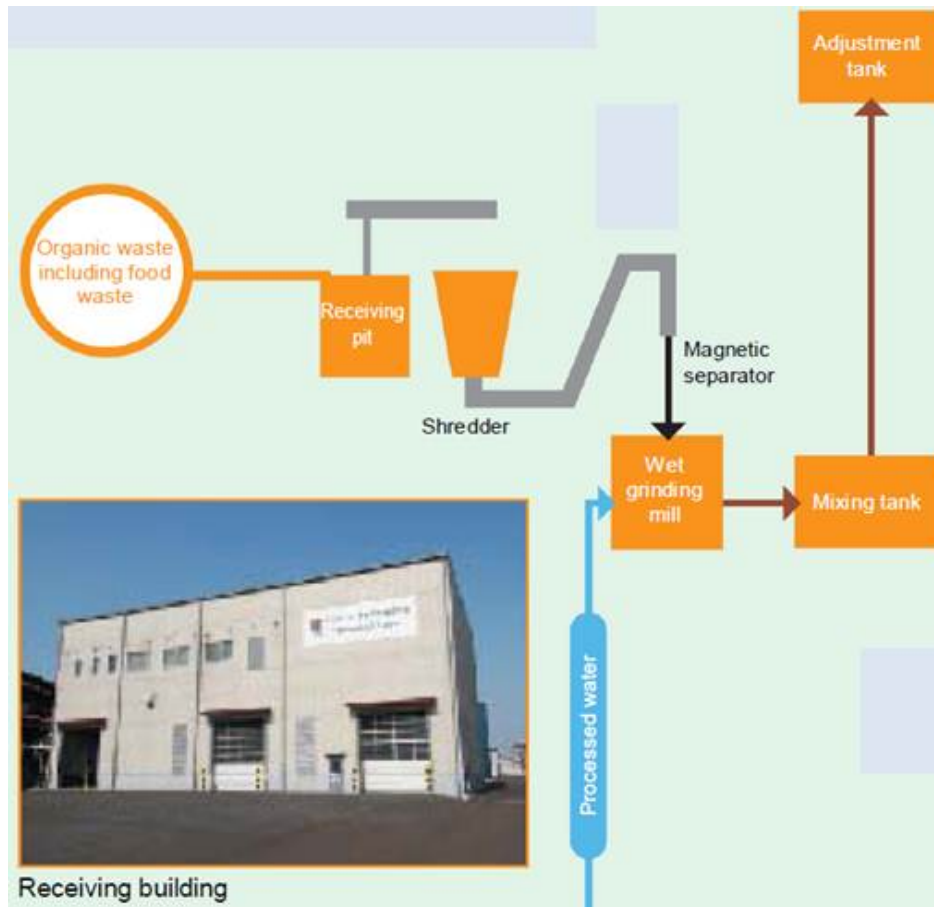
- 위치 : 지바현(일본 카토 지방 남동부에 도쿄 도 동쪽에 인접하는 현)
- 운영자 : Japan Recycling Corporation
- 반입폐기물
 - 식품가공 산업 유기성폐기물(식품가공 폐기물, 슬러지, 유기성폐기물, 폐오일, 폐산, 폐알칼리)
 - 가정용 분리수거된 음식물폐기물(파일럿 프로젝트)
 - 대형 음식물 업소 음식물폐기물
- 생성물 : 매립가스(CH_4 : 60~70%, CO_2 : 30~40%, 5,500~6,000 kcal/ Nm^3)
- 플랜트 용량 : 30톤/일(고형물 함량 : 30%)
- 플랜트 면적 : 10,000 m^2
- 플랜트 운전 시작 : 2003년 8월

[운전 공정]

- 전처리
 - 반입된 폐기물 파쇄(약 3 cm)
 - 원심분리와 풍력선별로 종이, 플라스틱 제거 및 자력선별로 금속 제거
 - 음식물폐기물을 분쇄기로 슬러리에 혼합하고 수분을 조정하여 고형물 함량 약 10%로 맞춤
 - 슬러리에 남아있는 종이, 플라스틱 및 섬유류를 바 스크린으로 제거
 - 제거된 이물질은 인근 폐기물 가스화 용융 플랜트에서 처리
- 멸균
 - 음식물폐기물 슬러리를 70℃에서 1시간 이상 가열하여 병원균 박테리아 사멸

3. 'Bio Gasification of Food Waste and Organic Waste from Food Manufacturing Industries, Food Retailers and Households, etc.', Global Environment Centre Foundation, http://nett21.gec.jp/Ecotowns/data/et_a-07.html

III 자원화 분야



< 지바 유기성폐기물 바이오가스화 시설 전처리 공정 >

○ 혐기성 소화

- 음식물폐기물 슬러리를 37℃ 소화조에서 혼합시 유기물이 분해되어 60~70% 메탄 회수(체류시간 : 20일)
- 바이오가스는 탈황 후 인근 철강회사에 연료로 공급

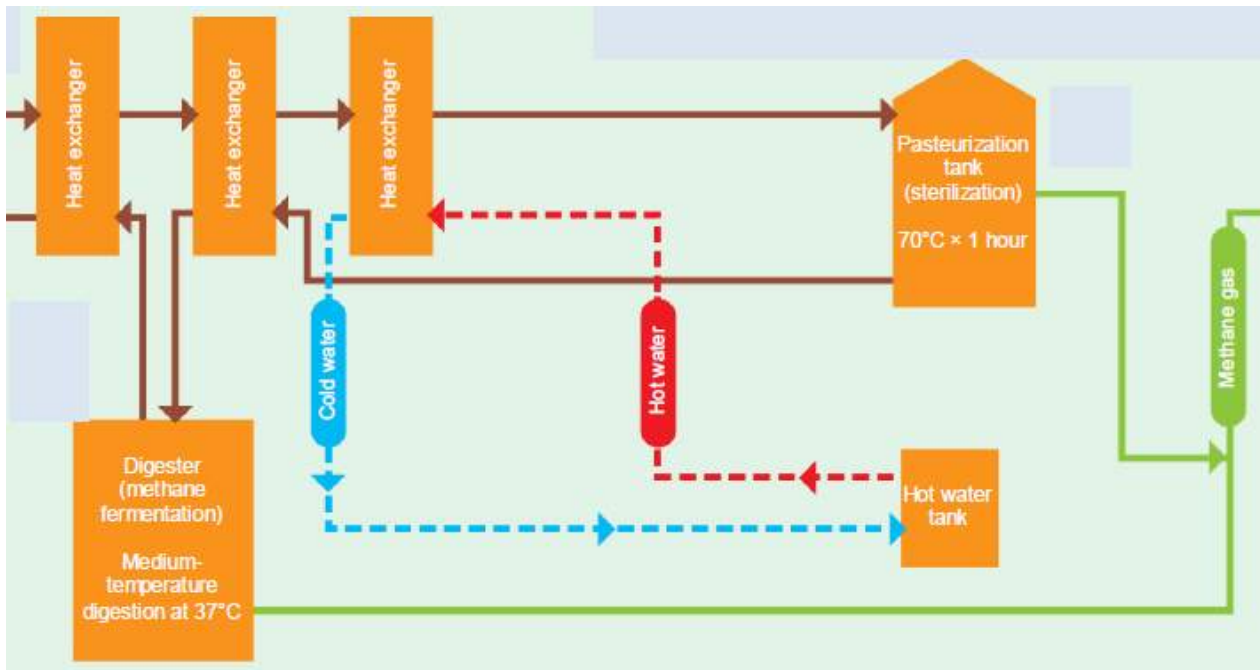
○ 후처리

- 소화된 슬러리는 탈수, 건조 후 인근 폐기물 가스화 용융 플랜트에서 처리하여 연료가스와 슬래그 회수

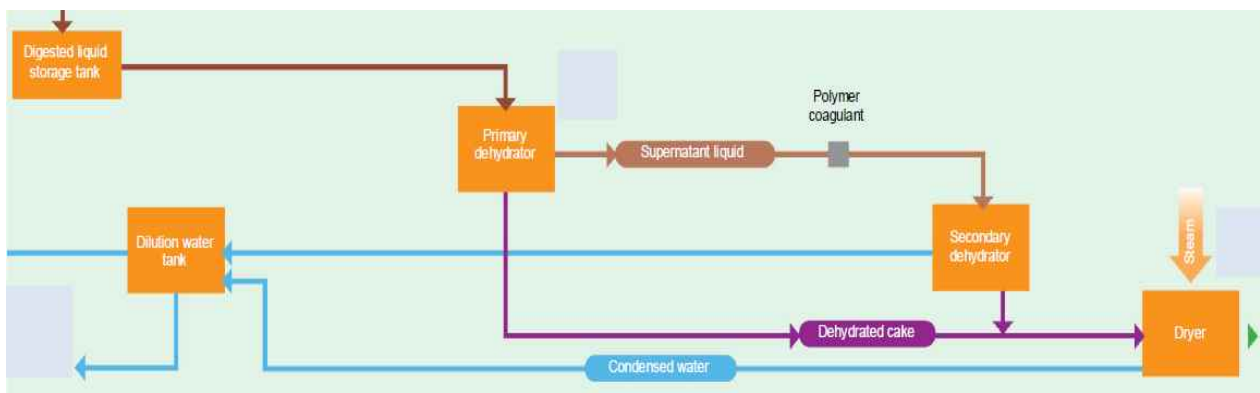
○ 기술특징

- 전처리로 유기성 폐기물만을 회수하여 혐기성 소화 공정에 유기성폐기물 이송
- 바이오가스화 플랜트 인근에 폐기물 가스화 플랜트와 철강 사업장 있음
- 회수된 바이오가스를 철강사에 연료로 사용
- 바이오가스화 플랜트 시설에 필요한 전력과 증기를 철강사에서 공급받음
- 플랜트에서 발생된 폐수는 철강사의 기존 폐수처리시설로 이송하여 처리함

4. 일본 음식물 바이오 가스화 사례



< 지바 유기성폐기물 바이오가스화 시설 혐기성 소화 공정 >



< 지바 유기성폐기물 바이오가스화 시설 후처리 공정 >



바이오가스 홀더



탈황 타워



열교환기



악취 처리 장치



소화기



저온살균 탱크



소화액 저장 탱크



조정 탱크

III 자원화 분야

- 이물질과 탈수 후 건조된 슬러지는 폐기물 가스화 플랜트에 이송하여 연료가스 및 슬래그 회수
- 연료 가스는 철강사에서 연료로 사용되고 슬래그는 도로 건설재로 판매
- 위 공정으로 제로 배출 운전

[음식물폐기물 재활용 사업추진 배경]

○ 재활용 법 집행

- 과거 음식물폐기물이 소각되거나 매립되었으나 2001년 음식물폐기물재활용법으로 음식물폐기물 재활용 필요

○ 지바현 대도시에 폐기물 처리시설 부지가 부족하여 폐기물 처리량 감소 필요

[바이오가스화 사업 성공 요인]

○ 민간 초기 투자비는 14억 엔이고 국고 6억 엔을 지원 받음

○ 바이오가스 플랜트가 철강사와 인접하여 철강사에서 전력과 증기를 공급받음

- 또한 바이오가스 생산 공정 중 발생된 폐수를 철강사 폐수처리 시설에서 처리함
- 이외 폐기물 가스화 시설이 인근에 있어 폐기물 및 소화슬러지를 가스화 용융 시설에서 처리

○ 전처리 공정이 개선되어 플라스틱 백이나 박스, 섬유판 박스에 담긴 음식물폐기물이 직접 반입됨

2-2. 도쿄 음식물폐기물 바이오가스화 시설⁴⁵⁾

○ 위치 : 도쿄 슈퍼 에코 타운

○ 도쿄 슈퍼 에코타운 프로젝트는 폐기물을 처리하고 환경산업 발전과 자원순환사회 구현을 촉진하기 위해 추진됨

○ BIOENERGY Co.에서 제시한 음식물 재순환 시설이 선정되어 2006년 3월 설치됨

○ 음식물폐기물 분리의 어려움으로 소각하다가 메탄 발효하여 연료 전지(250 kW)와 가스 엔진(250 kW + 500 kW)에 연료로 공급함

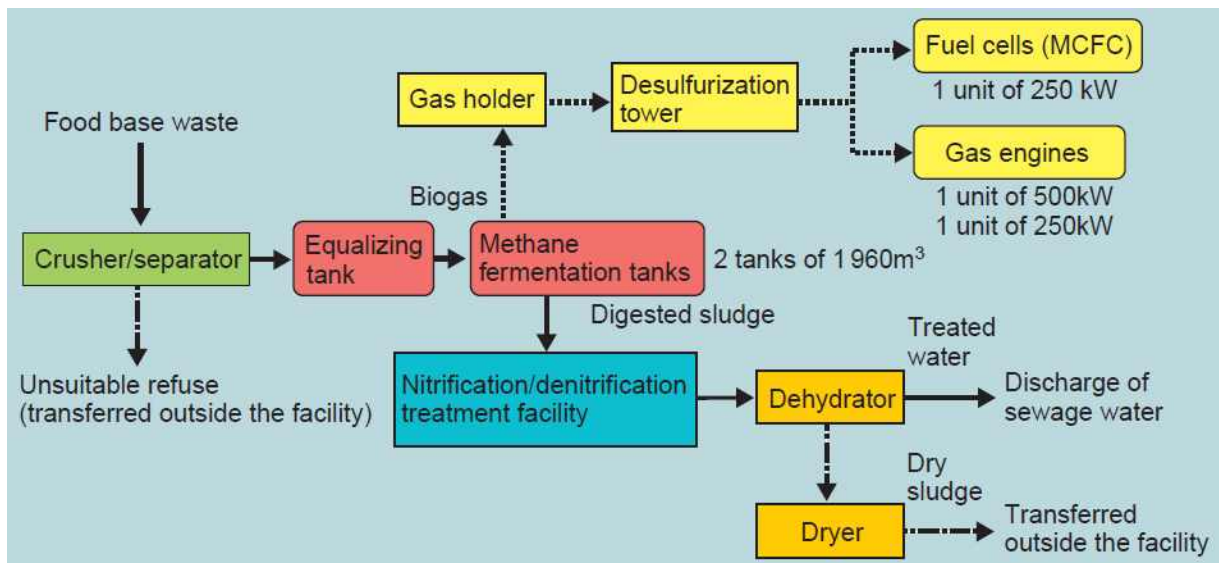
- 호텔, 슈퍼마켓, 편의점 등에서 배출된 음식물 폐기물과 식품 가공 플랜트에서 배출된 잔류물 처리

4. 'New Biomass Utilization Technologies such as Methane Fermentation and Pyrolysis', YUICHI KOGA, Yokohama Dockyard & Machinery Works, Technical Review Vol. 44 No. 2(2007.7)

5. 'Tokyo Super Eco Town Project Outline', Tokyo Metropolitan Government

4. 일본 음식물 바이오 가스화 사례

- 일 기준 약 110톤의 음식물폐기물이 처리되어 약 24,000 kWh(2,400 가구 공급) 전력이 생산되어 약 60%는 외부 회사에 판매됨
 - 메탄 발효로 생산된 바이오가스(60% CH₄, 40% CO₂)로 가스 엔진과 연료 전지로 전력을 생산하여 판매하는 세계 최초 플랜트임
 - 도시 파이프라인 시스템에 바이오가스가 매년 약 800,000 m³(2,000 가구 공급량, 2011년 기준) 주입됨(매년 약 1,360톤 이산화탄소 배출저감 효과있음)
- 음식물폐기물의 총고형물(TS) 함량이 설계시 값보다 높아 바이오가스 생산량이 설계값(120 m³N/톤 폐기물) 보다 많이 생산됨(205 m³/톤 폐기물)
- 음식물폐기물에서 전기를 생산하는 녹색기술로 연간 이산화탄소 5,000 톤 배출을 저감할 수 있음



도쿄 슈퍼 에코 타운 바이오가스 시설 공정 흐름도



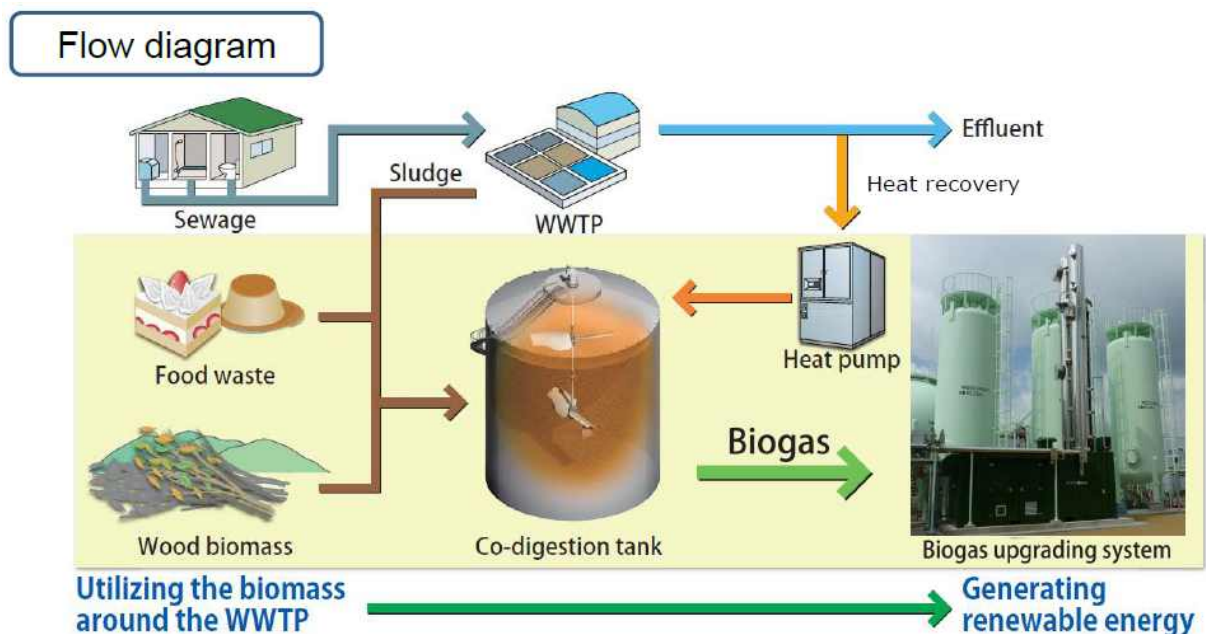
바이오가스 전력 생산 시설



연료전지 및 메탄 가스 홀더

2-3. 고베시 Higashinda 슬러지 처리 실증연구 플랜트⁶⁾

- 탄소강(Carbon steel)으로 만든 소화조를 사용하여 하수슬러지 소화시설 건축기간 단축 및 자본적 지출(CAPEX) 절감
- 바이오가스를 순도 97%로 정제하는 선진 바이오가스 고질화 시스템을 적용하여 운전비용(OPEX) 절감 및 건축기간 단축
- 바이오가스 수익으로 하수슬러지 시설 운영 비용 절감
- 바이오가스를 가스 그리드에 주입하고 천연가스 차량에 연료로 공급하여 온실가스 배출량 저감
- 2012년 1월 이후 운영 중
- 하수슬러지와 음식물폐기물 및 목재 바이오매스를 혼합 후 소화하여 바이오가스 생산 및 바이오가스 고질화
- 하수슬러지와 적절한 바이오매스를 혼합 소화하여 바이오가스 생산 증대
 - 실험실 분석 및 테스트 후 하수슬러지에 폐산, 음식산업 잔재물 및 목재 바이오매스를 혼합하여 소화 원료로 사용함
 - 하수슬러지에 약 50% 바이오매스를 혼합하여 소화시 바이오가스 생산량 60% 이상 증대



고베시 하수슬러지 및 음식물폐기물 바이오가스 생산 실증시설 공정 흐름도

6. 'Efforts for use of methane gas in wastewater treatment of Japan', Sewerage and Wastewater Management Department, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan', (2013.3.13.)



소화조



목재 바이오매스

- 생산된 바이오가스는 열펌프를 사용하여 소화조 난방에 사용됨
 - 탄소강 소화조 적용과 바이오가스 판매 수익으로 하수슬러지 처리시설 전주기 비용 40% 이상 절감
- 목재 바이오매스의 잔류 섬유질 성분에 의한 소화 후 슬러지의 탈수 효율 증대

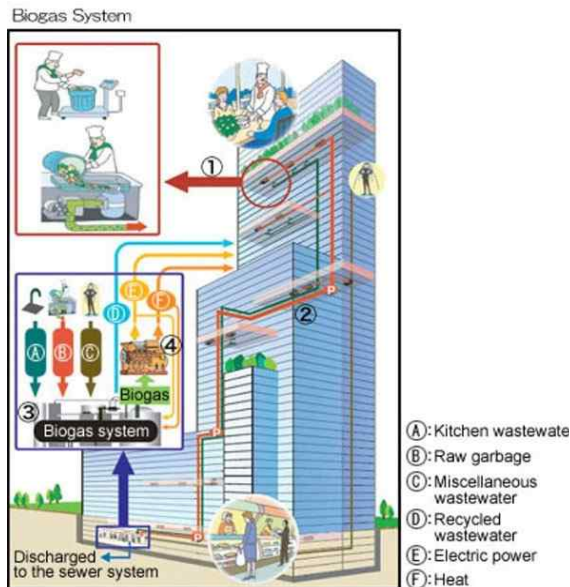
2-4. 오사카시 빌딩 바이오가스화 시설⁷⁾

- 위치 : 오사카시 Abenobashi 터미널 빌딩에 Pavilion 타워
- 도시 중심 빌딩에 호텔, 레스토랑, 백화점 등 복합 빌딩에서 배출되는 음식물 폐기물과 음식물 폐수에서 메탄 생산
- 생산된 메탄 가스는 가스 엔진과 보일러 연료로 사용되어 전기와 열 사용
- 음식물 폐기물을 주방 폐수와 폐수 처리장 슬러지와 혼합하여 메탄 발효 탱크에서 바이오가스 생산
- 건물 운영자는 음식물 폐기물과 음식물 폐수를 건물 안에서 처리하여 건물 밖으로 내보낼 필요없음
- 사업자는 향후 도시 중앙 복합 건물에 위와 같은 프로젝트 제안 계획
 - 사업자는 본 사업에 1,300억 엔 투자
- 디스포저 룸에 거주자가 음식물 폐기물을 버리면 분쇄되어 파이프라인 통해 바이오 가스 시스템으로 주입됨
- 음식물 폐기물이 음식물 폐수와 폐수처리 시스템의 슬러지와 함께 메탄 발효 시스템에 주입됨

7. 'Urban Biogas System, Osaka City', UN FAP(Food and Agriculture Organization of the United Nations), <http://www.fao.org/nr/sustainability/food-loss-and-waste/database/projects-detail/en/c/150860/>

III 자원화 분야

- 소화 후 폐수는 분리되어 공공하수 시스템으로 배출됨
- 바이오가스는 도시가스와 혼합하여 가스 엔진, 보일러 및 기타 설비에 공급됨



빌딩에 설치된 바이오가스 시스템



일본 오사카 Abeno Haruka 빌딩

2-5 히타치 시 바이오가스화 시설⁸⁾

- 위치 : 일본 이바라키현 북동부에 있는 공업도시 히타치
- Kandatsu 물질 순환 센터(쓰치우라, Tsuchiura)에 바이오가스 플랜트 건설
- 일본 최대 음식물폐기물 바이오가스 플랜트가 2015년 3월 26일 준공됨
- 일 135.9톤 음식물 폐기물이 처리되어 일 8,000 m³ 이상 바이오가스가 생산되는 시설임
- 바이오가스는 기존 소각로(150톤/일)에서 보조 연료로 사용됨
- 소각로에서 발생된 증기는 바이오가스 플랜트에서 열원으로 사용됨
- 바이오가스 플랜트는 에너지 순환을 활용한 하이브리드 시스템임
- 반입 폐기물 : 주방 폐기물, 산업용 음식물 폐기물, 식품 가공 잔류물, 음료 폐기물, 유통기한 만료된 음식물 및 슬러지
- 메탄 발효 후 잔류 폐기물은 퇴비화하여 인근 지역에서 사용함
- 플랜트 건설에 보조금 지원됨(Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries)

8. 'At the Kandatsu Material Recycle Center – the largest "Biogasification plant for food waste" in Japan', Swing Corporation(2012.4.5.)



일본 이바라키 현 히타치 바이오가스 플랜트

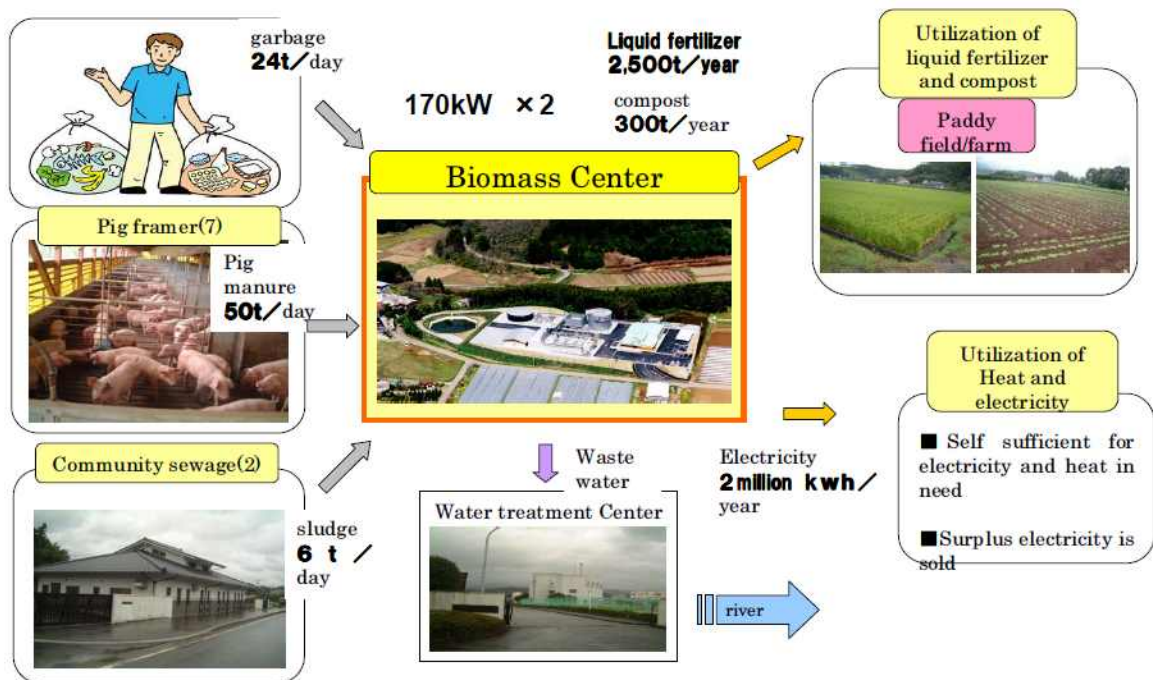
2-6. 히타(Hita) 시 바이오매스 타운 바이오가스화 시설²⁾

- 위치 : 일본 오이타현에 있는 히타시 바이오매스 타운
- 돼지 배설물(50톤/일), 가정 유기성 폐기물(24톤/일) 및 슬러지(6톤/일)를 메탄 발효하여 생산된 바이오가스로 전기 및 열 생산
- 연간 200만 kWh 생산된 전기는 주로 자체 시설에서 사용하고 잉여 전기는 판매됨
- 170 kW 가스 엔진 2기 운전으로 일 7,070 kWh 전력 생산
- 메탄 발효(습식 중온 소화 후) 액체 비료는 연간 2,500톤 생산되고 퇴비는 연간 300톤 생산되어 논과 밭에 사용됨
- 수처리 시설에서 활성 슬러지법으로 소화슬러지 처리

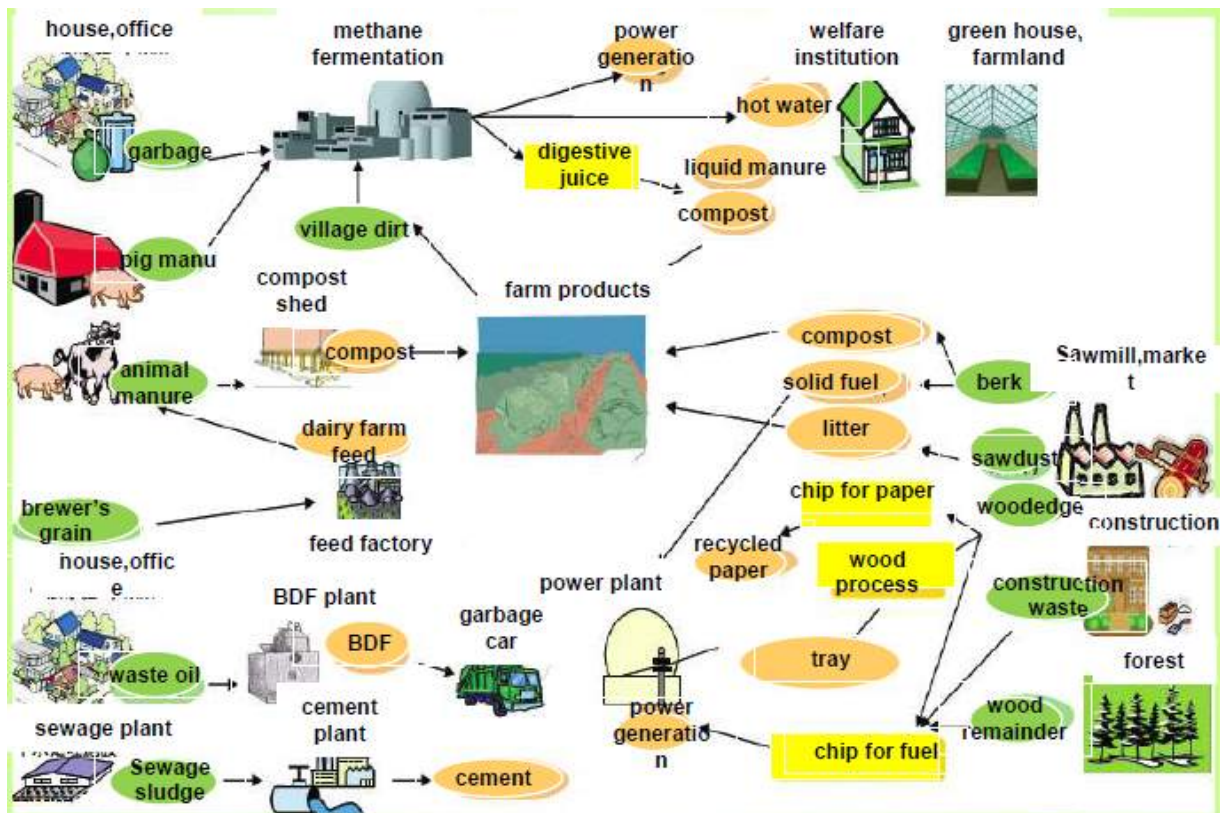


일본 오이타현 히타시 바이오매스 타운 바이오가스 생산 시설

III 자원화 분야



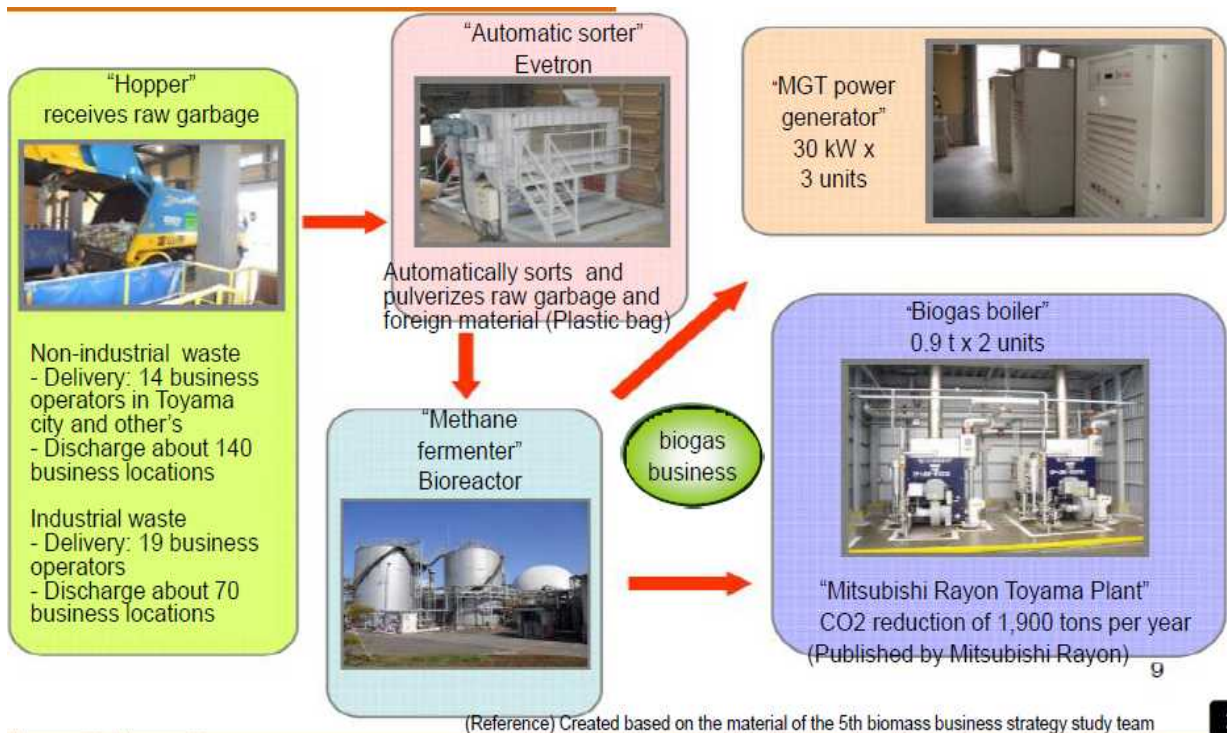
일본 오이타현 히타시 바이오매스 타운 바이오가스 생산 흐름도



일본 오이타현 히타시 바이오매스 타운 흐름도

2-7. 도야마 녹색 음식물 재활용 시설⁹⁾

- 도야마 : 일본 혼슈 중부
- 분리수거된 음식물폐기물과 물을 일 62톤 소화조에 반입
- 소화조 : 800 m³ 부피, 13일 수리학적 체류시간, 고온 소화, 물 추가 및 혼합
- 일 5,500 m³ 바이오가스 생산하여 90 kW 마이크로가스 터빈(20% 효율)을 운전하고 나머지는 보일러 연료로 인근 공장에 판매함
- 소화 후 잔류물은 활성슬러지 처리 후 퇴비로 사용
- 효율적인 플라스틱 분리



도야마 유기성폐기물 바이오가스화 공정도¹⁰⁾

9. 'Anaerobic Digestion in Japan', Jan Liebetrau, DBFZ(Deutsches Biomasseforschungszentrum), Workshop Tokyo(2014.6.27.)

10. 'Recycling of food waste in Japan', Dr. Akikuni Ushikubo, Tokyo University of Information Science(2013.6)

III 자원화 분야



도야마 음식물폐기물 소화조¹⁰⁾



폐기물 처리 및 재활용¹⁰⁾

2-8. 가이세이 음식물 폐기물 건식 소화 시설⁹⁾

- 가이세이 : 일본 간토지방의 가나가와현에 있는 정(町)
- 건식 소화 시스템(dry fermentation) : 10% 총고형물(TS), 중온 소화
- 생산 잔류물 및 음식물 폐기물 일 5톤 처리
- 25 kW 열병합발전(CHP, 35% 효율) 운전 및 온실에서 열 사용
- 고액 분리 후 액체는 논에서 비료로 사용
 - 소화 후 잔류물의 총고형물 함량이 낮음



가이세이 일 5톤 유기성 폐기물 처리 시설

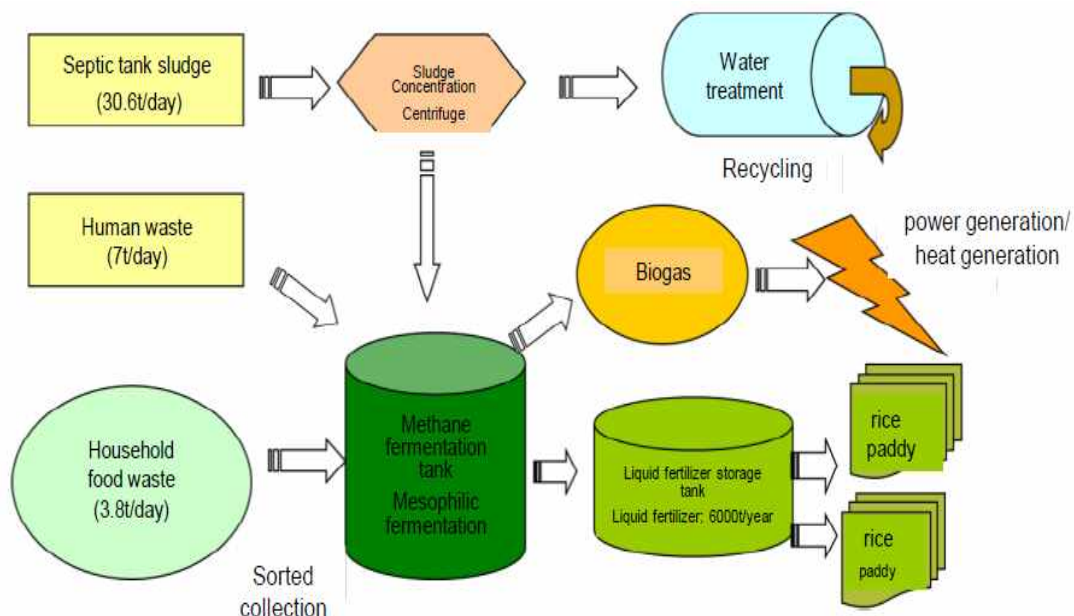


소화 후 생성물이 비료로 사용되는 온실

- 열병합 발전 용량 대비 소화를 위한 기질이 충분하지 못함
- 열병합 발전 비용 높음
- 소화 후 고품질의 생성물을 비료로 사용
- 모든 최종 생성물의 성공적인 활용 : 소화 후 액체 및 고체, 열, 전기

2-9. 오키 바이오매스 타운 혐기성 소화 시설^{6, 11)}

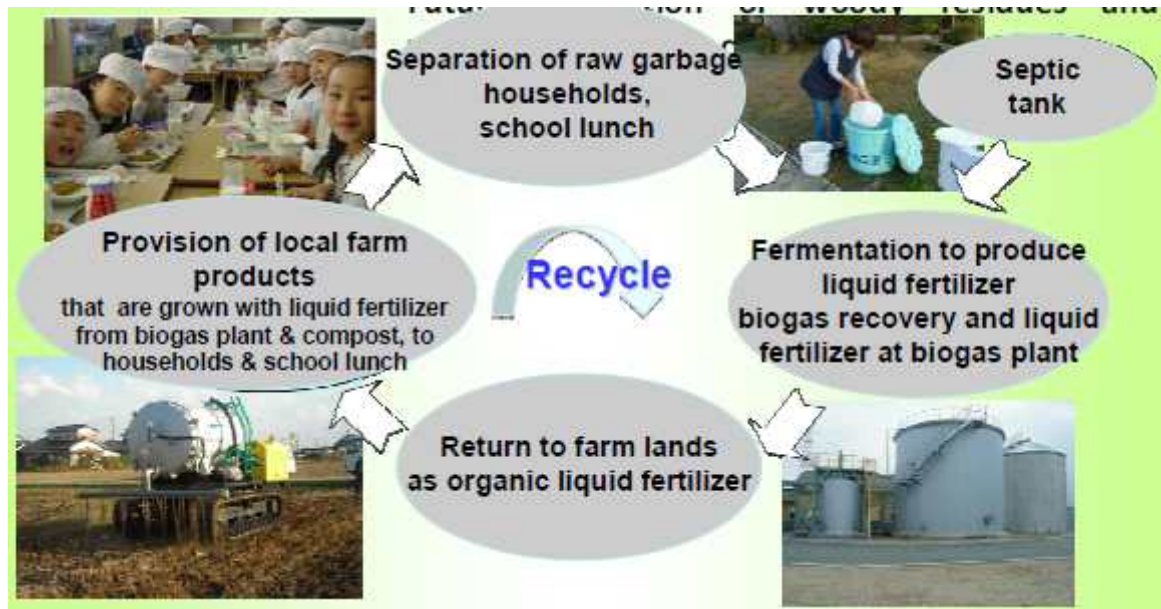
- 오키 : 후쿠오카 현 남쪽 농촌 지역
 - 2011년 3월 기준 인구 약 14,500명, 4,600여 가구, 18.43 km² 면적
 - 바이오매스 타운 계획 수립 : 2005년 2월
- 음식물폐기물, 생활폐기물 및 슬러지에서 바이오가스를 생산하여 전기 166,209 kWh 발생되어 플랜트에서 자체 사용
 - 소화 후 액체는 유기성 비료로 사용
 - 처리해야 할 폐기물량이 약 50% 감소되어 소각 비용이 연간 2000 만엔 절감
- 완벽한 혐기성 소화로 악취 제로화
 - 생산된 메탄은 포집 후 플랜트에 필요한 에너지 생산에 사용되어 처리 비용 절감
- 매년 약 6,000톤 액체 비료를 쌀, 밀 등 작물 생산에 사용함(논 100헥타르)
 - 10 헥타르 농지에 5-7 톤 액체 비료 사용



오키 바이오매스 타운 바이오가스 생산 흐름도

11. 'Reference 4 Case Examples of Biomass Towns in Japan'

III 자원화 분야



일본 후쿠오카 현 Ooki-machi 바이오매스 타운 흐름도



일본 후쿠오카 현 Ooki-machi 바이오매스 타운 바이오가스 생산 시설



오키 혐기성 소화조



오키 지역 소화 후 액체 비료 적용 농지

2-10. 다이센(Daisen) 바이오가스화 시설¹²⁾

- 위치 : 일본 아키타현의 남부 다이센시
- SANGSUI-EN 2 바이오가스 플랜트는 기존 소화조를 활용하여 새롭게 건설되어 (건설기간 : 2013~2014년) 2014년부터 운전 시작
- 반입 폐기물 : 돼지 배설물 (73,000 m³/년) 및 음식물 폐기물(4,000 m³/년)
- 단상 바이오가스 시스템은 반입, 저장 및 균등화를 위한 탱크와 상부 혼합기가 있는 1차 소화조와 단일 멤브레인 가스 홀더 지붕이 있는 2차 소화조의 가스 생산 시설로 구성됨
- 가스 홀더 지붕은 강풍에서 보호하기 위해 탱크 안에 적재되어 있음
- 바이오가스는 2개의 Otto 가스 엔진(2×370 kW)에 의해 회수되고 기계적 에너지는 전력으로 전환됨
- 생성된 열의 일부는 반입폐기물 기질 난방에 사용됨
- 소화 후 물질은 폐수처리 시스템에서 세척되어 고체와 깨끗한 액체로 분리됨



일본 다이센 SANGSUI-EN 2 바이오가스 플랜트

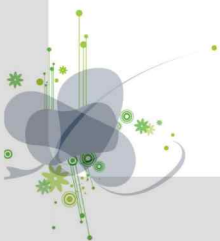
12. 'Biogas plant SANGSUI-EN 2', Krieg & Fischer Ingenieure GmbH

참고문헌

1. '일본 바이오가스 이용 현황과 개선사례', 세계 에너지시장 인사이트 제14-15호(2014.5.2.)
2. 'Introduction to basic biomass town concepts in Japan', Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries(2011.2)
3. 'Bio Gasification of Food Waste and Organic Waste from Food Manufacturing Industries, Food Retailers and Households, etc.', Global Environment Centre Foundation, http://nett21.gec.jp/Ecotowns/data/et_a-07.html
4. 'New Biomass Utilization Technologies such as Methane Fermentation and Pyrolysis', YUICHI KOGA, Yokohama Dockyard & Machinery Works, Technical Review Vol. 44 No. 2(2007.7)
5. 'Tokyo Super Eco Town Project Outline', Tokyo Metropolitan Government
6. 'Efforts for use of methane gas in wastewater treatment of Japan', Sewerage and Wastewater Management Department, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan', (2013.3.13.)
7. 'Urban Biogas System, Osaka City', UN FAP(Food and Agriculture Organization of the United Nations), <http://www.fao.org/nr/sustainability/food-loss-and-waste/database/projects-detail/en/c/150860/>
8. 'At the Kandatsu Material Recycle Center – the largest "Biogasification plant for food waste" in Japan', Swing Corporation(2012.4.5.)
9. 'Anaerobic Digestion in Japan', Jan Liebetrau, DBFZ(Deutsches Biomasse forschungszentrum), Workshop Tokyo(2014.6.27.)
10. 'Recycling of food waste in Japan', Dr. Akikuni Ushikubo, Tokyo University of Information Science(2013.6)
11. 'Reference 4 Case Examples of Biomass Towns in Japan'
12. 'Biogas plant SANGSUI-EN 2', Krieg & Fischer Ingenieure GmbH

IV 하수슬러지 분야

1. 하수슬러지 건조 기술·사례



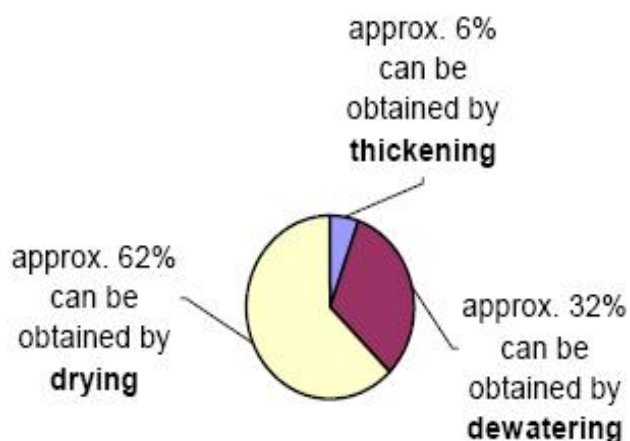
세부목차

1. 슬러지 건조 기술 및 에너지 효율	215
2. 하수슬러지 열적건조 기술사례	226
3. 하수슬러지 태양열 · 생물학적 건조 기술사례	250
4. 네덜란드 하수슬러지 생물학적 건조 처리 사례	259
참고문헌	265

1 슬러지 건조 기술 및 에너지 효율

1-1. 슬러지 건조 필요성

- 슬러지 건조로 질량과 부피가 저감(4~5배)되어 저장, 이송이 용이해지고 슬러지 열량을 높여 소각로에 소각이 가능함¹⁾
 - 건조로 슬러지를 병원균 없이 위생적으로 처리하여 안정화할 수 있으며 건조 슬러지를 비료, 토지개량제로 재활용할 수 있음
 - 슬러지 건조에 에너지 비용이 높아 적절한 에너지원 및 최적 건조방법 선택이 필요함
- 슬러지 공극 사이의 물은 중력(슬러지 농축)에 의해 쉽게 제거될 수 있음¹⁾
 - 모세관수는 흡착력, 결합력으로 유지되는 수분으로 기계적 탈수(원심분리기 등)에 의해 제거될 수 있음
 - 슬러지 결합수 및 반결합수는 기계적 탈수로 일부 제거되나 폴리머가 추가되어야 함
 - 슬러지 결합수는 슬러지 입자벽이 가열, 냉각 또는 전기유도력에 의해 깨어질 경우 제거되어 열적건조없이 제거될 수 없음
- 슬러지 고형물(dry solids, DS) 2%에서 90%로 건조를 100%로 환산시 슬러지 농축으로 6%, 탈수로 32%, 건조로 62% 수분제거 가능함¹⁾
 - 슬러지 열적건조로 수분을 상당량 제거할 수 있고 건조에 필요한 에너지원으로 화석연료 사용량을 줄이는 방법을 찾아야함



슬러지 농축, 탈수, 건조 공정의 기여도¹⁾
(슬러지 2%에서 90%로 건조시 100%로 환산)

1. 'Sludge Drying', A. Flaga, Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, Poland, 73-82, Flaga, Sludge drying

IV 하수슬러지 분야

- 유럽에서 2010년 슬러지는 최종적으로 농업용 비료로 42%, 소각으로 27%, 매립으로 14%, 기타 16% 처리됨²⁾
 - 안정화된 슬러지는 미네랄 및 유기물이 많아 비료로 사용되거나 특별한 소각로, 시멘트 킬른에서 소각됨
 - 이외 혐기성소화로 메탄가스를 생산하거나 열분해, 가스화로 원료를 생산하기도 함
- 탈수된 슬러지는 고형물(DS)이 20~35% 정도로 열량이 4 MJ/kg 미만으로 낮고 생물학적으로 분해가능함²⁾
 - 탈수된 슬러지를 건조하여 고형물 90% 이상인 알갱이를 생산시 병원균은 없고 생물학적으로 안정되며 열량이 8~11 MJ/kg(소화시) 또는 12 MJ/kg(비소화시) 이상인 연료로 활용가능 함
- 하수슬러지 건조로 슬러지 열량을 높여 연료로 사용이 가능함²⁾
 - 고형물 35~45% 슬러지는 특별 연소기를 이용하여 자체 소각가능하고 고형물 60~90% 슬러지는 생활폐기물(8,400 kJ/kg)과 혼합연소 가능하며 고형물 85% 이상 슬러지는 열분해나 가스화가 가능함
 - 슬러지 건조는 복잡한 공정으로 슬러지 발생원, 구성, 폐수처리시설에서 처리 방법에 따라 달라지며 슬러지 특성에 맞는 건조기술 적용이 필요함



2. 'Energy efficiency of sludge drying processes', A. Leonard, Laboratory of Chemical Engineering, University of Liege

- 건조된 슬러지 수분은 5~10% 정도로 알갱이(1~4 mm) 형태이고 먼지는 1% 정도임¹⁾
 - 슬러지 고형물 질량의 3분의 1이 무기질(mineral)인 경우 건조슬러지 열량은 약 15 MJ/kg고형물 정도임
 - 슬러지 고형물의 무기질이 약 50%인 경우 건조슬러지 열량은 약 11 MJ/kg고형물 정도임
 - 소화 후 건조된 슬러지의 열량은 생슬러지보다 적은 약 2 MJ/kg고형물 정도임
 - 일부 연구에서는 소화 후 완전 건조된 슬러지의 열량이 약 12~14 MJ/kg고형물로 보고됨
 - 생슬러지 열량은 16~20 MJ/kg고형물이고 소화된 슬러지는 10~15 MJ/kg고형물로 보고된 경우도 있음
 - 생슬러지는 고형물의 75~85%가 유기물로 구성되고 소화슬러지는 고형물의 45~60%가 유기물임
- 건조슬러지는 인공 비료와 비교하여 환경에 덜 유해한 천연 비료로 사용될 수 있음¹⁾
 - 건조슬러지를 유기성 토질 개량제로 사용시 질소 배출속도 저감, 기본 영양분 공급, 모래 토질의 수분 보유력 증대, 진흙성 토양의 폭기·유출 성능 증대, 영양분 보유력 증대, 지하수 유해도 저감의 장점 있음
- 안정화된 슬러지에 박테리아, 바이러스, 기타 미생물 등 병원균이 서식할 수 있어 열적처리가 필요함¹⁾
 - 슬러지 열적 건조로 최소 85℃ 온도에서 약 30분 이상 처리시 저온 살균될 수 있음
 - 직접 건조시 슬러지 온도가 100~140℃까지 높아지면 일부 부분적으로 살균될 수 있으므로 열적 건조된 슬러지가 위생적인 안정화를 위해 필요함

1-2. 슬러지 건조 공정

- 건조슬러지와 공기간의 물질·열 교환이 건조공정에 필수적임¹⁾
 - 열교환은 복사, 대류, 전도로 발생되어 수분이 높은 농도에서 낮은 농도로 확산에 의해 이동됨
 - 슬러지 표면에 가열된 수분이 공기로 증발되며 수분 증발 속도는 슬러지 특성에 따라 다름
 - 슬러지 수분 함량이 가장 높을 경우 건조 속도가 가장 높고 건조 공기와 슬러지와의 접촉면이 많을수록 수분 증발 속도가 높아짐
 - 또한 슬러지 알갱이화로 슬러지와 건조공기 접촉면이 확대되면 경제적인 건조공정이 가능함

IV 하수슬러지 분야

- 슬러지 건조 3단계 중 1단계에서는 슬러지 온도가 짧은 시간 안에 높아져 일정하게 유지되는 단계임¹⁾
 - 2단계에서는 슬러지 표면에서 수분이 일정속도로 증발되면서 슬러지 온도가 50~85℃ 정도로 일정하게 유지됨
 - 슬러지 표면 수분과 슬러지 입자 안 수분양의 차이에 따라 건조시간이 달라짐
 - 슬러지 건조의 마지막 단계에서는 슬러지 표면에서 수분 증발이 슬러지 내부 수분에 의한 수분 교체보다 빨라 건조 속도가 느려짐
- 슬러지 건조시설 선택은 슬러지 유형 및 슬러지 활용방법에 따라 달라짐¹⁾
 - 모든 건조시설에서 슬러지를 고형물 90%까지 건조할 필요없음
 - 프랑스 전문가가 슬러지 건조의 적정 범위에 관한 가이드라인을 다음과 같이 제시함
 - 농업용 비료용으로 고형물 60% 이상, 폐기물 혼합 소각시 고형물 60% 이상, 특별 연소로에서 슬러지 소각시 고형물 35~45% 건조가 필요함
 - 고형물 90% 이상 슬러지를 소각시 고형물 35~45% 슬러지와 혼합연소할 때 경제성 있다고 제시됨

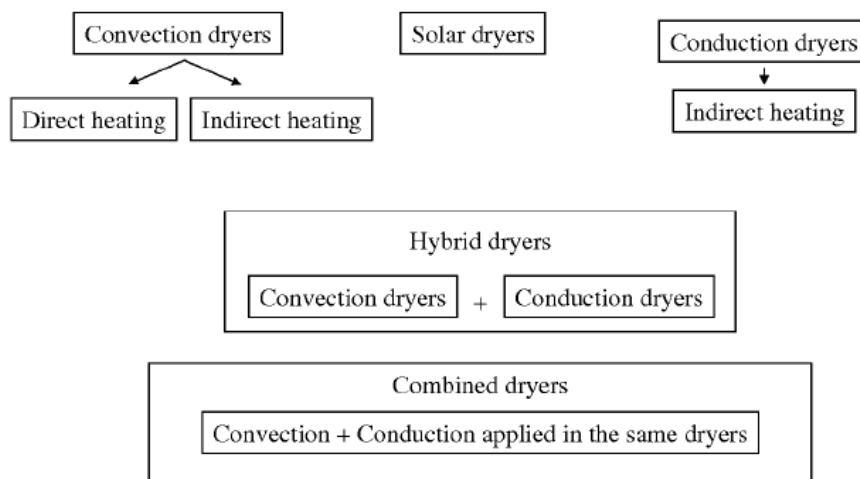
< 슬러지 건조 적정 범위에 관한 프랑스 전문가 제안¹⁾ >

활용방법	건조 범위			건조 목적
	30~40%	60~90%	90% 이상	
농업용	무익함	수익성 있음	수익성 있음	이송·저장 용이, 안정화 및 위생처리
소각	수익성 있음 (고형물 35~45%)	무익함 (기술적·경제적 문제)	수익성 있음 (고형물 35~45% 슬러지와 혼합연소)	Autothermic 소각
폐기물 혼합 연소	무익함 (기술적·경제적 문제)	수익성 있음	수익성 있음	이송·저장 용이, 소각시설 운전 용이

- 건조속도는 건조온도, 습도, 열풍 속도·방향, 슬러지 표면 크기, 슬러지 혼합, 건조 시설 슬러지 체류시간, 슬러지와 열원의 열접촉방식에 따라 달라짐¹⁾
 - 슬러지 건조기 유형은 대류형 건조기(드럼 건조기, 열풍 직접 건조), 전도형 건조기(뜨거운 표면과 슬러지 접촉), 대류형·전도형 혼합 건조기, 적외선 건조기(적외선 복사, 고주파 전류) 등이 있음
 - 일부 연구 결과 드럼 건조기와 유동형 건조기가 알갱이 형태 슬러지 건조와 안정화에 적합하다고 보고됨
 - 대류형 건조기의 공기보호 및 악취방지 시설 비용은 건조시설 비용의 30~35%로 높음

- 직접 건조 시설로 로터리 드럼 건조기, 유동형 건조기, 공압(pneumatic) 건조기가 있음¹⁾
 - 높은 온도로 건조되어 슬러지 먼지 및 먼지 폭발의 문제 있음
 - 직접 건조기는 먼지 및 VOC 가스 배출이 높고 건조슬러지의 재순환이 필요함
- 간접 건조기로 paddle 건조기, hollow flight 건조기, 디스크 건조기, 다중판 (multi-shelf) 건조기 등이 있음¹⁾
 - 간접 건조기는 악취 및 먼지의 위험도가 낮고 공기 오염이 적어 건조슬러지의 순환이 필요하지 않음
 - 간접 건조기는 직접 건조기보다 경제성이 떨어지고 건조효율이 제한되고 슬러지 체류시간이 길어지는 단점이 있음
- 대류형 건조기는 벨트 건조기, 직접 드럼 건조기, Flash 건조기가 있음²⁾
 - 건조속도는 벨트 건조기가 5~30 kg/m²·h로 가장 높고 에너지 소비량은 벨트 건조기가 700~1140 kWh/톤으로 가장 적음

Dryer types



슬러지 건조기 유형²⁾

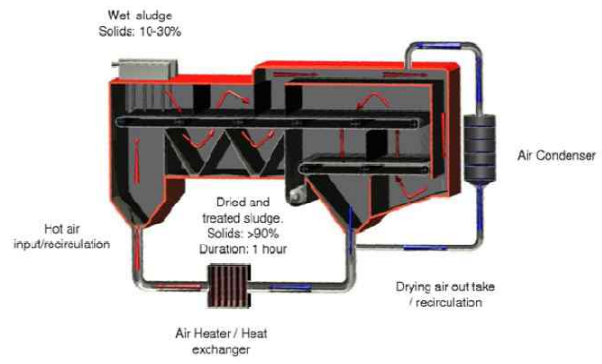
< 대류형 건조기 유형별 성능²⁾ >

건조기 유형	운전 범위	건조 속도 (kg/m ² ·h)	건조 에너지 소비 (kWh/ton)
벨트 건조기	전 범위 건조	5~30	700~1,140
직접 드럼 건조기	전 범위 건조 (건조 슬러지 반송 및 혼합)	3~8	900~1,100
Flash 건조기	전 범위 건조	0.2~1	1200~1,400

IV 하수슬러지 분야



벨트 건조기, HUBER(룩셈브루크, 테네빌)²⁾



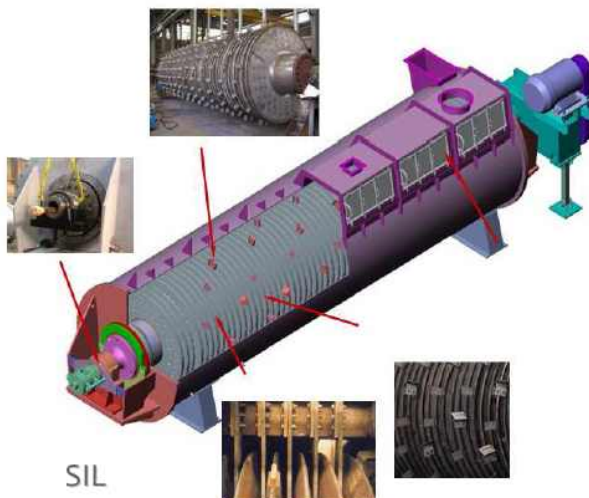
벨트 건조기, BioCon, Kruger(USA)²⁾

○ 전도형(conductive) 건조기는 디스크 건조기, Paddle 건조기, Thin Film 건조기가 있음²⁾

- 건조속도는 Thin Film 건조기가 25~35 kg/m²·h로 가장 높고 에너지 소비량은 Paddle 건조기가 800~885 kWh/톤으로 가장 적음

< 전도형 건조기 유형별 성능²⁾ >

건조기 유형	운전 범위	건조 속도 (kg/m ² ·h)	건조 에너지 소비 (kWh/ton)
디스크 건조기	부분 건조	10~12	855~955
	전 범위 건조 (건조슬러지 재활용)	7~10	
Paddle 건조기	전 범위 건조	15~20	800~885
Thin Film 건조기	부분 건조	25~35	800~900

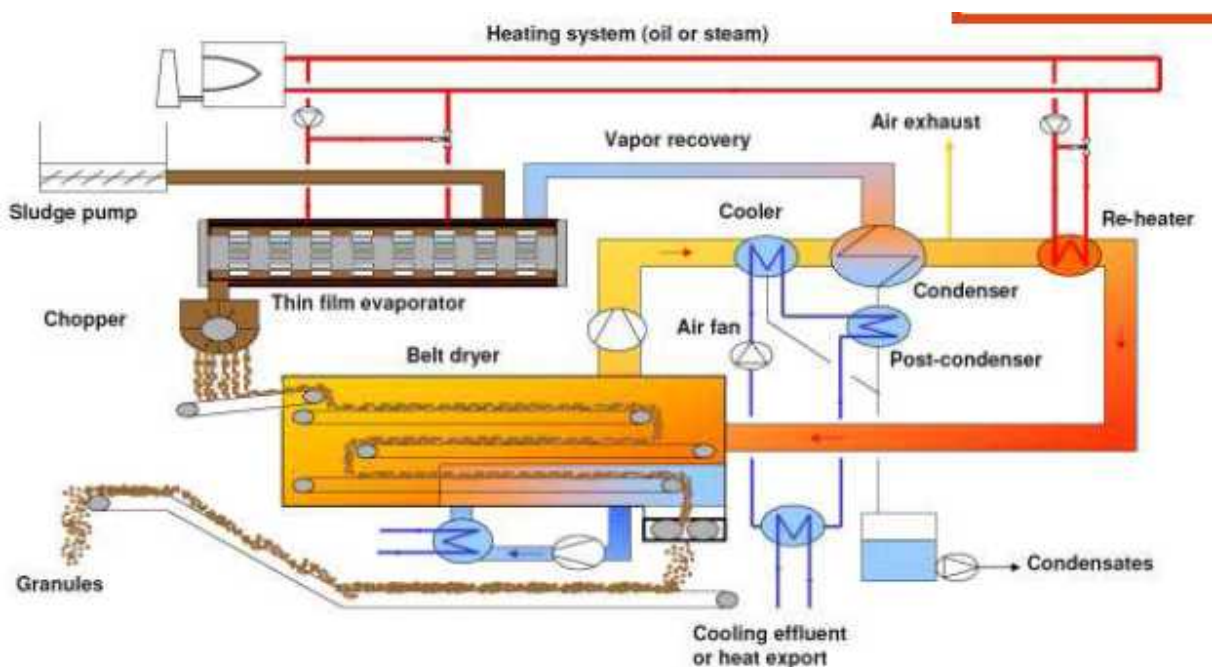


Gouda GMF

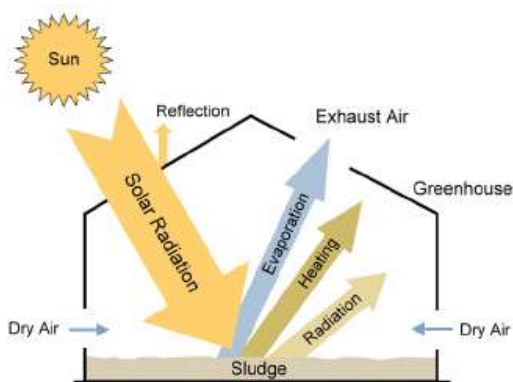
디스크 건조기²⁾

1. 하수슬러지 건조 기술·사례

- 혼합형 건조기로 Thin film 건조기에서 1단계 건조 후 벨트 건조기에서 2단계로 건조하는 시스템도 있음²⁾
 - 슬러지의 톤당 소비되는 에너지는 700~900 kWh이고 0.5~4 톤/h의 속도로 건조됨
 - 열회수 시스템으로 에너지 소비량 최소화됨
- 태양열 건조기는 온실에서 슬러지를 건조하는 기술임
 - 톤당 에너지 소비율은 30~200 kWh 정도이나 화학적 탈취시 1,000 kWh까지 높아질 수 있음



혼합형 건조 시스템(Thin Film 건조기, 벨트 건조기)²⁾



슬러지 태양열 건조기²⁾

1-3. 슬러지 건조 에너지 소비 및 효율 개선방안

- 슬러지 건조 시설의 최적 선정은 설치비용, 운전비용, 운전의 용이성, 기술의 신뢰도, 저장·이송의 용이성, 친환경 정도를 고려해야 함¹⁾
 - 슬러지 건조의 에너지 소비량은 슬러지 수분에 따라 달라짐
 - 슬러지 건조에 고효율 벨트 압축기나 챔버 압축기의 사용이 권장됨
 - 슬러지 안정화 방법에 따라 고형물 20~35% 탈수슬러지 생성이 가능함
 - 슬러지를 최소 고형물 18~20% 정도까지 탈수 후 건조시설에 유입해야 함
- 슬러지 건조 공정 에너지 소비량은 건조기 유형, 열회수 방법, 가스·스팀·기타 열원, 슬러지 특성에 따라 달라짐
 - 슬러지 열적 건조는 에너지 소비량이 많아 바이오가스, 소각로 폐열 및 건조시설 폐열을 사용하여 슬러지 건조에 필요한 화석연료 사용량을 줄여야 함
 - 프랑스 전문가가 제시한 슬러지 건조에 필요한 에너지 소비율은 다음 표와 같음
- 하수슬러지 건조 플랜트에 바이오가스를 사용하여 고형물 25%인 슬러지 1 m³ 건조시 13~15유로, 화석연료로 건조시 21~26유로 필요함¹⁾
 - 하수처리시설에 슬러지 건조기를 설치하면 생슬러지를 건조시설로 이송할 필요없음
 - 슬러지 건조시설 증기를 슬러지 처리라인으로 직접 보내 응축수 에너지를 회수하여 재사용할 수 있음
 - 반면 슬러지 건조시설 지역화로 건조시설 설치비 및 운영비가 상대적으로 높은 단점 있음

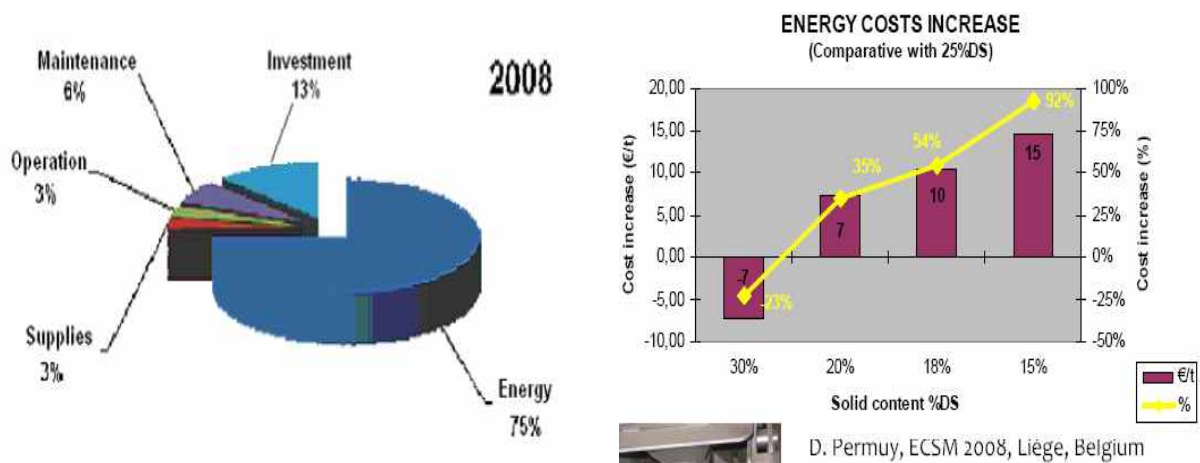
< 고형물 25% 슬러지 건조시 필요한 에너지¹⁾ >

에너지 소비 유형	단위	고형물 35%까지 건조	고형물 95%까지 건조
중유	l/t 고형물	120	300
전기에너지	kWh/t 고형물	30	50

수분 1톤 증발에 화석연료 100 L 소모 가정시

- 슬러지 건조 비용의 75%는 에너지 비용으로 에너지 사용량을 최소화하는 것이 필수적임²⁾
 - 슬러지 초기 고형물 함량이 낮을수록 건조 비용이 높아짐
 - 에너지 비용을 줄이기 위해 설계 및 운전조건의 최적화가 필요하며 현장의 열 (바이오가스, 폐열)을 사용하는 방법이 있음

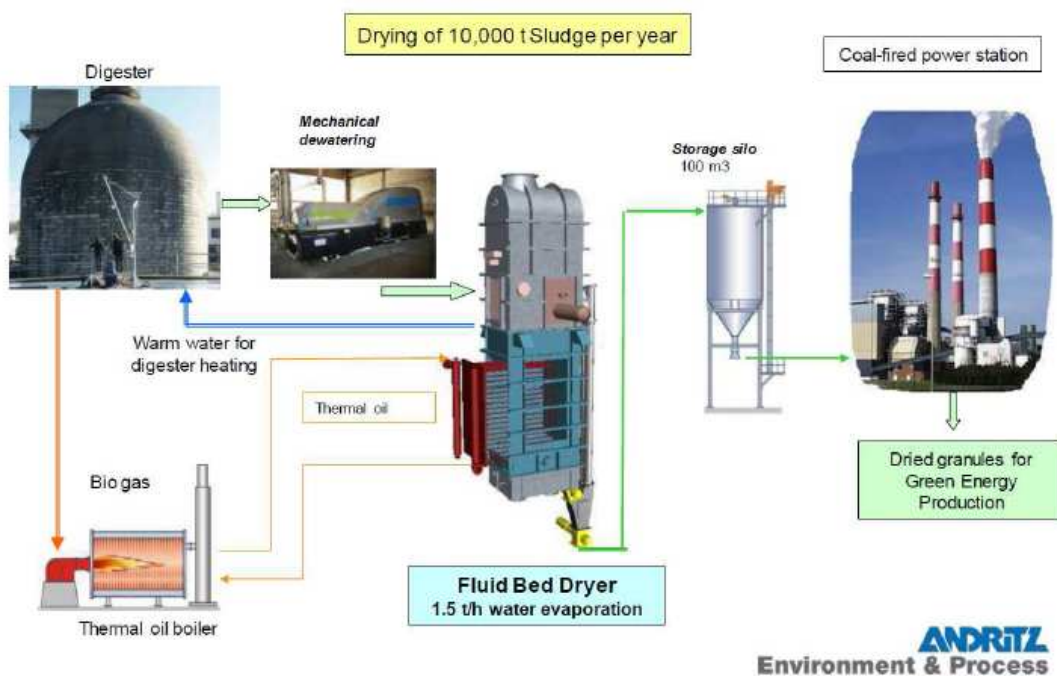
1. 하수슬러지 건조 기술·사례



슬러지 열적 건조 비용 분포²⁾

고형물 25% 슬러지와 비교한 고형물 함유량에 따른 건조 비용²⁾

- 독일 Memmingen 지역에서는 매년 만톤의 슬러지를 건조하는데 슬러지 소화시설에서 발생된 바이오가스를 열원으로 사용함²⁾
- 건조기는 유동상 건조기(Fluid Bed Dryer)로 시간당 1.5톤의 물이 증발되며 건조 슬러지는 석탄발전소의 대체연료로 사용됨

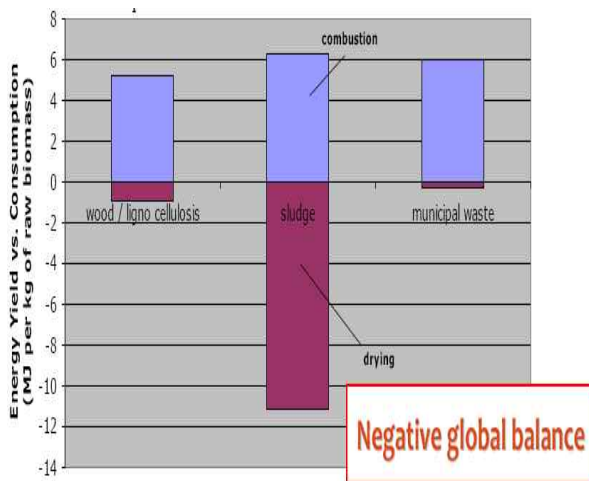


독일 Memmingen 지역 슬러지 건조 시스템(바이오가스 열원 사용)²⁾

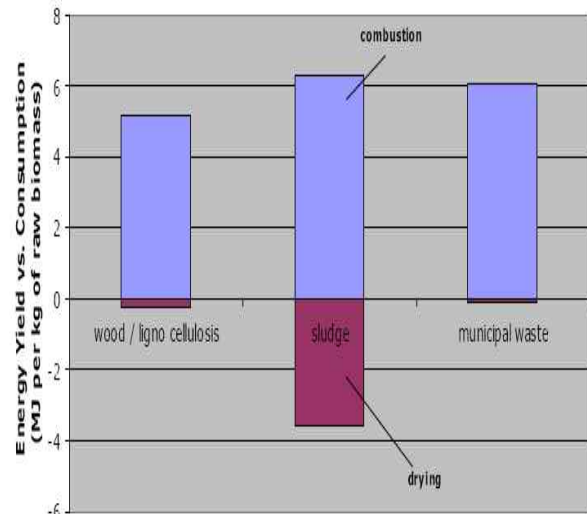
- 벨기에 테네빌(Tenneville) 지역에서는 슬러지 건조에 폐기물 소각장 스팀을 열원으로 사용함²⁾
- 건조기는 유동상 건조기로 연간 만톤이 건조되고 시간당 3.7톤의 물이 증발되며 건조슬러지는 석탄발전소 연료로 사용됨

IV 하수슬러지 분야

- 터키 헤레케(Hereke) 지역에서는 시멘트 킬른에서 열을 열교환기로 회수하여 슬러지 건조에 열원으로 사용함²⁾
 - 건조기는 벨트 건조기로 일 55톤 건조 슬러지 펠렛이 생산됨
- 슬러지 증발 잠열 대비 소비되는 에너지는 1.25 비율로 생산에너지보다 투입 에너지가 높아 경제성이 떨어짐²⁾
 - 슬러지 탈수·건조를 최적화한 경우 에너지 소비량이 작아져 슬러지 증발 잠열 대비 소비되는 에너지는 0.4 비율로 경제성 있는 기술이 될 수 있음
- 슬러지 건조 기술개발로 폐수처리시설 내 ‘제로 에너지’ 개념에서 슬러지 건조 공정 기술개발이 필요함²⁾
 - 에너지 최적화 위해 현장에 맞는 슬러지 처리 공정 개발이 필요함



슬러지 건조 에너지 소비량·생산량²⁾



슬러지 탈수·건조 최적화시 에너지²⁾

14. 슬러지 건조기 수분 제거 및 저장

- 슬러지 고형물이 45~65% 정도에서 끈적거리는 상태가 되어 건조기에 달라붙어 건조기 고장의 원인이 되어 건조기 효율이 저하될 수 있음¹⁾
 - 이를 방지하기 위해 건조슬러지(고형물 90~95%)를 탈수슬러지(고형물 20~35%)와 혼합하여 고형물 65~75%인 슬러지를 건조기에 주입할 수 있음
 - 건조슬러지와 탈수슬러지의 혼합으로 슬러지 알갱이화가 촉진되어 건조에 유리함
 - 고형물 48~80% 범위 슬러지 건조는 하수슬러지 점성 특성 고려시 바람직하지 않음
 - 부분 건조(고형물 30~48%)나 완전 건조(고형물 80~97%)가 건조시설 운영에 적합함
- 건조기에서 포집된 증기는 대기배출 전에 사이클론(먼지제거)이나 백필터로 처리함¹⁾
 - 이후 증기는 냉각되어 응축수를 하수처리시설로 보내고 증기응축 시스템으로 스프레이 장치와 멤브레인 열교환기가 사용될 수 있음

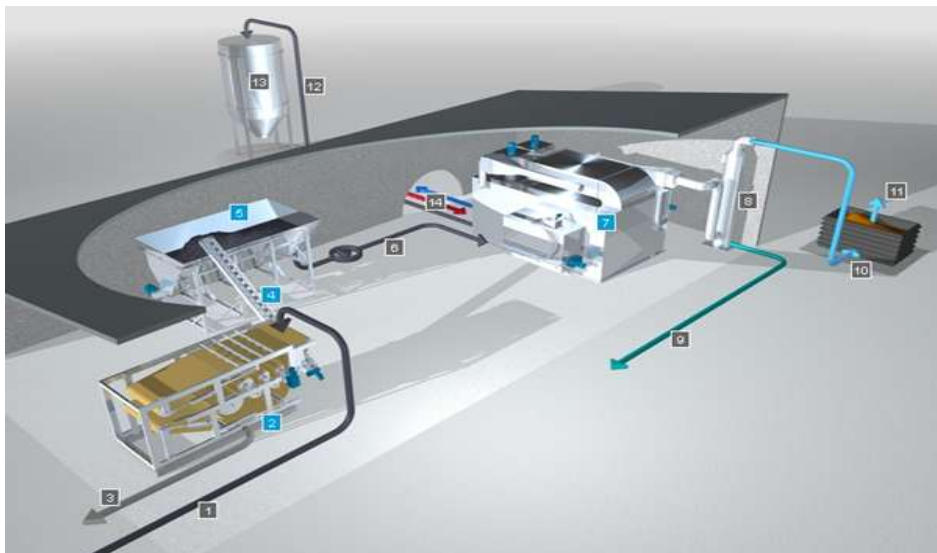
1. 하수슬러지 건조 기술·사례

- 뜨거운 증기에서 회수된 열을 건조공정에 재사용할 수 있고 증기없는 공기는 생물학적 필터나 연소로 탈취하여 대기로 방출함
- 탈수슬러지와 건조슬러지를 저장할 필요있고 이미 건조된 슬러지는 대기 중 수분이 흡수되지 않도록 질소가스 조건하에 사일로에 저장하여 자체 연소를 방지함

2 하수슬러지 열적건조 기술사례

2-1. HUBER 중온 벨트 건조 기술

- HUBER 중온 벨트 건조기는 자동 및 연속 운전되는 에너지 절약형 친환경 슬러지 건조 기술임³⁾
 - 열병합발전(CHP) 시스템의 냉각수로 슬러지를 90~130℃ 중온으로 150분 정도 건조함
 - 벨트 건조기 건조로 유럽 및 국제 기준에 부합하는 바이오고체(biosolids) 생산이 가능함
- HUBER 중온 벨트 건조기 사용으로 취급하기 용이한 알갱이 형태의 건조슬러지 생산이 가능함
- 중온 벨트 건조기로 고형물 함량 65~90% 범위에서 선택적 건조 가능함³⁾
 - 슬러지 살균에 적합한 기술이며 기후와 관련 없이 연속적인 자동운전이 가능함
 - 마모가 적고 먼지 발생량이 적어 안전 운전이 가능하며 스크러버와 바이오필터로 배출가스를 탈취함
 - 열소모량이 1 kg 물 증발에 0.9 kWh 정도로 낮고 열병합발전 시스템에서 중온 열이 공급되는 에너지 절약형 기술이고 운전 및 유지관리 비용이 적음



중온 벨트 건조기 시스템 개념³⁾

1. 액체 슬러지, 2. 슬러지 탈수 벨트 필터 압축기(press), 3. 폐수처리 시설 반송 여과액,
4. 탈수 슬러지 이송(스크류 컨베이어), 5. 바닥 스크류 설치된 저장 탱크, 6. 탈수슬러지 건조기 이송, 7. HUBER 중온 벨트 건조기, 8. quenschel, 9. 응축수 폐수처리시설 반송,
10. 배출공기 바이오필터 탈취, 11. 배출 공기, 12. 건조 슬러지 버킷 컨베이어, 13. 건조슬러지 사일로, 14. 가열용 온수 공급

3. 'HUBER Belt Dryer BT', HUBER Technology(www.huber-technology.com)

1. 하수슬러지 건조 기술·사례

- 슬러지 온도가 70℃ 이상에서 최소 30분 이상 유지시 안전하게 살균됨³⁾
 - 슬러지가 벨트 이송 중 고형물 함량이 70~80% 도달되면서 증발이 느려지고 냉각효과가 저감되어 슬러지 온도가 70℃ 이상 높아짐(건조 공기 온도보다 약간 낮음)
- 독일 Bavaria 주 중부 도시 잉골슈타트(Ingolstadt)에 2005년 8월 2개의 HUBER 벨트 건조기(KULT BT 80)가 설치되어 운전되었음³⁾
 - 인근 소각로 물·증기 열교환기로부터 공급된 53℃ 정도의 온수로 슬러지가 건조됨
 - 소각로 응축 터빈 배출 증기가 연중 사용가능하여 슬러지 처리시설에 무상 공급됨
 - 슬러지는 고형물 90%까지 건조되어 소각로에서 연소됨
- 2개의 건조라인에 슬러지가 연중 12,000톤 유입되어 고형물 함량이 약 30%에서 약 90%로 높아지면서 건조됨³⁾
 - 연간 운전시간은 8,000시간(333일 이상) 이상으로 라인(line) 당 최대 물증발량은 약 600 kg/h이고 건조슬러지 생성 속도는 900 kg/h 정도임



독일 잉골슈타트(Ingolstadt)에 설치된 중온 벨트 건조기³⁾

- 미국 무어스빌(Mooresville) 지역에 설치된 HUBER 벨트 건조기는 중온으로 건조되는 전자동 플랜트임³⁾
 - 플랜트에 벨트 건조기(2 m×20 m 건조 면적)가 2개 설치되어 있음
 - 천연가스로 운전되는 보일러로 약 95℃의 온수를 공급하고 건조 공기를 열교환기로 가열하여 건조함
 - 슬러지를 스파게티 모양으로 압축·주입하여 단위부피당 표면적을 증가시켜 건조 효율을 높임
 - 건조 후 먼지없는 건조슬러지 알갱이는 비료로 사용가능함

IV 하수슬러지 분야

- 건조플랜트는 음압으로 운전되어 악취 문제가 예방되고 건조기 배출가스는 2개의 에어워셔(air washers)로 처리하여 악취를 제거함³⁾
 - 미국 무어스빌(Mooresville) 지역에 설치된 HUBER 벨트 건조기는 에너지 효율이 높아 비용이 효율적이고 완전 자동화 시설로 운전이 용이함
 - 위 시설로 슬러지 처리 비용이 대폭 절감됨



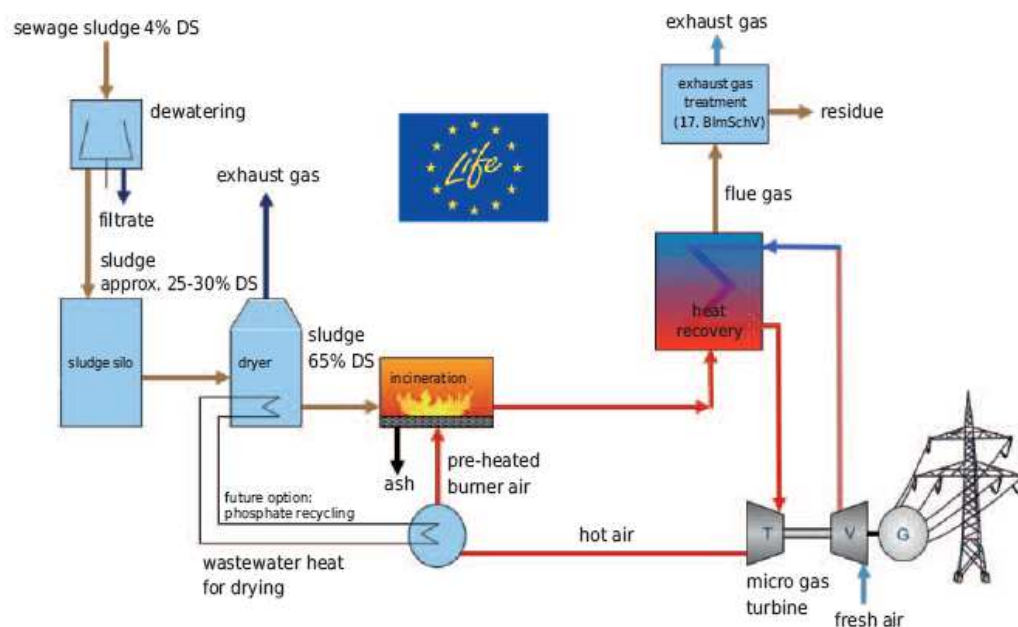
미국 무어스빌(Mooresville) 지역에 설치된 중온 벨트 건조기³⁾

- 독일 Backnang 지역 하수슬러지 건조 플랜트에서 HUBER 벨트 건조기를 2010년 설치하여 연간 16,000톤 처리 용량으로 현재 연간 10,000톤 처리 중임³⁾
 - 슬러지 건조에 필요한 에너지는 인근 바이오발효(bio-fermentation) 플랜트에서 발생된 배출열을 사용하고(총 850만 kWh) 바이오발효 플랜트에 kWh 당 3센트를 지불함
 - 건조 알갱이는 사일로에 저장된 후 매주 석탄발전소로 이송되어 연료로 사용됨
 - 건조슬러지의 열에너지는 석탄에너지와 비슷하여 건조된 하수슬러지로 화석연료를 대체할 수 있고 지자체에 수익이 발생될 수 있음

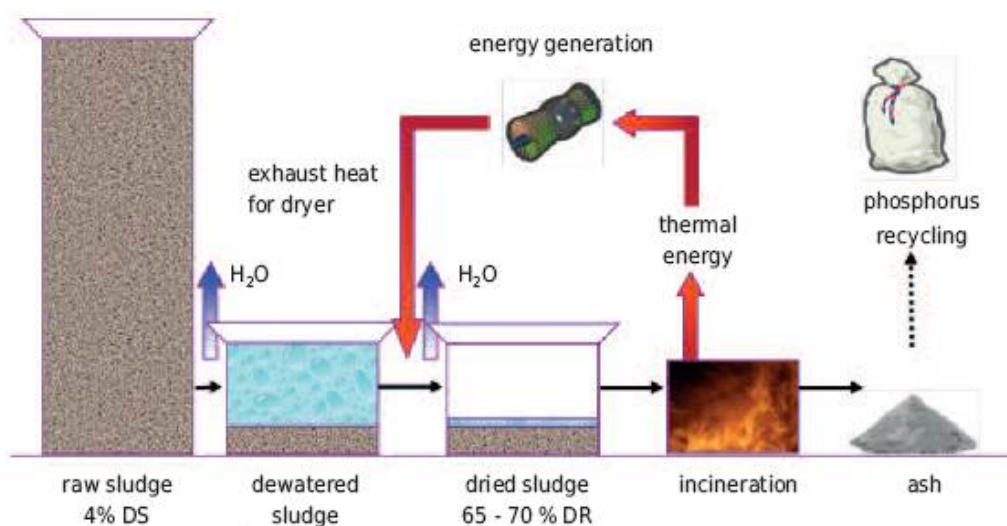


Backnang 지역 HUBER 하수슬러지 건조 플랜트³⁾

- HUBER 벨트 건조 공정은 슬러지에너지화 시스템으로 벨트건조기, 마이크로 가스터빈(100 kW 전력생산), 1 MV 스토커 연소기로 구성됨⁴⁾
 - 고형물 4%인 슬러지를 기계적 탈수 후 고형물 25~30% 슬러지를 건조하여 고형물 65% 건조슬러지가 생산됨
 - 건조슬러지는 소각로에서 연소하고 소각기 열은 회수하여 마이크로 가스터빈으로 전기를 생산하며 일부 열은 건조기와 소각기에 열원으로 공급됨
 - 최종적으로 소각재에서 인을 회수하여 재활용함



HUBER 벨트 건조기 슬러지 에너지화 시스템⁴⁾

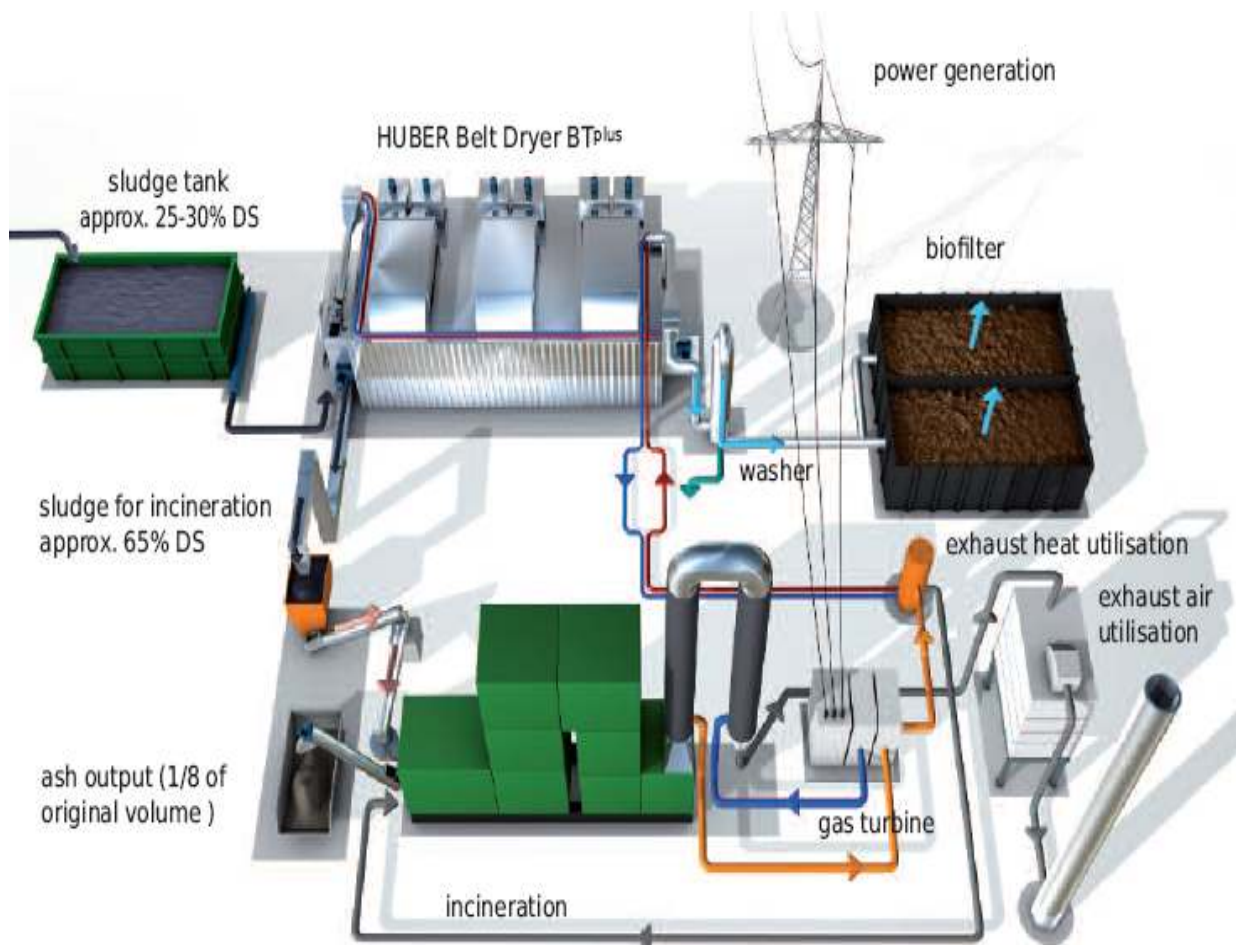


슬러지에너지화 시스템 처리 단계⁴⁾

4. 'Energy efficiency of sludge drying processes', A. Leonard, Laboratory of Chemical Engineering, University of Liege

IV 하수슬러지 분야

- 독일 Straubing 지역 폐수처리시설에서 혐기성 슬러지 처리 및 탈수 후 매년 9,000톤의 슬러지가 생성됨⁴⁾
 - 고형물 25~30%의 슬러지는 HUBER 벨트건조기에서 건조 후 고형물 65%로 건조됨
 - 건조슬러지는 1,020 kWh 에너지 생산가능하며 갈탄을 대체할 수 있음
- 건조슬러지 연소시 약 800 kWh 열에너지가 보일러로 회수되고 마이크로 가스 터빈에서 열손실 후 약 700 kWh 열에너지가 생산됨⁴⁾
 - 건조 공정에 약 565 kWh 열에너지가 사용되고 일부 잉여 열에너지가 남음
- 마이크로 가스 터빈으로 80 kWh 전력이 생산되어 약 40 kWh는 슬러지 건조 플랜트 운영에 사용되며 나머지 40 kWh는 소각플랜트 운전에 사용됨⁴⁾
 - 에너지 자급형 하수슬러지 처리시설은 벨트건조기, 소각기, 마이크로 가스터빈 구성으로 가능함
 - 에너지 절약형 공정은 벨트 건조기 최적화 및 소각기 배출가스 열활용에 있음



독일 Straubing WWTP 하수슬러지 에너지화 시설 구성⁴⁾

2-2. Dorset 슬러지 건조 기술

- 하수슬러지는 건조하여 시멘트 산업 등에 난방용 연료로 사용될 수 있음⁵⁾
 - 하수슬러지 건조 후 고형물이 90% 이상인 경우 에너지원으로 사용할 수 있음
 - Dorset Green Machines B.V. 기기로 20~90 °C 공기를 사용하여 낮은 열량으로 건조할 수 있음(전력 사용 최소화)
 - 전기생산에 생성된 잔류열(폐열)로 하수슬러지를 건조함
- 처음 공급된 하수슬러지를 병커에 저장하고 컨베이어 벨트나 컨베이어 체인으로 운반하여 건조기를 하수슬러지로 채움⁵⁾
 - 건조기에 pendulum 컨베이어가 장착되어 슬러지를 파우더 코팅된 구멍뚫린 시트에 분배함
 - 하수슬러지 건조는 유입공기와 유출공기 유량에 온도센서로 공정이 제어됨
 - 건조된 생성물은 컨베이어 스크류 보관소로 이송되고 슬러지 건조기는 Dorset Biologic Air Washers와 함께 사용하여 악취가 기준 이하로 저감됨



Dorset 하수슬러지 건조 시설⁵⁾



컨테이너형 건조시설⁵⁾



건조된 하수슬러지⁵⁾

IV 하수슬러지 분야

- Dorset 건조 공정은 고형물, 반고형물, 액체에서 증발로 물을 제거하는 공정임⁵⁾
 - 건조된 따뜻한 공기와 수분이 접촉되어 수분이 증발됨으로 건조물질의 부피가 저감됨
 - 건조물의 고형물 함량이 8%에서 90%로 높아질 수 있고 건조물이 재활용될 수 있음
- Dorset 건조기는 구멍난 강철 플레이트가 연결된 컨베이어 벨트임⁵⁾
 - 통기 장치로 구멍난 플레이트 위에 슬러지를 통과한 공기를 빨아들여 슬러지와 공기의 효율적 접촉이 가능함
 - 공기 유속이 높은 경우 먼지가 생성될 수 있어 낮은 유속의 공기를 공급함
 - 이외 공기 수분이 낮을수록 건조가 촉진됨



Dorset 건조기⁵⁾

- Dorset 건조기 컨베이어 벨트에 강철판이 롤러 체인으로 이동되고 상위층에 슬러지가 분배되면서 건조기로 이송됨⁵⁾
 - 이 공정에서 따뜻한 공기가 건조기로 빨려들어감
- Dorset은 열원에서 건조기로, 건조기에서 외부 대기로 공기를 이송하기 위해 샌드위치 패널인 공기 채널을 사용함⁵⁾
 - 이 패널은 먼지 생성이 최소화되면서 필요한 공기 흐름이 충분하게 제공되는 장점이 있음
- 화학적 공기 세척으로 공정 악취 중 암모니아를 황산과 효율적으로 접촉하여 황산암모늄으로 회수함으로서 제거함⁵⁾
 - 이외 물 커튼을 사용하여 먼지를 제거하고 스프레이 물 사이로 공기를 빨아들여 물에 먼지를 흡수 제거함
 - 컨테이너 건조기 안에 공기 세척 시설이 설치될 수 있음



건조 공정 후 배기가스 중 암모니아 및 먼지 제거 공기 세척기(air washing)⁵⁾



컨테이너형 건조기⁵⁾



컨테이너 건조기 안 공기 세척기⁵⁾

- Dorset 하수슬러지 건조기술은 연중 잔류열을 이용할 수 있고 처리·저장 비용이 저렴하며, 악취·배출가스를 저감할 수 있는 장점이 있음⁵⁾
- Dorset 건조기는 에너지 소비가 적고, 유지보수가 거의 필요없으며 완전 자동화가 가능함
- 이외에도 탈수된 슬러지는 중간 처리 없이 건조될 수 있고 공기 속도가 낮아 먼지 발생이 적으며 Dorset 공기 세척기 사용이 용이함

2-3. Stela 슬러지 저온 벨트 건조 기술

- Stela 저온 건조 시스템은 다양한 슬러지를 에너지 저감형 기술로 고형물(DS) 함량을 65~95%로 건조하는 기술임⁶⁾
- 하수슬러지를 특별 압출성형기로 압출하여 고형물 약 20~30%의 슬러지로 탈수함
- 컨베이어 벨트로 하수슬러지가 건조기 터널로 천천히 이송되면서 건조됨⁶⁾
- 벨트 이송 시스템에 의해 슬러지의 마찰력, 전단력, 원심응력(centrifugal stress)이 최소화됨
- 시스템은 벨트 하나의 통로에서 최종 수분까지 건조됨
- 건조 구역에서의 슬러지 체류 시간은 분단위로 조정될 수 있음

6. 'Low temperature belt dryer for sewage sludge', Stela drying technology

IV 하수슬러지 분야

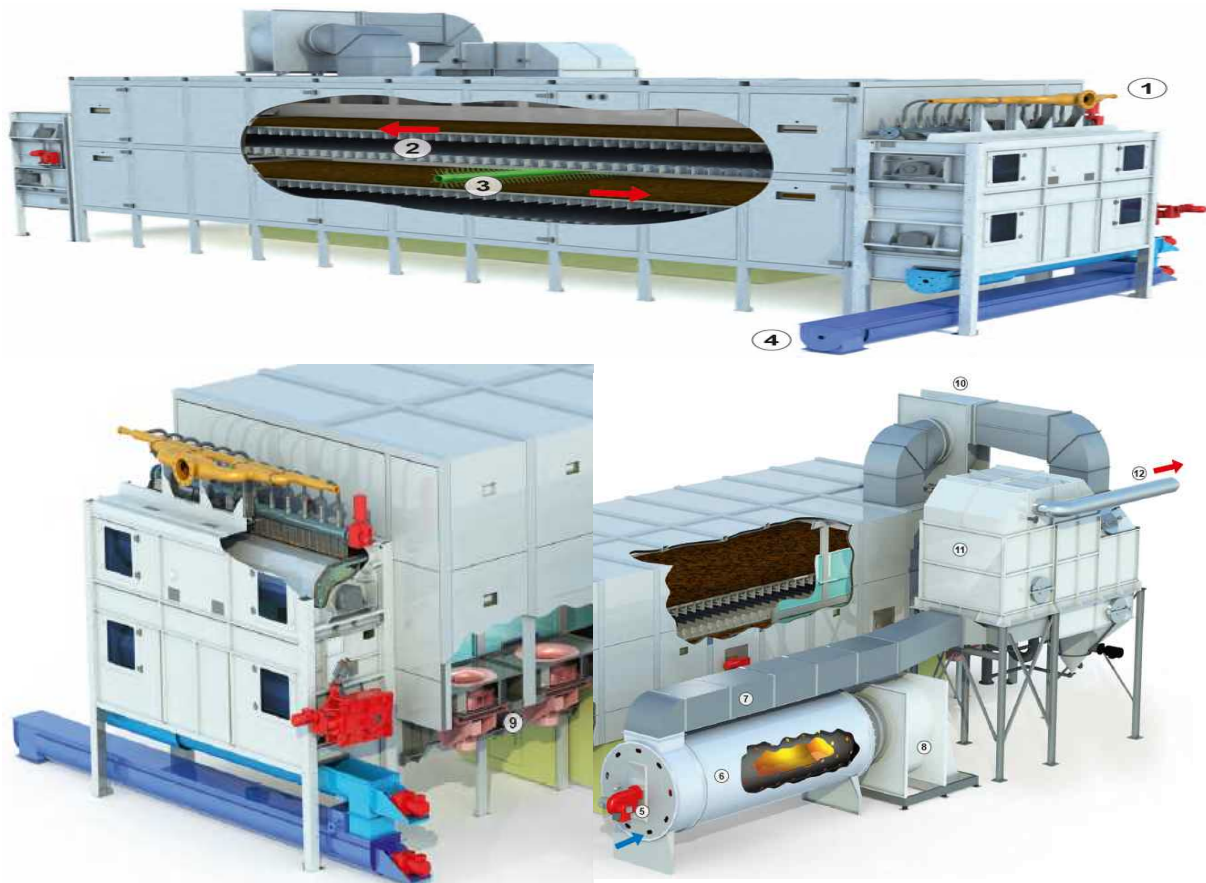
- Stela 저온 벨트 건조기의 슬러지 알갱이화로 최종 수분 함량이 균질한 건조물 생산이 가능함⁶⁾
 - 에너지 절약형 배출가스 재순환 시스템이 적용되었고 자동화로 운전 및 유지 관리가 복잡하지 않은 장점 있음
 - 이외 건조기 설치가 유동적이어서 필요에 따라 다수의 벨트 건조기가 설치될 수 있음



저온 벨트 건조기 시스템⁶⁾

- 열수, 천연가스, 바이오가스, 스팀, 배출가스, 석유 등 다양한 에너지원이 사용될 수 있음⁶⁾
 - 열회수로 에너지 효율이 높고 상세한 공정 모니터링으로 건조기 운전시 안전도가 높음
 - 배출가스 부피가 작고 온도가 낮아 악취 배출이 최소화됨
- 슬러지에 물(H_2O) 1 kg 증발에 0.8 kWh 열에너지가 소모되고 전기에너지는 0.05 kWh 소비됨⁶⁾
 - 슬러지 수분 증발 용량 범위는 100~25,000 kg/h이고 용량에 따라 벨트 너비가 달라짐
- 2013년 터키 이즈미르 지역 폐수처리 플랜트에 시간당 25,000 kg/h 물이 증발되는 4개의 대형 건조기 플랜트가 설치되었음⁶⁾
 - 약 33,000 kg/h 슬러지(고형물 23%)가 건조플랜트 펠렛화 기기로 이송됨
 - 슬러지는 국수 모양으로 성형되어 건조기 전체 너비에 균등하게 분배됨
 - 건조기에서 고형물 92% 건조슬러지로 건조됨

1. 하수슬러지 건조 기술·사례



Stela 하수슬러지 벨트 건조기 구성도⁶⁾

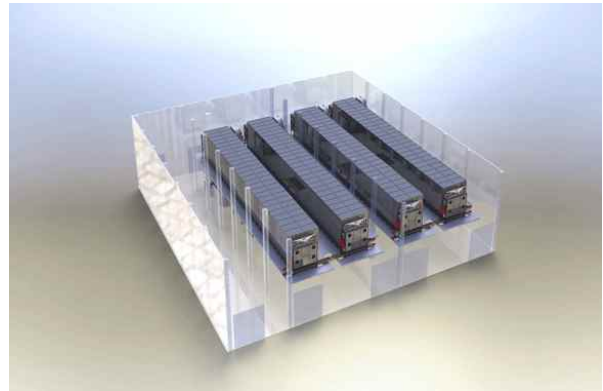
1. 알칼리화 기기, 2. SS 플레이트 벨트, 3. 뒤집기 기기, 4. 냉각수 배출 스크류, 5. 깨끗한 공기, 6. 열풍 생산, 7. 열회수, 8. 열풍팬, 9. 공기 순환 팬, 10. 양생팬, 11. 양생 및 응축, 12. 가스 배출



열풍 건조 흐름도⁶⁾

- 뜨거운 공기가 건조기 전체 길이로 공급됨
- 건조 공기는 부분적으로 배치된 순환 공기 팬을 통해 뜨거운 공기와 혼합됨
- 슬러지는 바닥에서 상부로 이송되면서 벨트에 직접 접촉한 슬러지 층의 안전한 건조 보장
- 포화된 순환 공기는 STELA 양생기에서 응축되고 열은 회수되어 공정으로 재공급됨
- Stela 양생기에 응축반응으로 배출가스 부피 최소화됨

IV 하수슬러지 분야



터키 이즈미르 지역 하수슬러지 벨트 건조기⁶⁾

- 슬러지 전처리 과정 중 생산된 바이오가스로 건조 열원을 공급하고 보조연료로 천연가스를 사용함⁶⁾
 - 수분 증발량이 많아 열에너지 소비량을 최소화하기 위해 정교한 공기 순환 시스템이 필요함
- 기존 배출가스 순환 기술로 배출가스는 200,000~300,000 m³/h 발생되나 본 시스템에서는 배출가스 응축 및 회수된 응축수 재처리를 통해 배출가스 악취를 제거함⁶⁾



폴란드 하수슬러지 건조기⁶⁾
(물 증발 용량 : 1,250 kg/h)



아일랜드 하수슬러지 건조기⁶⁾
(물 증발 용량 : 1,250 kg/h)



프랑스 하수슬러지 건조기⁶⁾
(물 증발 용량 : 900 kg/h)



영국 하수슬러지 건조기⁶⁾
(물 증발 용량 : 3,000 kg/h)

2-4. Andritz 슬러지 건조 기술

- Andritz 기술은 슬러지를 농축, 탈수, 건조 및 연소하는 기계적·열적 슬러지 처리 시스템임⁷⁾
 - 슬러지 농축으로 체, 스크린, 모래 필터를 통해 고형물 4%의 슬러지가 생성됨
 - 슬러지 탈수 공정에서는 벨트압축기, 원심분리기 및 필터 압축기를 사용하여 탈수함으로 고형물 함량 25% 슬러지가 생성됨
 - 탈수된 슬러지를 벨트형, 드럼형 및 유동형 건조시스템에서 열적 건조하여 고형물 90% 이상 건조슬러지가 생성됨
 - 건조슬러지는 소각하여 에너지를 회수하거나 비료, 조경용 개량제 등으로 재사용됨
- 건조 후 생성된 알갱이 형태 건조슬러지는 고형물 함량이 90% 이상이고 먼지 양이 적고 취급하기 용이하여 석탄발전소, 소각로, 시멘트 킬른 등에서 연소됨⁷⁾
- 슬러지 건조 반응기로 벨트 건조기, 유동형 건조기, 드럼 건조기가 있음⁷⁾
- Andritz 벨트 건조기 시스템 혼합기에서 탈수된 슬러지를 이미 건조된 건조슬러지와 혼합함⁷⁾
 - 습한 슬러지를 건조기 벨트에 특별히 설계된 주입 모듈로 균일하게 분배함
 - 벨트 위 균일한 슬러지 층이 조성되어 건조 공기 분배에 최적 조건이 형성되어 하수슬러지의 균일한 가열 및 건조가 가능함
- 본 시스템은 하수슬러지 건조기와 시멘트 킬른을 결합하여 열·물질이 순환되는 자원절약형 기술임⁷⁾
 - 하수슬러지 건조에너지는 시멘트 클링커 냉각기(clinker-cooler)에서 100% 공급됨
 - 건조된 슬러지는 시멘트 킬른에서 탄소중립(carbon neutral) 보조연료로 사용되어 열발생에 사용됨
 - 하수슬러지 재(ash)는 시멘트 생산시 원료로 첨가



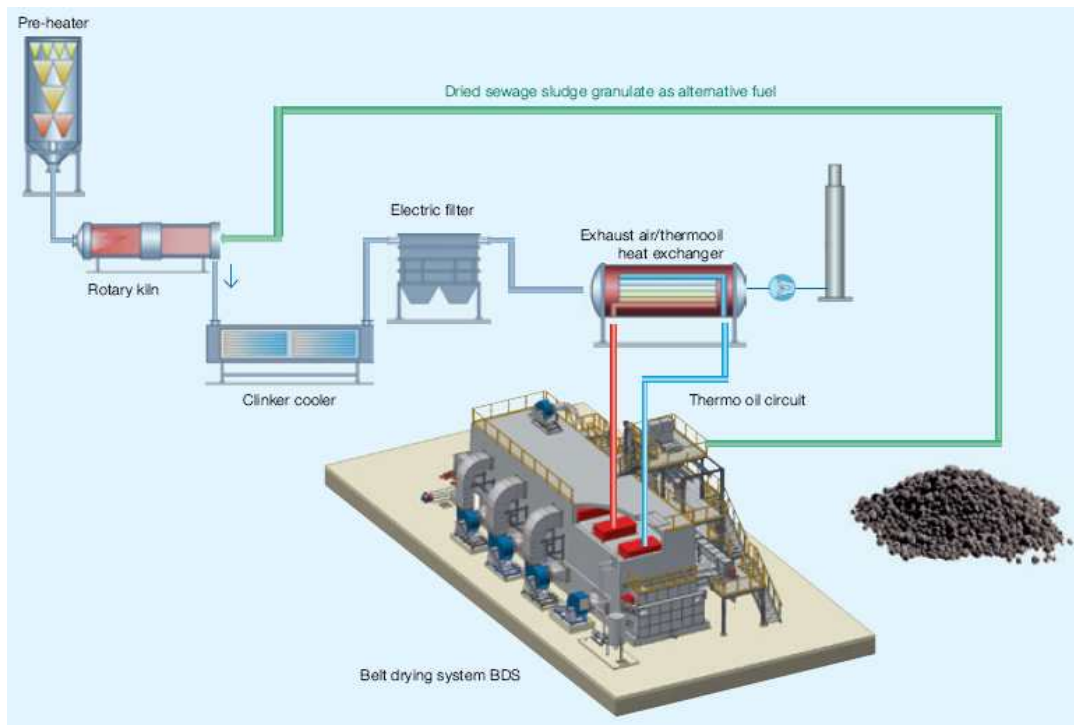
프랑스 벨트 건조기⁷⁾



터키 벨트 건조기⁷⁾

7. 'ANDRITZ Fluid bed drying system FDS', ANDRITZ

IV 하수슬러지 분야



벨트 건조기 및 건조슬러지·공정열 열회수 시스템⁷⁾

- 본 기술이 적용된 30개 이상 플랜트에서 연간 약 80만톤 탈수된 슬러지가 건조되고 있음⁷⁾
 - 벨트 건조기는 낮은 온도의 폐열을 사용하는 기술로 경제적임
 - 1차 에너지와 원료 사용이 대체되어 운전 비용이 대폭 절감됨
- 유동형 건조기는 폐쇄형 불활성 가스 통로(closed inert gas loop)에서 탈수된 슬러지를 건조함⁷⁾
 - 증발에 필요한 열은 직접 접촉없이 열교환기를 통해 건조기에 공급됨
 - 탈수 슬러지는 직접 유동형 건조기에 주입되고 기계적 breaker에 의해 파쇄되며 유동형 가스에 의해 이미 건조된 슬러지 알갱이와 혼합됨
 - 유동형 건조기에 열·물질 교환이 우수하여 주입된 슬러지는 짧은 시간 동안 85℃에서 고형물 90% 이상으로 건조됨
 - 유동형 건조기는 산업공정의 폐열을 사용하고 일부 1차에너지(primary energy)로 사용함
- 불활성 가스 조건에서 건조하여 안전도가 높고 자동운전으로 운전인력이 야간·주말 없어도 운전가능함⁷⁾
 - 폐쇄형 가스 루프로 열효율이 높으며 폐쇄형 설계로 폐가스 발생량이 200 m³/h 미만으로 적음
 - 전세계 30개 이상 플랜트가 운전 중이며 매년 8,000시간(333일) 이상 운전되고 있음

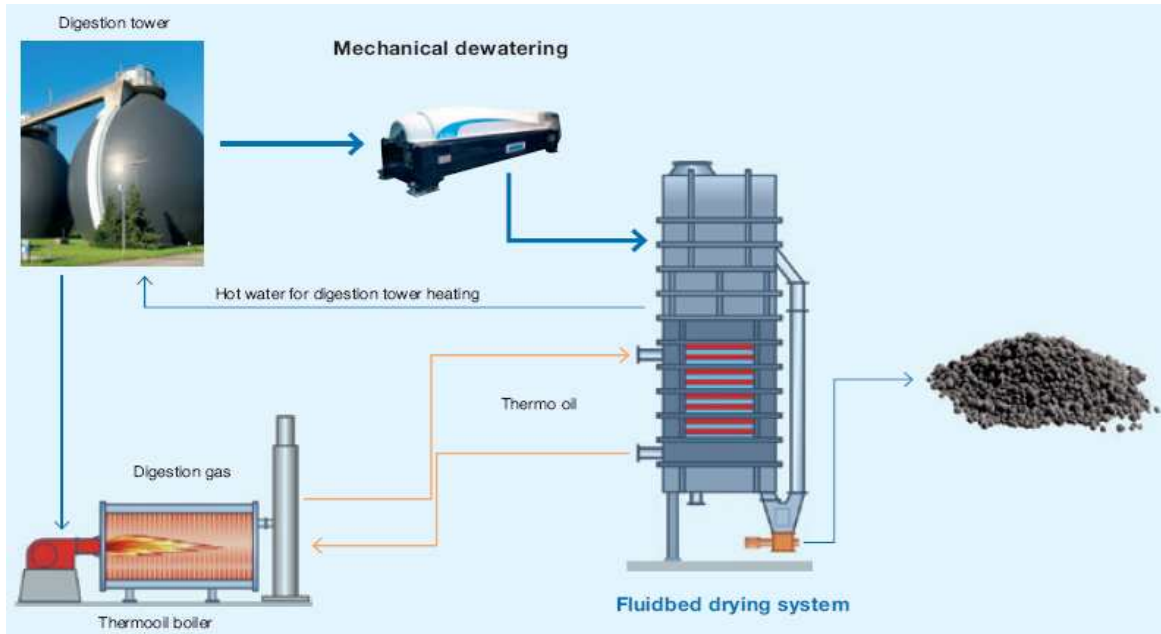
1. 하수슬러지 건조 기술·사례



스페인 유동형 베드 건조 플랜트⁷⁾



중국 유동형 베드 건조 플랜트⁷⁾



유동형 건조 플랜트 및 소화시스템의 에너지 흐름도⁷⁾

- 탈수된 슬러지를 건조하는 열은 혐기성소화조에서 생산된 소화가스를 연소하여 공급함⁷⁾
 - 동시에 유동형 건조기에서 소화조 온도를 높이기 위한 열에너지가 공급됨
 - 건조된 슬러지 알갱이는 시멘트 생산 현장이나 석탄발전소에 대체연료로 사용될 수 있음
 - 유동형 건조기 슬러지 건조에 열에너지 공급을 위한 추가 비용은 없으며 친환경 기술로 하수슬러지 이송 비용을 줄이고 연료가 생산되는 기술임
- Andritz 드럼형 건조기는 가장 오래된 기술로 탈수된 슬러지를 혼합기에서 고형물이 60%인 건조슬러지와 혼합함⁷⁾
 - 미리 알갱이화된 습한 알갱이를 드럼에 주입 후 뜨거운 가스를 드럼 통해 주입하여 슬러지 수분이 증발됨
 - 천천히 회전되는 드럼은 실린더형으로 일정하게 회전함으로 둥근 알갱이 건조 슬러지가 형성됨
 - 최종 건조물은 먼지없는 건조슬러지로 고형물은 92~95% 정도임

IV 하수슬러지 분야

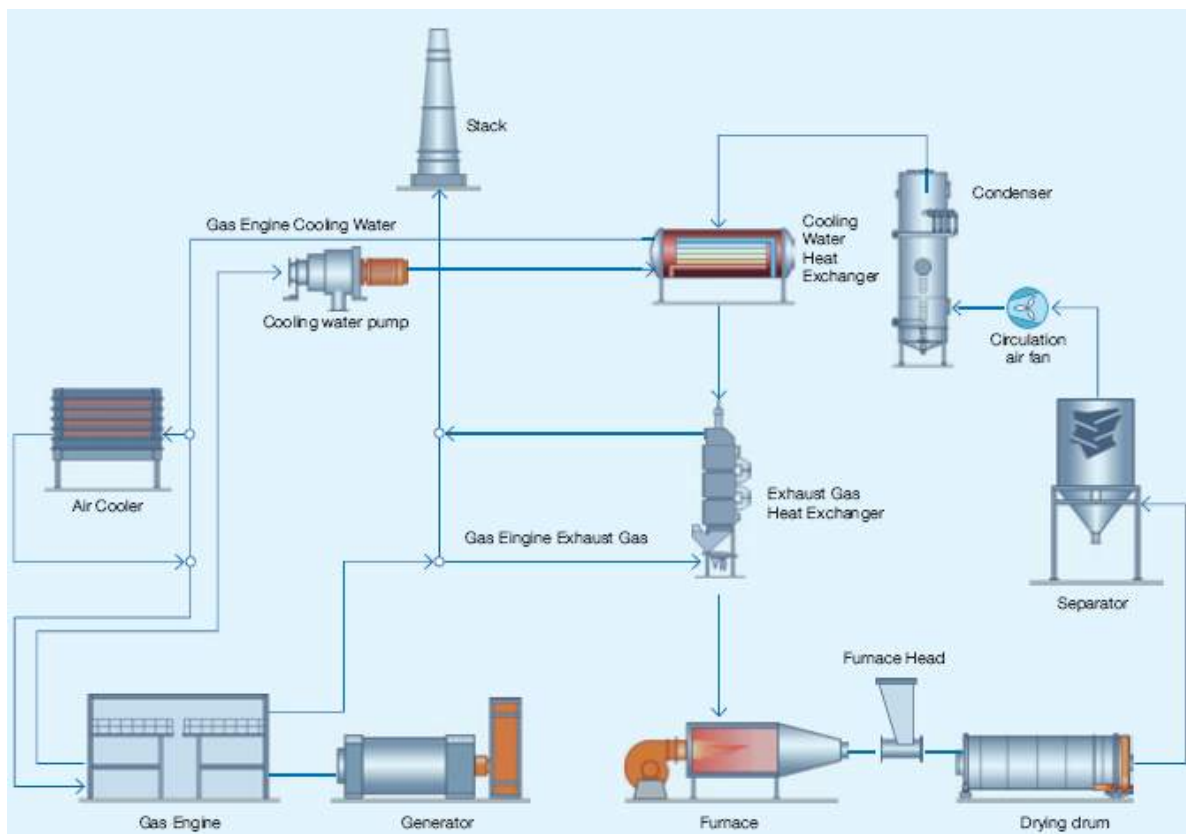
- 드럼형 건조기는 특별한 드럼 설계로 에너지 소비가 적고 부분적인 진공 운전으로 악취가 적으며 폐쇄형 공기순환루프 운전으로 배출가스 양이 적음⁷⁾
 - 견고한 플랜트 구성, 짧은 이송 루트 및 압축형 설계로 플랜트 내구연한이 길다는 장점있음
- 드럼형 건조기는 40년 동안 성공적으로 운전된 기술로 라인당 12톤/hr까지 증발 가능함⁷⁾
 - 약 70개의 드럼형 건조 플랜트가 전세계적으로 설치되어 연간 560만톤 이상의 탈수된 슬러지가 건조되고 있음
 - 연간 물은 400만톤 증발되고 120만톤 건조 알갱이가 활용됨



영국 드럼 건조기 플랜트⁷⁾



프랑스 드럼 건조기 플랜트⁷⁾



드럼 건조기 플랜트 흐름도⁷⁾

- 슬러지 건조플랜트 운전에 필요한 열에너지는 배출가스 열과 냉각수 열을 열교환기로 회수하여 공급됨⁷⁾
 - 열병합발전과 통합한 드럼 건조기 운전으로 폐가스 직접 사용 및 높은 발전 효율로 인해 이산화탄소 및 배출가스 발생량을 20% 이상 줄일 수 있음
 - 열병합발전소 폐가스와 건조시스템의 직접 접촉없이 안전한 운전이 가능하며 생성물 품질의 손상없이 열병합발전 모드에서 건조기 모드로 전환이 쉽고 빠름

2-5. Vandenbroek International 슬러지 건조 기술

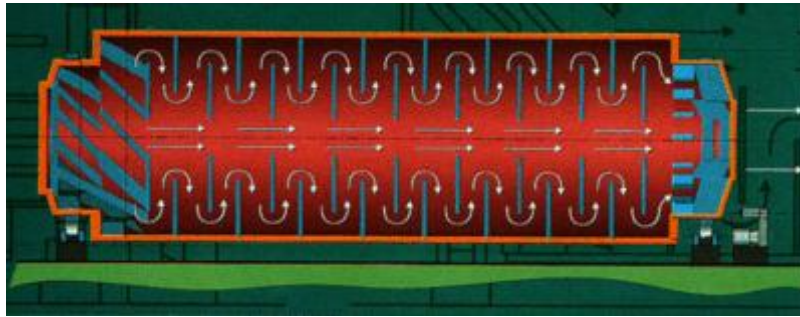
- Vandenbroek International은 대류형 로터리 드럼 건조기로 회전하는 드럼에 하수슬러지가 통과되면서 가스가 공급되어 건조되는 시스템임⁸⁾
 - 본 공정은 연속 흐름으로 운전 실패가 없고 제품에 손상 및 과열이 없음
 - Vadeb 드럼 건조 시스템은 슬러지, 생활폐기물, 바이오매스 건조에 사용됨
- 멀티패스 시스템 건조 공정은 뜨거운 공기가 하수슬러지에 난류 흐름으로 흐르며 건조됨⁸⁾
 - 드럼 길이 방향으로 10개 건조 통로가 있어 대류형 건조 공정이 단열냉각 공정으로 운전됨
 - 뜨거운 공기 흐름에서 물 증발에 필요한 열에너지가 공급되고 공기 흐름으로 냉각되어 생성물의 온도는 거의 높아지지 않음
- 뜨거운 가스가 드럼 주입구의 하수슬러지와 혼합되어 자유수가 급격히 증발되어 수분 증발의 70%가 드럼 전단에서 발생됨⁸⁾
 - 따뜻한 난류 공기의 흐름으로 자유표면수(free surface water)가 초기 증발됨



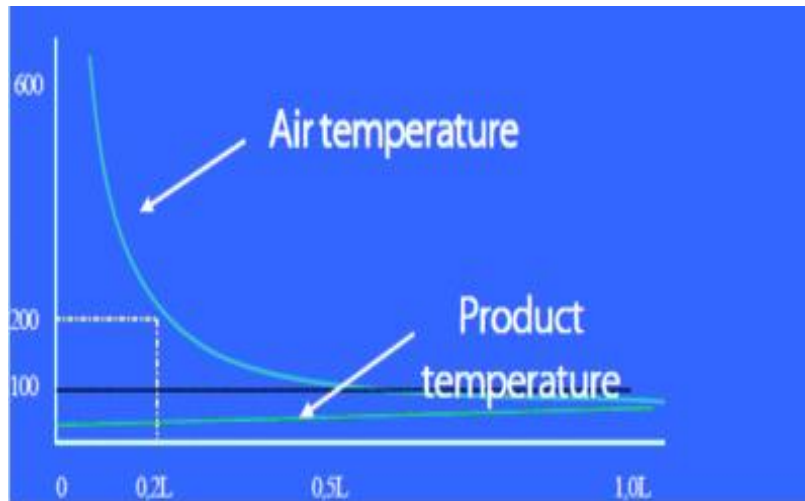
Vadeb 로터리 드럼 건조기 시스템⁸⁾

8. 'Rotary Drum Drying Systems', Vandenbroek International

IV 하수슬러지 분야



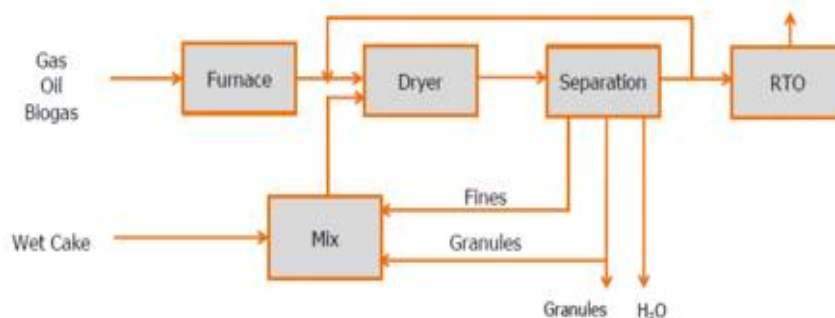
멀티 패스 드럼 10개 건조 구역 나선형 통로⁸⁾



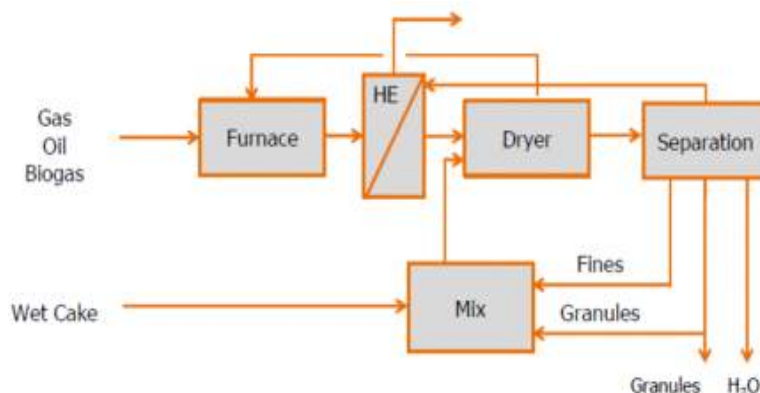
드럼 공기 유량 및 젖은 생성물의 온도 곡선⁸⁾

- 생성물과 따뜻한 공기가 드럼 출구로 이동되면서 슬러지 모세관 결합수(capillary bounded water)는 낮은 온도에서 서서히 증발됨⁸⁾
 - 건조 후 MPS(Multi Pass System) 시스템에 단열 냉각 라인 온도가 65~85℃로 유지되기까지 드럼 온도가 서서히 높아짐
 - Vadeb MPS 시스템은 슬러지 유기물 온도가 과열되지 않도록 맞춤형으로 제작함
- 드럼 시스템의 체류시간 및 온도는 건조슬러지의 고형물 함량에 맞게 조정됨⁸⁾
 - 대류형 건조는 단열 용기에서 발생되어 뜨거운 공기에서 증발수로 열이 전달되면서 에너지 손실은 없음
 - 슬러지 온도가 공기 온도보다 낮고 공기가 슬러지 수분을 흡수하는 동안 증발됨
 - 증발이 발생하는 동안 생성물의 온도는 단열 건조온도보다 더 높아지지 않음
 - 슬러지의 단열 건조 온도는 최대 90℃를 넘지 않고 드럼 건조기에 200~800℃ 범위의 뜨거운 가스가 공급되어 건조됨
- 열공급 방식은 직접 열교환, 열병합발전 열을 활용한 간접 열공급, 직접·간접 건조가 혼합된 열교환의 3가지가 있음⁸⁾

- 직접 드럼 건조 시스템은 생성물을 직접 건조하여 배출가스가 로터리 드럼으로 직접 통과됨⁸⁾
 - 직접 드럼 시스템의 최대 유입 온도는 650°C 이고 필요시 전체 건조 배출가스는 먼지 제거 기기인 스크러버·농축기로 처리됨
 - 건조 배출가스 중 일부는 건조기로 재순환하여 배출되는 가스량이 저감됨
- 직접 건조 시스템은 공기 유입온도 범위가 넓어 건조 용량에 유동성이 큼⁸⁾
 - 시스템의 에너지 소비는 1 kg H₂O 증발에 3.4 MJ(joule)로 적고 드럼 유입 온도는 200~650°C 범위임
 - 시스템에서 NO_x, CO, 악취 물질 배출이 적음
- 간접 드럼 건조 시스템은 직접 건조 시스템과 원리는 같고 열교환기로 간접 건조함⁸⁾
 - 가스 유량의 95%까지 2단계 열교환기로 재순환됨
 - 열교환기 열에너지는 가열기(heaters)의 뜨거운 가스, 가스 엔진이나 터빈의 배출가스 또는 350~650°C 온도의 기타 열원에서 공급될 수 있음
 - 열교환기의 성능에 따라 드럼 유입 온도는 최대 450°C까지 높일 수 있음
- 간접 드럼 건조 시스템은 드럼 유입온도가 200~450°C 정도로 낮지만 안정적으로 운전됨⁸⁾
 - 물(H₂O) 1 kg 증발에 3.8 MJ(Joules) 소모됨

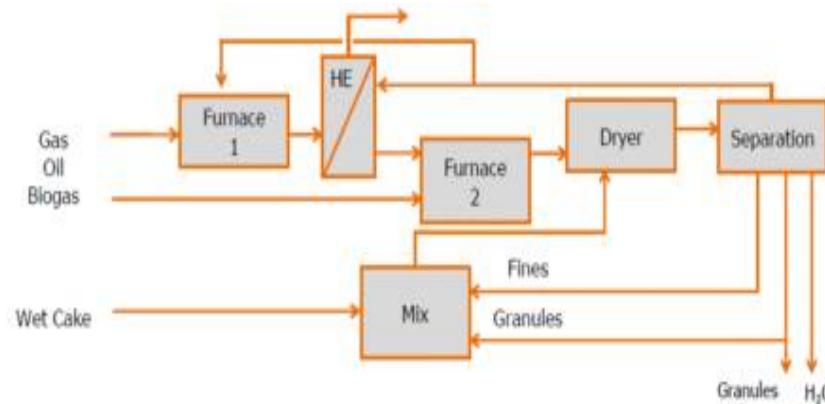


슬러지 직접 건조 공정⁸⁾



슬러지 간접적 건조 공정⁸⁾

IV 하수슬러지 분야



통합형 슬러지 건조 시스템 구성⁸⁾

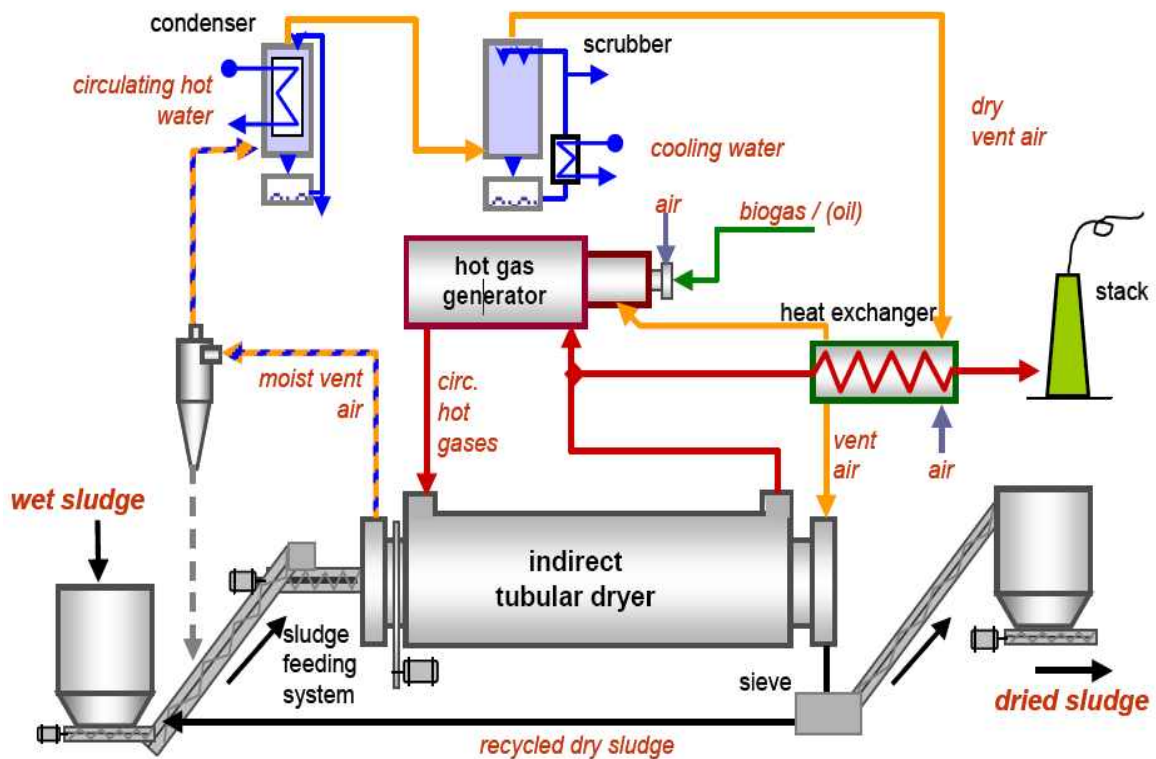
- 열공급 방식은 직접 열교환, 열병합발전 열을 활용한 간접 열공급, 직접·간접 건조가 혼합된 열교환의 3가지가 있음⁸⁾
- Vadeb 통합형 드럼 건조 시스템은 간접·직접 건조 성능이 결합된 형태임⁸⁾
 - 2차 가열기가 설치되어 드럼 입구 온도가 최대화되고 건조기 가스 루프(dryer gas loop)에 산소 농도가 최소화 될 수 있음
 - 통합형 드럼 건조 시스템은 안정된 간접적 건조 성능과 직접 건조 에너지 효율이 활용됨
 - 열적 건조 플랜트 내부 안전요건(ATEX, CE)이 준수될 수 있음
- 건조 가스의 재순환 루프는 40~50°C 낮은 온도와 낮은 수증기압, 적은 먼지 및 4~8% O₂(vol)로 운영됨⁸⁾
 - 물(H₂O) 1 kg 증발에 3.3 MJ(joules) 소비됨
 - 1차 가열기 온도는 850°C 정도이고 드럼 유입구 온도 범위는 350~650°C 임
- Vadeb 건조 시스템의 가열기에 오일, 천연가스, 바이오가스나 LPG의 모든 연료가 사용할 수 있음⁸⁾
 - 통합 건조 시스템의 1차 가열기에 석탄이 사용될 수 있음
- 회전하는 드럼 안에 역혼합(back mixing) 공정은 슬러지 케이크의 부착물 형성을 제거하는 공정으로 슬러지 케이크를 고형물 약 65%의 건조물과 혼합함
- 역혼합은 슬러지의 끈적이는 상태(sticky phase)를 방지하고 건조된 슬러지를 먼지 없는 알갱이로 처리하는데 필요함⁸⁾
 - 혼합 공정은 슬러지 케이크 주입 부분, 건조 슬러지 주입 부분, 패들이나 고성능 믹서로 구성됨

- 악취저감 위해 공정 끝에서 RTO(Regenerative Thermal Oxidation) 처리나 공정 앞단 1차 연소기를 사용함⁸⁾
 - 건조 공기 대부분은 공정으로 재순환하고 남은 건조 배출가스는 RTO로 먼지를 분리함
 - 열효율이 높은 열교환기에서 배출 가스를 가열하여 VOC를 산화처리함
 - 악취 제거된 배출가스는 굴뚝을 통해 배출됨
- 로터리 드럼 출구에서 건조된 슬러지 알갱이와 미립자를 건조 공기에서 분리하여 미립자 먼지는 슬러지 케이크와 역혼합을 위해 혼합기로 이송함⁸⁾
 - 표준 스크러버 및 응축기(condenser)와 고성능 사이클론이나 기존 백필터를 사용하여 건조가스에 먼지, VOC를 제거함
 - 분리 공정은 알갱이 분리 위한 'Drop-out' 챔버, 먼지 제거 위한 백필터나 고성능 사이클론, 표준 스크러버, 응축기로 구성됨
- 건조시 젖은 케이크는 특별히 설계된 스크류 컨베이너나 양압펌프로 이송함⁸⁾
 - 건조된 생성물은 일반 스크류 컨베이너와 엘리베이터로 이송함
- Vanderbroek International 건조시스템은 건조 생성물 알갱이를 적절한 크기로 제어함⁸⁾
 - 생성물 알갱이의 평균 크기를 제어하는 최적 공정은 슬러지의 특성 및 최종 생성물의 품질 조건에 따라 달라짐
 - 파쇄기와 스크린으로 큰 입자 알갱이를 제거함
 - 이 공정으로 10 mm 크기 이상 슬러지 생성물을 제거하고 5-10 mm 크기의 알갱이를 채워서 필요 크기로 파쇄함
- 최종생성물의 알갱이는 2~5 mm 크기로 45℃ 미만으로 냉각되어 최종 저장소로 이송됨⁸⁾
 - 최종생성물은 US-EPA 40 CFR 503, Class-A의 병원균 감소 조건을 충족시켜야 함
 - 최소 80℃ 온도에서 10분 이상 처리되어야 하고 건조슬러지 수분이 10% 미만이어야 함
 - 생성물 알갱이 건조열은 1 kg 건조에 11~15 MJ 소모됨
- 본 대류형 건조플랜트는 CE 규정 및 ATEX 표준에 준하여 안전하게 운영됨⁸⁾
 - 건조된 생성물의 온도는 80~90℃ 정도로 낮고 드럼 출구 가스 온도도 110℃ 미만으로 낮음
 - 먼지 분리 및 스크러버·응축기 사용한 증기 제거로 출구 가스를 완전히 처리함
 - 전체 건조 시스템에 불활성 조건(산소 4~8%(vol))이 유지되어 안전하게 운전됨

2-6. AB TORKAPPARATER 슬러지 건조 기술

○ AB TORKAPPARATER 슬러지 건조 공정으로 알갱이 형태의 건조물이 생성됨⁹⁾

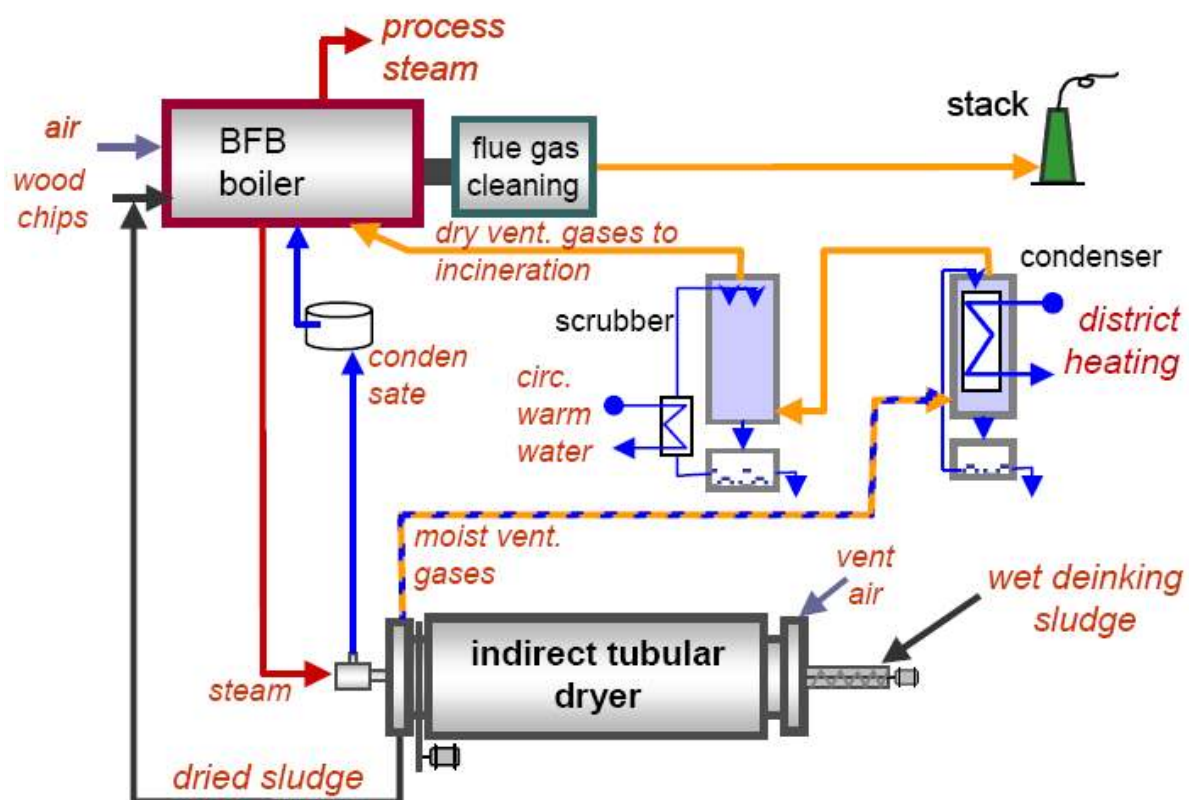
- 건조슬러지는 토양 준비제, 비료나 연료로 저장되고 사용됨
 - 건조기는 연속적으로 운영되며 낮동안만 인력 관리가 필요함
 - 연간 약 7,000톤 정도의 건조슬러지가 생산됨
 - 폐쇄형 건조공정은 불활성가스로 채워지고 건조슬러지 배출 전에 모든 배출 가스를 소각하여 악취문제도 없고 화재도 피할 수 있음
 - 건조기 운전을 위해 탈수된 슬러지의 연속적이고 균일한 주입이 중요함
- 2001년 노르웨이 오슬로(Oslo) 도시 폐수처리플랜트에 간접 드럼 건조기가 설치됨⁹⁾
- 소화 후 탈수된 하수슬러지는 드럼 건조기로 고형물 25%에서 90%로 건조됨
 - 건조기 증발 용량은 약 2.5톤/h로이고 소화공정에서 생산된 바이오가스로 건조열이 공급됨
 - 건조기 배출가스는 사이클론, 스크러버, 열적 처리로 악취가 제거됨



AB TORKAPPARATER 슬러지 건조 시스템 구성도(노르웨이 오슬로시)⁹⁾

9. 'Drying of municipal sewage sludge Bekkelaget, Oslo, Norway', AB TORKAPPARATER

- 스웨덴 제지기업 SCA에서 종이 재활용 공정에서 발생된 슬러지를 건조하여 소각하는 바이오매스 보일러를 설치하여 전력을 생산함⁹⁾
 - 간접스팀 건조기술이 적용되어 건조슬러지의 재순환없이 보일러 스팀열(10 bar)로 슬러지가 건조됨
 - 건조기 증발용량은 1.5-2톤/h로 약 50% 고형물이 약 70%로 건조됨
 - 배출가스는 사이클론, 스크러버, 소각기로 처리되어 배출됨
 - 건조된 슬러지는 BFB 보일러에서 직접 연소되어 소각에 필요한 외부 열원 사용이 최소화됨



AB TORKAPPARATER 슬러지 건조 시스템(스웨덴 제지회사 슬러지 건조·소각)⁹⁾

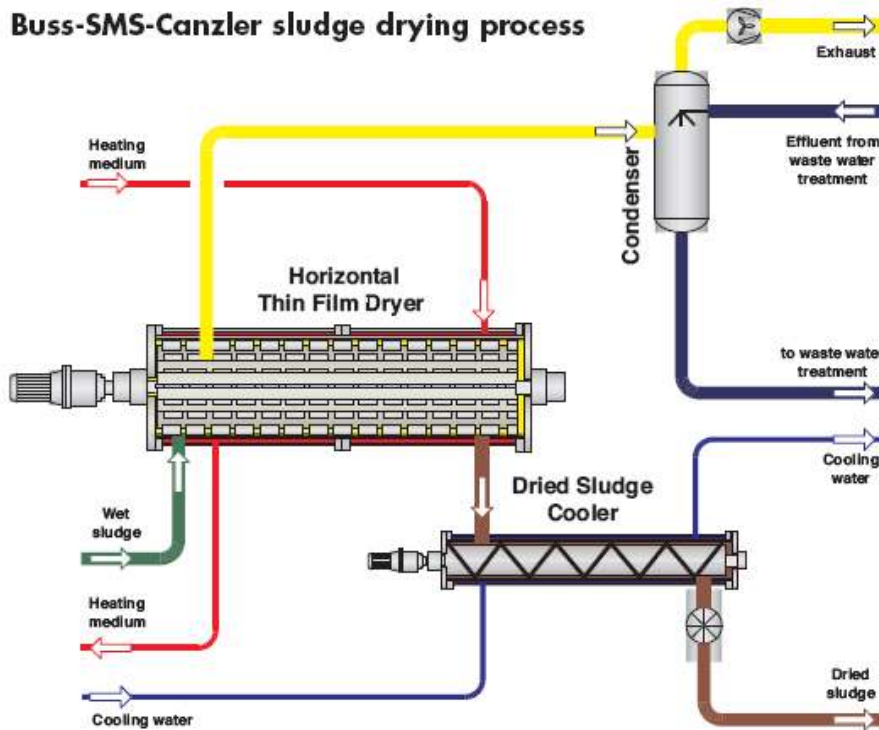
2-7. Buss-SMS-Canzler 슬러지 건조 기술

- Buss-SMS-Canzler 건조기술은 수평형 여과 건조기(Thin Film Dryer)로 25년 이상 슬러지 건조에 성공적으로 적용되어 일 800톤까지 처리가능함¹⁰⁾
 - 수평형 여과 건조기는 실린더형 반응기로 반응기 외벽에 가열기 재킷(jacket)이 설치되어 있음

10. 'Drying Technology for Sewage Sludge', Buss-SMS-Canzler

IV 하수슬러지 분야

- 해체가능한 칼날이 체결된 내부교반기로 가열된 벽에 슬러지의 얇은 층이 형성되고 슬러지가 가열된 용기벽을 따라 배출노즐로 이송됨
- 증기가 슬러지 흐름과 반대방향으로 통과되면서 슬러지 주입 노즐 옆에 증기 노즐로 배출됨



Buss-SMS-Canzler 슬러지 건조 공정도¹⁰⁾

○ 여과 건조기에서 건조 후 2단계 Linear 건조기로 고형물 90%까지 건조함¹⁰⁾

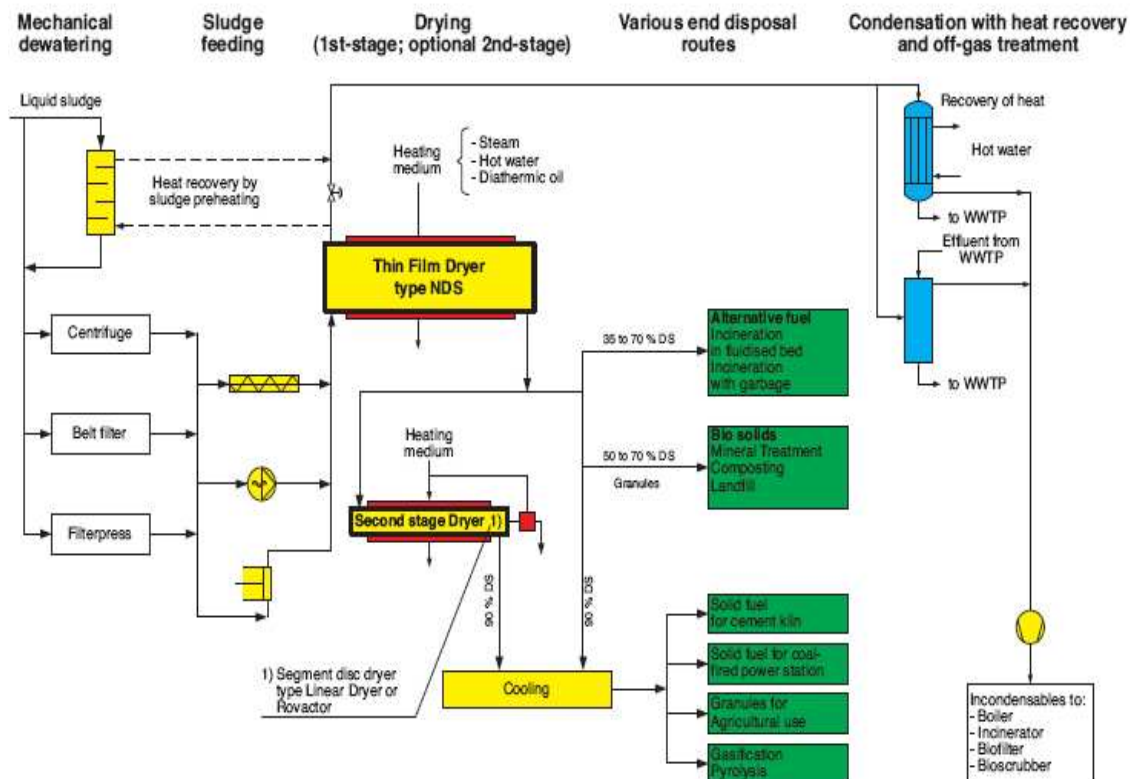
- Linear 건조기는 가열된 U형 컨베이어로 특별하게 설계된 국자 모양 기기와 천천히 이동되는 가열된 통로로 구성됨
- 상대적으로 슬러지가 채워지는 높이가 낮고 임펠러의 느린 회전으로 슬러지 알갱이의 유연한 이송이 가능함
- 고형물 함량 85~95%의 건조슬러지 알갱이는 농업용 퇴비나 토지개량제로 사용되거나 시멘트 킬른, 석탄발전소에 연료로 사용되거나 열분해·가스화에 적용될 수 있음



Buss-SMS-Canzler 2단계 건조 공정 현장¹⁰⁾

○ 다음은 규격화된 Buss-SMS-Canzler 슬러지 건조공정 시스템임¹⁰⁾

- 액체슬러지를 원심분리기, 벨트 필터, 필터 프레스로 기계적 탈수 후 여과건조기 (Thin Film Dryer)로 1차 건조함
- 1차 건조슬러지(고형물 70%)는 폐기물 소각로에서 소각되거나 퇴비로 사용되거나 매립됨
- 일부는 2차 건조기에서 고형물 90% 정도까지 건조하고 2차 건조물(고형물 90%)은 시멘트 킬른, 석탄발전소 연료나 농업용 비료, 가스화·열분해 원료로 사용됨
- 공정열은 열교환기로 회수하여 활용됨



Buss-SMS-Canzler 슬러지 건조 및 건조물 활용 공정¹⁰⁾

○ 본 건조 플랜트는 유럽, 미국, 중국, 아라비아 등 전세계적으로 80개 이상 설치됨

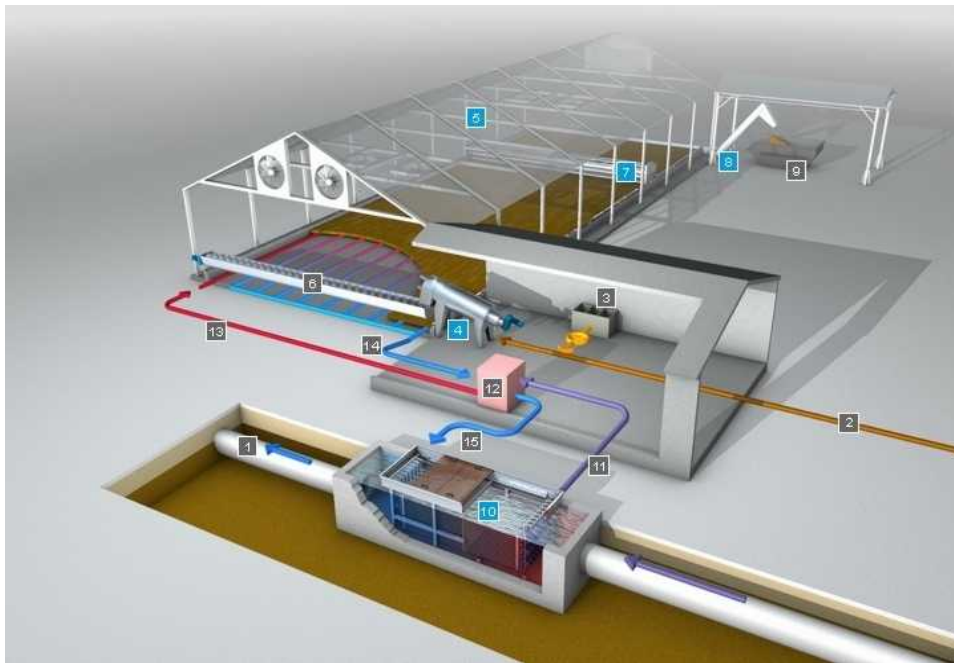
- 약간의 음압으로 운영되는 폐쇄형 시스템으로 안전하게 운영됨¹⁰⁾
- 모든 유형의 슬러지를 건조할 수 있고 최종 건조 슬러지 고형물 목표 함량에 따라 1, 2단계로 구성할 수 있음
- 자체 정화 열교환기와 통합형 열회수 시스템으로 에너지 소비가 최소화되고 유지보수 비용이 적음
- 건조된 슬러지의 반송 및 혼합없는 단일 운전으로 단순함

3 하수슬러지 태양열 · 생물학적 건조 기술사례

3-1. HUBER 태양열에너지 하수슬러지 건조 기술

○ HUBER SRT 시스템은 온실에서 태양복사에너지로 하수슬러지를 건조하는 기술로 슬러지 바닥층에 열이 추가 공급됨¹¹⁾

- 액체 슬러지(liquid sludge)가 소형 스크류 압축기로 탈수됨
- 스크류로 탈수 슬러지를 균일하게 온실에 분배함
- 온실 내에서 특별한 슬러지 뒤집기 시스템을 사용하여 슬러지를 펴고 뒤집고 이동할 수 있음
- 연속적인 건조 공정으로 슬러지의 균일한 분배 및 악취 저감의 효과가 있음
- 슬러지 주입 시스템은 수동(wheel loader 사용) 및 자동(분배 스크류 사용) 운전이 가능함
- 건조슬러지는 벨트 컨베이어로 컨테이너로 이송됨



태양열 하수슬러지 건조 시스템¹¹⁾

1. 폐수처리 플랜트 유출구, 2. 액체 슬러지, 3. 폴리머 저장소, 4. 슬러지 탈수기 (ROTAMAT 스크류 프레스 RoS 3Q), 5. 온실 HUBER 태양열 슬러지 건조기, 6. 탈수된 슬러지 분배 스크류, 7. HUBER 이동 슬러지 뒤집개, 8. 건조 슬러지 이송(ROTAMAT 스크류 컨베이어 Ro 8), 9. 건조 슬러지(소각로 사용), 10. HUBER 열교환기, 11. 폐수 반송, 12. 열펌프, 13. 건조기 바닥 난방 온수 공급, 14. 냉각수 하수구 이송, 15. 냉각 폐수 반송

11. 'HUBER Solar Active Dryer SRT', HUBER Technology



슬러지 탈수기¹¹⁾



태양열 슬러지 건조기¹¹⁾



슬러지 이송기¹¹⁾

- 비용면에서 경제적인 슬러지 탈수기는 기압 원뿔 시스템으로 마모·소음·에너지소비 최소화 효과가 있음¹¹⁾
 - 스크류 컨베이어로 탈수된 슬러지의 수평, 경사, 수직 이송이 가능함
 - 하수처리장 폐수에서 열을 회수하여 재생가능한 열원으로 사용할 수 있음
 - 태양열 건조에 필요한 열을 추가적으로 공급하기 위해 열펌프(heat pump, 4~6 kWh)를 사용함
- 태양열 재생에너지 하수슬러지 건조 시스템으로 취급이 용이한 건조슬러지(고형물 65% 이상)가 생산됨¹¹⁾
 - 위 시스템은 적정 슬러지 처리 온도로 악취 저감, 먼지 발생 최소화로 안전 운전, 태양에너지 사용, 기후·계절 관계없는 운전, 탄소배출량 적음, 유지보수 비용 저렴 등의 장점이 있음
- 지중해 키프로스 섬에 HUBER SRT 태양열 건조기 4개 라인이 운전중임¹¹⁾
 - 전체 6,600 m² 면적에 고형물 20% 슬러지 12,500톤을 건조하여 고형물 75% 이상 슬러지가 생성됨
 - HUBER SRT 태양열 건조기 설치로 슬러지 감량화 및 저장하기 쉬운 알갱이 슬러지 생성이 가능함
 - 건조된 슬러지는 반년간 대용량 저장소에 적재되고 에너지 소비량이 적은 고성능 환기장치를 설치하여 태양열 건조기에 수분이 배출됨
 - 시스템은 이동형 터치 스크린으로 제어되고 컨트롤 패널이 개별 공간에 설치되어 있음
- 독일 남부 주 바바리아(Bavaria)에 설치된 태양열 건조기로 매년 10,000톤 건조 슬러지가 생성됨¹¹⁾
 - 약 7,200 m² 면적에 5개 건조 라인이 설치되어 탈수된 슬러지가 자동 주입되고 건조 슬러지 알갱이가 자동으로 제거됨
 - 시간당 1,000 m³까지 슬러지 최적 폭기 및 최적 알갱이를 생성하기 위해 부분적으로 건조된 슬러지를 역혼합함
 - 2단 배출가스 처리시설이 설치되어 있음

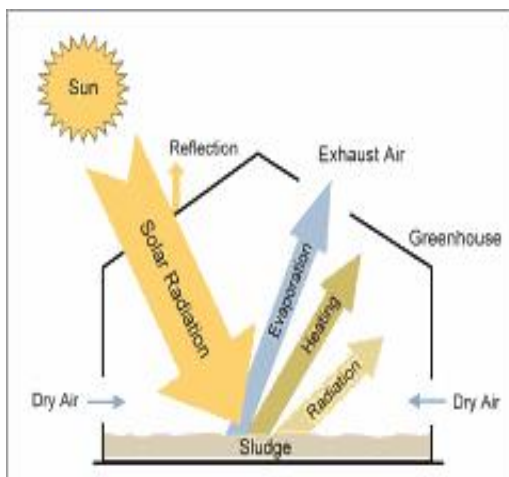


키프로스 섬에 설치된 태양열 하수슬러지 건조기¹¹⁾

- 태양열 슬러지 건조는 소규모 폐수처리시설에 사용이 적합하였으나 적절한 조건 하에 대용량 하수슬러지 처리에 사용될 수 있음¹¹⁾
- 지속가능한 기술로 HUBER SRT 시스템을 적용하여 최대 건조 성능 및 고품질 하수슬러지 생성 가능

3-2. WendeWolf 슬러지 태양열 건조 기술

- 태양열 슬러지 건조 시스템은 태양 복사에너지로 슬러지 표면을 가열하여 슬러지 물 입자가 증발되고 습기찬 공기는 처리되어 배출됨¹²⁾
- 슬러지 표면이 건조되나 슬러지 하층부는 여전히 수분이 있으므로 뒤집어야 함
- Wendewolf사 기술은 뒤집기 및 이송 시스템으로 평균 10 mm 크기의 건조알갱이가 생산됨¹²⁾
- 시선 속도(radial velocity, 시선방향으로 운동할 때의 속도)가 진행 속도보다 빠라 드럼으로 슬러지를 뒤집을 때마다 슬러지가 건조 베드 반대쪽 끝으로 자동 이송됨
- 건조 베드에 컨베이어 벨트나 적재기로 슬러지가 자동으로 유입되거나 제거됨



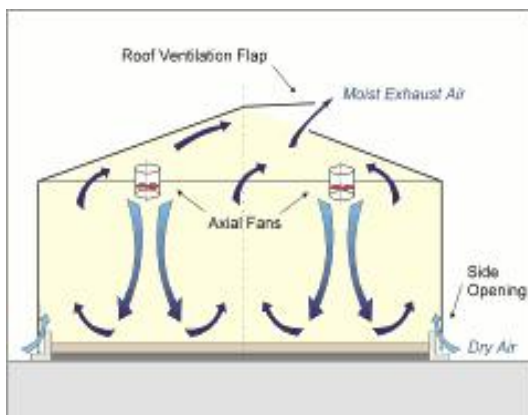
슬러지 태양열 건조 원리¹²⁾



WendeWolf 건조 드럼 기기¹²⁾

12. 'An Old Method with Modern Technology Using the WendeWolf®', ist, Solar Drying Technology

- 시스템은 ① 방수 수평 표면(콘크리트, 아스팔트), ② 2개의 평행한 벽(12 m 간격, 0.85 m 높이, 120 m 길이, 1,440 m² 건조 베드), ③ 전력 공급(400 V, 12 kW), ④ 양끝 도로 접근, ⑤ Wendewolf 기기(4,000 kg 드럼, 컨테이너로 현장 도착), ⑥ 운전 패널(터치 스크린), ⑦ 환기 시스템(2~3 W/m²) 갖추진 온실로 구성됨¹²⁾
 - Wendewolf 기기는 슬러지에 250 m³/h 공기를 공급하고 건조 베드에 새롭게 압축된 슬러지가 연속적으로 자동 프로그램에 의해 주입됨
 - 물 1톤 증발에 필요한 전기에너지는 10~30 kWh 정도로 운영비가 낮음
 - 산업용 건조기의 열에너지 및 전기에너지는 800~1,000 kWh 정도 소모됨
 - 단 시스템 설치에 공간이 필요하며 Wendewolf 시스템은 유럽 기후에 매년 800~900 kg/m² 증발되어 성공적으로 사용되고 있음
- Wendewolf 기기로 슬러지 건조시 부피는 물손실량에 비례해서 감소되어 초기 질량의 20%만 남게됨¹²⁾
 - 초기 슬러지는 알갱이 형태인 바이오고체로 변형되어 컨테이너나 포대자루에 저장가능함
 - 생성물 알갱이는 악취가 없고 농업에 사용가능함
- 기존 슬러지 건조 비용은 높으나 태양열 슬러지 건조는 공간과 초기 자본이 필요하지만 운영비가 낮은 장점 있음¹²⁾
 - 슬러지 안의 증기압과 대기 중 증기압의 차이로 슬러지가 건조됨
 - 이로 인해 온실 안 공기는 대기로 배출되어야 슬러지 수분 증발이 발생됨
 - 공기가 따뜻할수록 증발량이 많아지고 공기 중 증기압은 공기 중 수분양이 많아 질수록 높아짐
 - 매우 습기찬 날을 제외하고 건조 공정은 흐린 날씨에도 운영됨



WendeWolf 태양열 슬러지 건조 환기 시스템¹²⁾



스위스 Bilton 지역 태양열 건조 지붕판¹²⁾

IV 하수슬러지 분야

- Wendewolf 환기 시스템은 '지붕 환기판', '축방향 팬', '온실·벽 사이 기다란 틈 (aperture slit)'으로 구성됨¹²⁾
 - 모터로 작동되는 지붕환기판이 건조홀에 전체 길이 방향으로 설치되어 있음
 - 축방향 팬이 온실안 상부에 설치되어 건조 베드 표면 위 난류를 형성하여 슬러지 표면 수분층이 파괴됨
 - Wendewolf 기기가 이동되는 벽과 온실 사이 기다란 틈(slits) 통해 지붕판 개방시 건조한 공기가 온실안으로 들어옴
- 온실 각 홀 안과 밖의 온도와 습도를 모니터링하여 각 홀 안과 밖의 온도 차이와 절대 수분량을 계산함¹²⁾
 - 축방향 팬은 홀 내부 온도가 외부 온도보다 5°C 높을 경우 작동됨
 - 지붕판은 홀안 내부 절대습도가 1.5 g/kg Air 초과시 개방됨
- 보조 가열기로 난방 시스템이 홀에 설치되어 바닥 난방, 뜨거운 공기 송풍기, 적외 방열체 등이 적용될 수 있음¹²⁾
 - 축방향 팬은 홀 내외부 온도 차이로 작동되어 따뜻한 공기를 아래로 송풍하여 슬러지 표면 수분층을 제거함
 - 홀은 열에너지 손실을 막기 위해 문과 지붕판으로 폐쇄해야 함
 - 지붕판은 홀 안 공기 절대 수분량이 외부 공기에 대비 일정 비율 도달시만 개방됨
 - 따뜻하고 습한 공기가 상승되어 빠져나가고 건조 공기가 유입되어 공기 교환이 급격히 발생되고 지붕판이 닫힘
- Wendewolf 건조기는 뒤집고 이송하는 기기로 2개의 평행한 벽(0.85 m 높이, 120 m 길이)이 12 m 간격으로 떨어져 설치됨
 - 기기 중앙 부분 드럼에 빗질 장치, 패들이 설치되어 슬러지 표면을 부수고 저층부에 공기가 공급됨
 - 드럼은 지표 50 cm 높이에서 중앙 모터로 하강하면서 운전됨
 - 드럼은 60 c/min 주기로 회전하고 천천히 이동하면서 슬러지가 이송됨¹²⁾
- 전세계 17개국에 Wendewolf 158개 시설이 설치되어 전체 178,694 m²의 건조 면적에서 슬러지 등이 태양열로 건조처리되고 있음(23년간 운영 중)¹²⁾

< WendeWolf 슬러지 태양열 건조 설치 사례¹²⁾ >

	○ 독일 슬러지 태양열 건조 플랜트 Mumau (2005년 4월) - 건조 홀 : $1 \times 12 \times 58 = 696 \text{ m}^2$ - 연 1,700톤 처리(고형물 28%) - 보조 난방 : 폐기물 열, 바닥 난방
	○ 스위스 슬러지 태양열 건조 플랜트 ARA Glarnerland(1999년 7월) - 건조 홀 : $2 \times 10 \times 72 = 1,404 \text{ m}^2$ - 연 1,800 톤 처리(고형물 25%) - 보조 난방 : 폐기물 열, 바닥 난방
	○ 오스트리아 슬러지 태양열 건조 플랜트 (2005년 12월) - 건조 홀 : $1 \times 12 \times 126 = 1,512 \text{ m}^2$ - 연 2,100톤 처리(고형물 27%) - 보조 난방 : 폐기물 열, 뜨거운 공기 송풍
	○ 프랑스 슬러지 태양열 건조 플랜트 Brumath (2004년 5월) - 건조 홀 : $2 \times 10 \times 100 = 2,000 \text{ m}^2$ - 연 2,400톤 처리(고형물 27%)
	○ 호주 슬러지 태양열 건조 플랜트 Wetalla (2006년 9월) - 건조 홀 : $3 \times 12 \times 130 = 4,690 \text{ m}^2$ - 연 15,100톤 처리(고형물 15%)
	○ 헝가리 슬러지 태양열 건조플랜트 (2003년 10월) - 건조 홀 : $3 \times 12 \times 86 = 3,096 \text{ m}^2$ - 연 7,500톤 처리(고형물 28%) - 보조 난방 : 폐기물 열, 뜨거운 공기 송풍

3-3. 스페인 마요르카 섬 슬러지 태양열 건조 기술

- 지중해 스페인 마요르카 섬은 아름다운 관광지로 60만명의 인구가 살고 있음¹³⁾
 - 약 20개 폐수처리시설에서 생성된 40 MGD(151,400 m³/일) 슬러지를 모아 건조 시설에서 건조 처리함
 - 최근 정치적 반대로 슬러지가 섬에서 농업용 비료로 사용되지 못하고 있음
- 슬러지 처리를 위해 퇴비화와 열적 건조 기술이 검토되었으나 퇴비화는 팽화제의 다량 추가로 인한 비용 상승으로 제외되고 열적 건조는 에너지 소비 비용이 높아 선택에서 제외되었음¹³⁾
 - 운영 비용이 적고 친환경적인 태양열 건조 시스템이 선택되었음
- 주요 건조 열원은 태양열이고 일부 인근 바이오가스 발전소 잉여 열을 사용할 계획임¹³⁾
 - 바이오가스 발전소에서 1.5 MW 전기가 생산되고 1.5 MW 열에너지는 엔진 냉각수로 공급됨
 - 3개의 건조 챔버에 물·공기 열교환기가 설치되어 냉각수를 사용하여 건조시간이 단축됨
 - 2개의 공기 스크러버도 설치되어 악취 처리에 사용됨
 - 최종 건조물은 폐기물 난방 발전소로 보내져 연료로 사용됨
- 연간 33,000톤의 슬러지를 고형물 20~30%에서 60~80%로 건조하여 연간 11,000톤의 건조물이 생성됨¹³⁾
 - 약 19,974 m² 면적에 설치되었고 폐열 유입(aste heat input)은 0~500 kW 정도임¹³⁾
- 태양열 건조 시스템의 배출가스는 슬러지 건조 초기 3일 동안 스크러버로 처리함
 - 3일 동안 건조가 충분히 진행되어 3일 후 배출가스가 대기에 배출되어도 악취 문제는 발생하지 않음



스페인 마요르카 섬 슬러지 태양열 건조 시설¹³⁾

13. 'Energy efficient, solar sludge drying for large treatment facilities', Case study of Thermo-System, Parkson

- 본 태양열 건조 시스템은 완전 자동화되어 PLC로 제어되며 2명의 운전자만 필요하고 적재기 앞부분 운전만 필요함¹³⁾
 - 또한 슬러지 건조에 태양열이 사용되어 운영비가 저렴하며 석탄연료 사용으로 인한 이산화탄소 배출은 없음
 - 슬러지 건조로 슬러지 부피가 줄어들어 운반비를 약 75% 줄일 수 있음
 - 건조생성물의 고형물은 75% 정도로 열량은 2,778 kcal/kg 정도이고 갈탄을 대체할 수 있어 인근 폐기물에너지화 발전소에서 태워 전기 생산에 이용됨

< 열적 건조 및 태양열 건조 에너지 비용 비교¹³⁾ >

에너지 유형	단가	열적 건조		태양열 건조	
		연간 사용량	연간 비용	연간 사용량	연간 비용
열에너지(석유)	\$130/배럴	13,000배럴	\$1,690,000	0배럴	\$0
전기에너지	13¢/kWh	2,957,000 kWh	\$257,000	686,000 kWh	\$89,000
연간 운영비 (에너지 비용)		\$1,947,000		\$89,000	
태양열 건조 연간 절감액				\$1,858,000	

3-4. Siemens 생물학적 건조 시스템의 슬러지 건조 기술

- 에너지 절약형 생물학적 건조 공정으로 하수슬러지를 유용한 자원으로 전환함¹⁴⁾
 - 생산품은 비료로 사용되거나 매립되거나 소각될 수 있음
 - 열적건조공정과 달리 기계적으로 개선된 생물학적 건조 공정으로 외부 열원이 필요하지 않고 슬러지내 미생물에서 생산되는 에너지를 사용함
 - 운전 비용은 기존 열적건조공정과 비교하여 30% 낮음
- 지멘스(Siemens)에서 슬러지 처리용 IPS 퇴비화 시스템을 중국 선양(Shenyang) 폐수처리 플랜트에 공급함¹⁴⁾
 - 2012년 가을부터 일 슬러지 1,000톤 건조함
 - 열적 건조 기술을 사용하지 않는 세계 최대 하수슬러지 처리 플랜트임
- 폐수처리로 생성된 액체성 슬러지는 압축(pressing) 탈수 통해 함수율 80% 정도의 반고체 슬러지로 생성됨¹⁴⁾
 - 일부 국가에서 반고체 슬러지는 퇴비로 사용되거나 매립되지만 중국 등 일부 국가에서는 슬러지 건조로 함수율을 60% 이하로 낮추어 처리해야 함
 - 이를 위해 열적 건조를 적용할 수 있으나 에너지 소모가 크고 태양열 건조도 가능하나 2개월 정도 시간이 소요됨

14. 'Energy from microbes for drying sewage sludge', Siemens

IV 하수슬러지 분야

- 지멘스의 생물학적 건조 공정으로 하수슬러지 함수율이 22일 안에 80%에서 35% 정도로 감소됨¹⁴⁾
 - 생산품은 퇴비, 연료로 사용되거나 매립처리 될 수 있음
 - 건조에 필요한 열은 슬러지 미생물이 분해되면서 발생한 열이 사용됨
- 생물학적 건조 공정에 에너지가 필요한 부분은 슬러지를 폭기하고 혼합하는 기계적 운전에만 필요한 에너지임¹⁴⁾
 - 6개월 동안 미국 뉴햄프셔 주 Merrimack 마을 퇴비화 플랜트에서 실시한 파일럿 실험결과 -10℃ 정도 낮은 대기온도에서도 성공적으로 운전되었음
 - 하수슬러지는 자동으로 폭기되고 혼합됨
 - 또한 폐쇄형 시스템으로 악취는 바이오필터로 처리됨
 - 이 공정은 에너지원이 부족하면서 땅이 넓은 개도국에 적합함



하수슬러지 건조를 위한 지멘스 생물학적 건조 공정¹⁴⁾

4 네덜란드 하수슬러지 생물학적 건조 처리 사례

4.1. 연구 배경¹⁵⁾

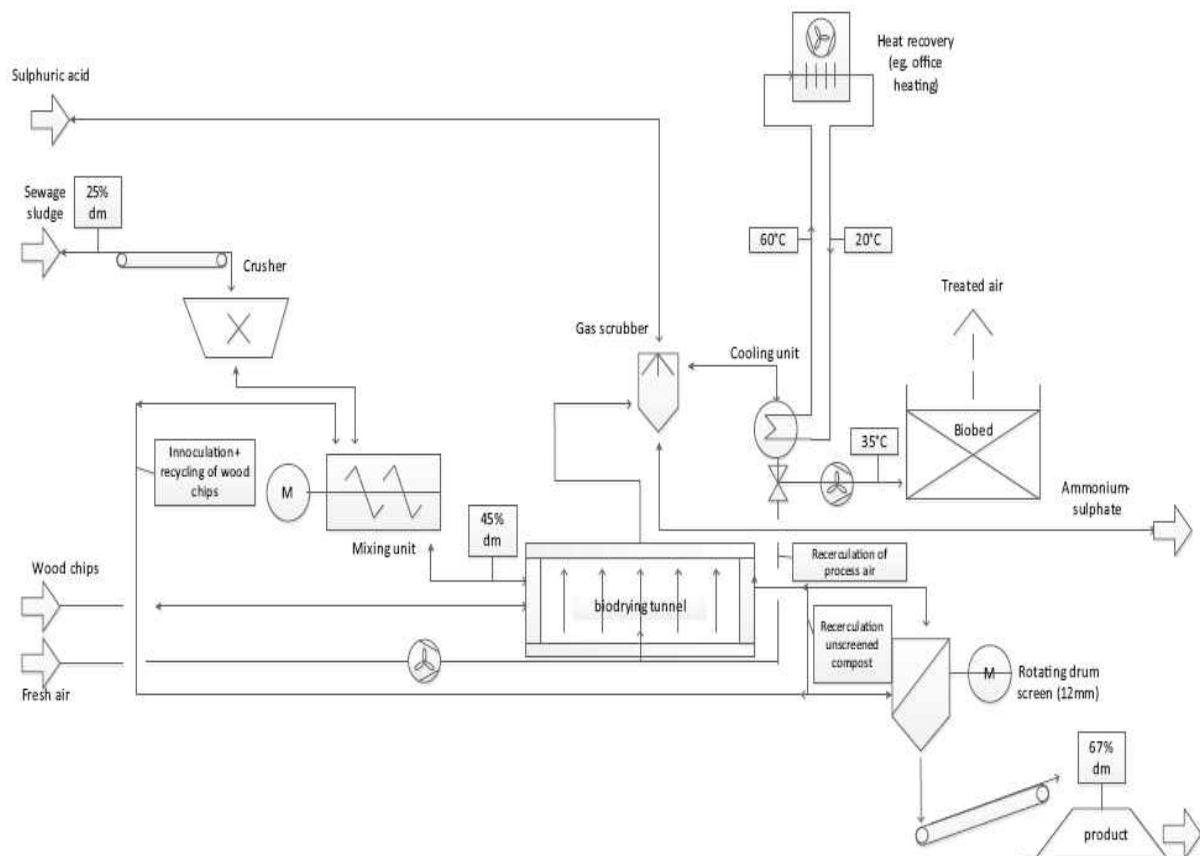
- EU 기준 가이드라인에 의해 슬러지를 토지에 적용할 수 없어 슬러지를 고형물 45%(w/w)로 소각하거나 그 이상 소각하여 에너지를 회수함
 - 슬러지 열적 건조 및 직접 소각은 미생물 분해열이 아닌 외부 에너지를 사용하여 슬러지 수분을 제거하므로 비용이 높음
 - 슬러지 퇴비화는 약 50일 정도 소요되고 미생물 분해에 필요한 수분을 공급해 주어야 하며 생성물은 퇴비로 사용하기 부적절함
 - 생물학적 건조(Biodrying) 기술은 미생물 분해열을 이용하여 수분을 증발하여 제거하고 유기물 분해를 최소화하여 생성물을 화석연료 대체 연료로 사용할 수 있음
- 생물학적 건조 기술은 슬러지보다 폐기물 건조에 사용되었으며 슬러지 생물학적 건조는 실험실 규모로 연구가 진행되었음
 - 본 연구에서 대용량(full-scale) 슬러지 생물학적 건조 운전 결과를 분석하고 기타 슬러지 처리 기술과 비교평가하였음

4.2. 하수슬러지 건조 공정¹⁵⁾

- 네덜란드 Zutphen 지역 biodrying 시설에서 탈수된 하수슬러지를 연간 15만톤 처리하고 있음(1981년~)
 - 슬러지는 생활하수슬러지 및 일부 산업하수슬러지가 처리되고 있으며 슬러지 고형물 함량은 25%, 유기물 함량은 65% 정도임
 - 반입된 슬러지를 미리 건조된 슬러지의 굵은 입자와 혼합하여 혼합된 슬러지의 고형물 함량이 45%로 높아짐
 - 슬러지 혼합으로 고온 조건(65~75℃)에서 호기성 분해되는 미생물이 집중됨
 - 혼합슬러지가 biodrying 터널(1,900 m³)에 주입되고 목재 칩을 혼합(5.6%, w/w)하여 슬러지 폭기에 필요한 공극에 제공됨
 - 터널 밀폐 후 공기가 터널 콘크리트 바닥을 통해 폭기 통로로 공급됨
 - 공정 공기는 악취 제어 및 열·질소 회수를 위해 처리되고 수분 증발 및 미생물 분해 활동에 필요한 공기를 모니터링함
- 총 25개 터널을 다른 순서로 운전하여 공정열을 효율적으로 재사용함
 - 1회 배치형 건조에 보통 22개 터널을 사용하여 1기당 10일 건조됨

15. 'The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge', M.-K.H. Winkler, The Netherlands, Bioresource Technology 147 (2013) 124-129

IV 하수슬러지 분야



슬러지 biodrying 건조 공정(슬러지 기계적 처리, 건조 터널, 공기 배출시스템, 열회수용 열교환기, 질소 회수용 가스 스크러버, 악취 제어용 바이오필터)¹⁵⁾

- 건조 후 터널에서 건조된 슬러지를 꺼내 입자 크기별로 선별함
- 입자가 큰 슬러지는 새로 주입된 슬러지와 혼합하여 사용함
- 입자가 작은 슬러지는 2단계 건조 터널(3개 터널)로 보내 14일 동안 건조함

○ 2차 건조된 슬러지는 드럼 스크린으로 선별함

- 입자가 큰 슬러지는 반송하여 슬러지 혼합용으로 사용하고 입자가 작은 슬러지는 최종생성물로 연소기로 이송하여 에너지 생산 연료로 사용함

4.3. 하수슬러지 건조 공기 관리¹⁵⁾

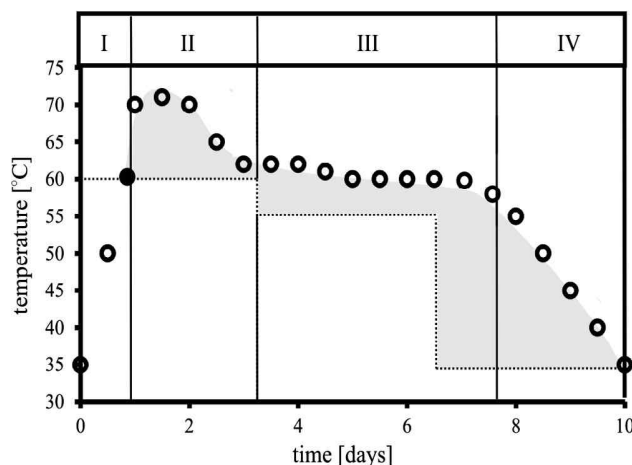
○ 3개 터널이 1개조로 공기 덕트로 연결되어 있어 공정 공기가 순환되어 재사용됨

- 첫 번째 터널에는 신선한 공기가 주입됨
- 첫 번째 터널에서 생물학적 건조 종료시 따뜻하게 건조된 슬러지를 냉각하기 전 따뜻한 공기를 두 번째 터널로 이송하여 슬러지 건조열로 사용함
- 2번째 터널에서 사용된 뜨거운 공기는 세 번째 터널로 이송하여 슬러지 혼합물을 가열함
- 3번 건조공정에 공기를 사용하여 악취 성분이 일부 분해됨

- 생물학적 건조 1단계에서 6~7일 경과 후 터널을 열기 전 건조된 슬러지를 새로운 공기로 냉각함
- 1단계 건조기에서 건조된 슬러지는 미리 건조된 슬러지와 혼합되어 2단계 건조기로 이송됨
- 1단계 건조기의 뜨거운 공기(수분, 산소 포함) 일부가 2단계 건조기에 공급됨
- 2단계에서 14일 건조 후 고형물 함량은 65~70%로 높아짐
- 2단계 최종 건조 슬러지는 깨끗한 공기로 냉각 후 적재기로 터널에서 빼냄

4.4. 터널 안 온도제어¹⁵⁾

- 최적의 수분 증발 및 미생물 분해를 촉진하기 위해 터널 공정을 4단계로 관리 하였고 1단계 건조에서는 10일, 2단계 건조에서는 14일 운전됨
- 반응 I 단계는 예열 단계로 인근 터널 공정공기(60℃)를 주입하여 슬러지 온도가 10~15 시간안에 65~70℃까지 높아짐
- 따뜻한 공기의 건조 용량이 높아 수분 증발이 많아짐
- 증발수는 터널 유입공기보다 출구공기 온도가 높을 때 제거됨
- 반응 II 단계에서 슬러지 온도가 65℃에서 1~2일 유지되어 병원균이 사멸됨
- 반응 III 단계에서 터널 유입공기 온도는 55℃로 떨어지면서 슬러지 온도는 미생물 분해로 60℃에서 5일(1단계), 9일(2단계) 유지됨
- 폭기 미생물의 분해열로 슬러지 수분이 증발되어 슬러지가 감량됨
- 반응 IV 단계에서 신선한 공기가 공급되어 건조 슬러지 온도가 35℃로 냉각됨
- 포화된 공정공기가 냉각되면서 응축수가 형성되어 폐수처리시설로 이송하여 처리됨



슬러지 생물학적 건조 4단계¹⁵⁾

4.5. 악취 제어 및 열·질소 회수¹⁵⁾

- 미생물 분해로 발생된 열을 열교환기로 회수하여 처리시설 건물 난방에 사용함
 - 생물학적 건조 공정에 필요한 외부 열원 공급은 없고 인근 폐수처리시설의 유출수를 냉각 용도로 사용함
 - 생물학적 분해열로 슬러지 수분이 증발될 뿐 아니라 열교환기로 열회수하여 9.3 MW 에너지가 내부 건물 난방용으로 사용됨
- 암모니아 농도가 높은 악취는 산성(황산) 스크리버로 처리하여 황산암모늄으로 회수됨
 - 전체 암모니아 중 일부는 폐수처리플랜트로 이송되며 질소제거율은 60~80% 정도임
 - 연간 7,300톤 황산암모늄 용액이 생성되어 농업용 비료(S, N)로 사용될 수 있음
- 공정 공기는 열회수 및 배출가스 처리용량의 최소화를 위해 순환하여 재사용함
 - 공정 공기는 3개 터널에서 순차적으로 순환되면서 악취가 분해되어 처리량 및 바이오필터 크기가 최소화됨
 - VOC 및 악취 제거를 위한 바이오필터 반응기는 나무칩으로 채워져 125 m³air/m²/h로 운전됨
 - 바이오필터로 악취 80%가 제거되어 네덜란드 배출기준이 준수됨

4.6. 생물학적 건조 터널 운전 결과¹⁵⁾

- 생물학적 건조 기술은 경제적인 에너지 절감형 기술로 미생물 대사열로 슬러지 수분이 제거되고 소각에 적합한 건조슬러지가 생산됨
 - 생물학적 건조로 폭기에 의한 수분 증발량이 수분 발생량보다 커서 슬러지 감량 및 건조물 함량 증가가 가능함
- 슬러지 Biodrying으로 슬러지 질량의 73%가 감소되어 처리비용이 절감됨
 - 생물학적 건조로 연간 슬러지의 총부유고형물(total suspended solid, TSS) 9.2 kton이 미생물에 의해 산화되고 발생된 열로 수분 102 kton이 증발되어 연간 슬러지 111 kton(73%)의 질량이 저감됨
 - 최종 생성물의 고형물 함량은 67%이고 발열량은 7,700~10,400 kJ/kg으로 석탄 발전소 연료로 사용됨
 - 운전이 단순하고 유지관리가 용이하여 고학력의 인력이 필요하지 않음

< Biodrying 슬러지 건조 성능¹⁵⁾ >

슬러지주입량	150 kton/년
유입슬러지 고형물 함량	25%
1차 건조물 고형물 함량	55%
2차 건조물 고형물 함량	67%
슬러지 질량 감량	73%
총부유고형물(TSS) 감량	9.2 kton/년(26%)
수분 제거율	102 kton/년
악취 저감	80%
H ₂ SO ₄ 소비량	15 kg/ton sludge
(NH ₄) ₂ SO ₄ (40%v/v)	7.3 kton/년
바이오필터 처리량	2.342×10 ⁶ m ³ /년

4-7. 건조슬러지 품질¹⁵⁾

- 건조된 슬러지는 소각기에 이송되어 에너지 생산에 기여하지만 퇴비로 사용되고 있지 않음
 - 최종 생성물의 미생물 품질은 유럽 및 네덜란드 퇴비 기준을 만족하여 퇴비로 사용될 수 있음
 - 슬러지의 미생물 처리를 위해 65℃ 이상에서 최소 5일 이상 또는 60℃ 이상에서 최소 7일 이상 또는 55℃ 이상에서 최소 14일 이상 건조되어야 함
- 건조 슬러지의 중금속 농도는 유럽 비료 중금속 기준이 준수됨
 - 네덜란드 퇴비 중금속 농도 기준은 유럽 기준보다 엄격하여 생성물의 카드뮴, 구리, 아연 농도가 기준을 초과하여 비료로 사용되지 못함

4-8. 슬러지 생물학적 건조 기술과 기타 처리기술 비교¹⁵⁾

- 생물학적 건조 기술과 다른 슬러지 건조 시스템(간접 건조, 습식 산화, 직접 열적 건조, 간접적 열적 건조)의 CO₂ 배출량과 전기·천연가스·화석연료·증기 사용량을 비교하였음
 - 생물학적 건조 기술은 전기 소비량이 0.46 MW로 가장 적고 스팀이나 천연가스 사용량이 없음
 - 반면 biodrying시 연간 204 m³ 디젤이 사용되나 CO₂ 배출량은 -153 kg/톤 저감되는 친환경 기술임
 - 또한 건조슬러지를 연료로 사용하여 화석연료 사용량을 줄일 수 있음

IV 하수슬러지 분야

- 건조슬러지 열량은 7,700~10,400 kJ/kg으로 연소에 필요한 품질이 준수됨
 - 건조슬러지는 갈탄(10,100~11,900 kJ/kg)을 대체할 수 있음
 - 무연탄 열량은 33,200~33,900 kJ/kg으로 건조슬러지 열량보다 3배 높음
 - 건조슬러지 열량은 생활폐기물 열량(12,300~14,000 kJ/kg) 보다 약간 낮음

< 슬러지 생물학적 건조 기술과 기타 기술의 에너지 사용량 비교¹⁵⁾ >

	단위	간접 건조	습식 산화	Biodrying	직접열 건조(가스)	간접열건조 (잉여열)
CO ₂ 배출량	kg/ton	83	618	-153	6	-174
전기사용	MW	3.22	0.65	0.46	0.52	0.63
천연가스	Nm ³ /년	1,533×10 ³	61×10 ³	-	4,778×10 ³	-
화석연료	m ³ /년	-	123	204	-	-
증기	ton/년	-	-	-	-	57,327

※ 슬러지 연간 2만톤 처리 기준(초기 고형물 함량 30%)

- 가나, 독일, 베이징은 폐기물 소각을 CO₂ 저감, 에너지 생산, 매립지 대체 기술로 선호함
 - 생활폐기물도 유기물 및 수분 함량이 높고 열량이 낮아 열량을 높이기 위해 생물학적 기술이 포함된 MBT 공정이 적용됨

4.9. 결론¹⁵⁾

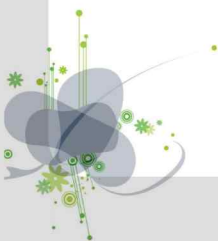
- 슬러지 생물학적 건조 플랜트 운전으로 슬러지 무게 73%가 저감되어 슬러지 이송 및 처리 비용이 절약됨
 - 생물학적 건조 후 건조슬러지와 공정 공기를 건조공정에서 재사용하고 재활용함
 - 또한 생물학적 건조 시설 운영으로 연간 9.3 MW 열 및 7.3 kton 황산암모늄 (40%(v/v))이 회수됨
 - 최종 건조물은 열량이 높아 갈탄을 대체할 수 있으며 유럽 비료 기준을 준수하여 비료로 사용될 수 있음

참고문헌

1. 'Sludge Drying', A. Flaga, Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, Poland, 73-82, Flaga, Sludge drying
2. 'Energy efficiency of sludge drying processes', A. Leonard, Laboratory of Chemical Engineering, University of Liege
3. 'HUBER Belt Dryer BT', HUBER Technology
4. 'Energy efficiency of sludge drying processes', A. Leonard, Laboratory of Chemical Engineering, University of Liege
5. 'Drying', Dorset Green Machines
6. 'Low temperature belt dryer for sewage sludge', Stela drying technology
7. 'ANDRITZ Fluid bed drying system FDS', ANDRITZ
8. 'Rotary Drum Drying Systems', Vandenbroek International
9. 'Drying of municipal sewage sludge Bekkelaget, Oslo, Norway', AB TORKAPPARATER
10. 'Drying Technology for Sewage Sludge', Buss-SMS-Canzler
11. 'HUBER Solar Active Dryer SRT', HUBER Technology
12. 'An Old Method with Modern Technology Using the WendeWolf®', ist, Solar Drying Technology
13. 'Energy efficient, solar sludge drying for large treatment facilities', Case study of Thermo-System, Parkson
14. 'Energy from microbes for drying sewage sludge', Siemens
15. 'The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge', M.-K.H. Winkler, The Netherlands, Bioresource Technology 147 (2013) 124–129

V 기타 분야

1. 전시회 및 세미나 기술동향





세부목차

1. 제37회 국제환경산업기술 & 그린에너지전 기술동향 · 271
2. 폐자원에너지화 핵심기술과 최근 사업동향 교육 심포지엄 · 280

1 제37회 국제환경산업기술 & 그린에너지전 기술동향

□ 전시회 개요

- 전시명 : 제37회 국제환경산업기술 & 그린에너지전
- 장소 : 코엑스
- 일시 : 2015. 6. 2(화)~6. 5(금)
- 전시분야 : 총 250업체 참여
 - 수질(92), 대기(37), 폐기물·재활용(26), 친환경에너지(9), 친환경 상품(12), 환경서적(4), 홍보(23)
- 환경세미나 및 포럼 : 국제환경산업기술세미나 I 등 8개 분야 31개 주제발표

□ 기술동향

- 조사분야 : 슬러지 탈수·탄화·건조 기술, 생활폐기물 전처리 및 악취 처리기술 등
- 에너지 저감형 슬러지 건조 소성 기술
 - (주요 내용) 고효율 저에너지형 하수슬러지 건조기술로 2단계를 거쳐 슬러지 함수율이 약 80%에서 약 10%로 저감됨
 - 1차 건조 : 가열공기(100℃) 송풍 건조(함수율 80% → 60%)
 - 2차 건조 : 로터리킬른 간접가열(300℃ 가스)(함수율 60% → 10%)
 - ※ 폐열 회수 : 2차 건조열을 열교환기로 회수하여 1차 건조기에 공급
 - 처리비용 : 7~8만원/톤(하수슬러지), 2.7~3만원/톤(정수슬러지)
 - ※ 하수슬러지 경우 2차건조 에너지 비용 상승
 - (검토 결과) 소용량(5톤/일) 처리기술로 대규모 시설에 적용하려면 에너지효율 및 기술 신뢰성 등 추가검토 필요
- 하수슬러지 전기탈수식 감량화 설비
 - (주요 내용) 전기(슬러지 양극(+) 이동, 수분 음극(-) 이동)로 수분을 분리하여 슬러지 함수율을 약 80%에서 약 60%로 저감(2톤/h)
 - 장 점 : 건조 비용 절감 및 슬러지 시설내부 부착 방지
 - 설치사례 : 국내외 하수처리장 및 폐수처리장
 - (검토 결과) 설치비용이 높고 폐수처리 필요
- 폐기물·슬러지 저온열분해 탄화
 - (주요 내용) 로터리킬른(400~500℃)에서 슬러지를 건조·탄화하여 슬러지 함수율 약 80%에서 10% 미만의 탄화물(약 3,000 kcal/kg) 생성

V 기타 분야

- 가열방식 : 로터리 킬른 외벽 전기 가열
- 처리비 : 약 5~6만원/톤
- 파일럿 시설 용량 : 1.5~2톤/h(최대 350톤/일 가능)
- (검토 결과) 국내 설치 실적이 없어 기술 도입시 추가 검토 필요

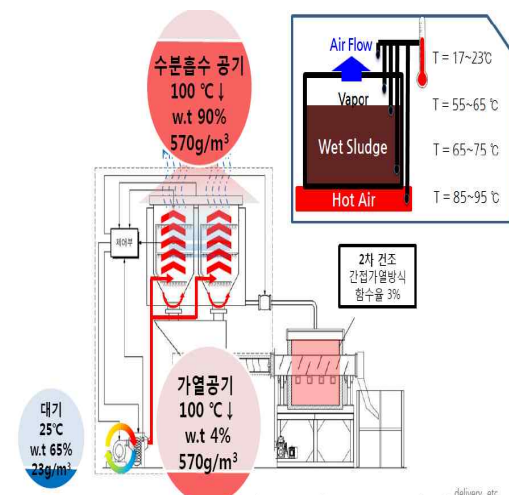
○ 전기활성탈취시스템

- (주요 내용) 전기활성촉매로 악취물질 처리(97%)
- 유지비용 : 1,070만원/연간($333 \text{ Nm}^3/\text{분}$)
- 장점 : 높은 처리효율, 촉매의 반영구적 사용, 폐수 발생 없음, 유지비용 저렴
- 적용실적 : 광양시 음식물쓰레기 자원화 시설
- (검토 결과) 침출수처리장 유분파일럿 계열의 중성악취물질 제거시설 적용가능(현장 평가 및 경제성 검토 필요)

○ 폐기물 파쇄기, 선별기, 스크류 프레스

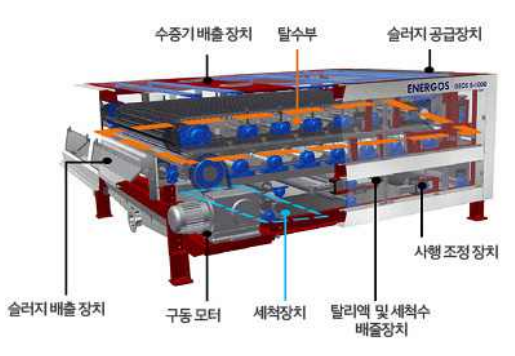
- (주요 내용) 생활폐기물 및 SRF 생산시설의 전처리시설
- 장점 : 처리용량(15~20톤/hr)이 크고 에너지 소비율 50% 저감, 내구연한 10년(기존 제품 5년)
- 적용실적 : 독일 MBT 시설 및 국내 적용
- (검토 결과) 관련설비 개선 및 연구과제 수행시 활용가능성 검토

□ 주요 기술동향 조사결과

에너지 저감형 슬러지 건조소성기술*		
SL공사 관련 시설	슬러지자원화 시설(건조)	
업체명	SAC(서울 강남구 대치동, 02-6942-6701)	
주요 기술	1. 슬러지 저온건조시 함수율 변화 : 약 80% → 약 10% 2. 1차 건조 : 가열공기(100℃, 함수율 4%, 570 g/m³) 주입 후 수분흡수 공기(100℃, 함수율 90%, 570 g/m³)로 배출 3. 2차 건조 : 간접가열방식(로터리킬른 외벽 300℃ 가스 공급)으로 함수율 30%에서 10%로 저감 4. 폐열 회수 : 2차 건조열을 열교환기로 회수하여 1차 건조 챔버에 공급 5. 적용 분야 : 정수 슬러지 처리 방법 6. 향후 확대 적용 분야 : 하수, 폐수 슬러지 건조 공정	
적용 실적	서울 광진구 구의아리수정수센터 : 1 ton/day	
기술 자료		
	< 저온 슬러지 건조 공정 >	< 건조 시간에 따른 함수율 변화 >
		
	< 구의 정수장(1 ton/day) >	< 본사 연구동(5 ton/day) >

* 국제환경산업기술 세미나 I 발표내용

고도탈수식 슬러지케익 감량화기	
SL공사 관련 시설	슬러지자원화 시설(고화, 건조) 하수슬러지 탈수 pilot 유압식탈수기
업체명	(주)한국워터테크놀로지(서울 강남구 논현동, 02-544-8861)
주요 기술	1. 탈수기 원리 : 전기삼투, 전기영동, 기계적 압착, 전기발열 건조 2. 슬러지 함수율 : 약 80%에서 약 60%로 저감 3. 처리용량 : 0.3~2.0 ton/h 4. 탈수기 가격 : 5~10억/대 5. 운영비 : 2만원/톤(전기료, 소모품(여과포)) 6. 내구연수 : 약 15년
적용 실적	1. 기흥레스피아 감량화시설 40톤/일 설치 - 약 50% 감량화, 하수슬러지 위탁처리비용 5억 이상 절감 2. 한국 : 양산, 기흥, 고양, 김천 K사, 한국 구미 K사, 울산 C사 3. 국외 : 일본(Saikai), 루마니아(Cernavoda), 중국(Chaoyang), 헝가리(Budapest), 폴란드(Koszalin)
기술 자료	슬러지 1톤당 처리비용 *슬러지 위탁처리단가 톤당 10만원 시 3만원절감 10만원 5만원 3만원 1.7만원 0.3만원 톤당절감액 소모품 전력비 위탁처리비 미도입 전기탈수기 도입 슬러지 1톤당 에너지 비용 35% 절감 7만원 2.5만원 2.5만원 1.7만원 0.3만원 톤당절감액 소모품 전력비 LNG 비용 미도입 전기탈수기 도입
	가압식 탈수기 벨트프레스, 원심탈수기 등 함수율 80% sludge 전기침투식 2차 탈수기 함수율 60% sludge 슬러지 감량 배출함수율 저감

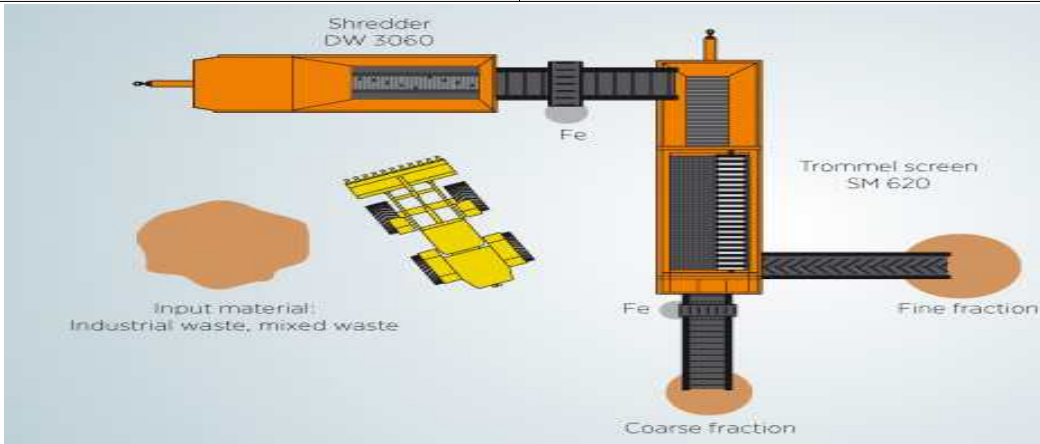
슬러지 전기탈수기		
SL공사 관련 시설	슬러지자원화 시설(고화, 건조) 하수슬러지 탈수 pilot 유압식탈수기	
업체명	(주)에네르고스(경기도 성남시 중원구 상대원1동, 031-731-2605)	
주요 기술	1. 탈수 원리 - 슬러지 입자와 수분간의 전기적 결합력 낮추어 슬러지 입자 양극 이동 및 수분 음극 이동 - 압력을 가하여 수분 분리 2. 슬러지 건조기 전처리 설비 - 슬러지 케이크(함수율 83%)를 전기탈수로 함수율 65% 슬러지로 처리하여 약 50% 슬러지 감량 - 건조 에너지 비용 절감 및 슬러지 내부 부착 등 방지 3. 처리용량 : 0.5~2.0 ton/hr 4. 전기사용량 : 109~166 kW/kg 슬러지	
적용 실적	1. 경기도 남양주시 하수처리장 현장 파일럿(2012.3~2013.6) 2. 울산 O화학(2012), 폴란드 K제지(2013)	
기술 자료		
	< 경기도 남양주시 하수처리장 현장 파일럿(2012.3~2013.6) >	< 전기탈수기(DEOS E Series) 구성(함수율 80~85% → 65%) >
		
	< 전기탈수기(DEOS T Series) (함수율 98% → 약 60%) >	< 탈수 후 슬러지 성상 >

V 기타 분야

폐기물·슬러지 저온열분해 탄화(리봇)	
SL공사 관련 시설	슬러지자원화 시설 (건조)
업체명	드림에코텍(서울 송파구 석촌동, 02-416-8889)
주요 기술	1. 하수슬러지 탄화시 함수율 변화 : 80~83% → 10% 미만 2. 처리비 : 5~6 만원/톤 3. 파일럿 시설 용량 : 1.5~2 ton/h(최대 350톤/일 가능) 4. 반응기 유형 : 로터리 킬른(400~500°C, 회전) 5. 가열방식 : 간접가열식(로터리 킬른 외벽 전기히터) 6. 탄화물 : 약 3,000 kcal/kg 7. 탄화물 사용처 : 석탄발전소 등 보조연료 사용 8. 설치비 : 약 0.7억/톤 9. 악취 제거 : 숯버너(탄화물)로 850°C 2초 이상 처리
적용 실적	일본 생활쓰레기, 가축분뇨, 왕겨, 껍질 탄화
기술 자료	 
	

전기활성탈취시스템	
SL공사 관련 시설	수도권 광역 음폐수 바이오가스화 시설 등 악취 발생 시설
업체명	중앙이엠씨(주)(전남 광양시 옥곡면, 061-772-8772)
주요 기술	1. 전기활성촉매를 이용한 악취물질 처리 기술 - 가스 성분에 따라 전기활성 촉매 선택 및 촉매 산화농도 조절 - 산화된 액상 전기활성 촉매를 악취가스 흐름과 접촉 - 환원된 전기활성 촉매는 전해셀에서 전기화학적으로 재산화 2. 유지 비용 : 1,070 만원/연간(20,000 Nm ³ /h 가스) 3. 처리 효율 : 97% 4. 장점 - 높은 처리효율 지속적 유지, 전기활성 촉매의 반영구적 사용 - 폐수 및 2차 폐기물 발생 없음, 유지비용 저렴 5. 적용 분야 : 바이오가스 생산시설 악취, 폐수처리장 복합악취
적용 실적	광양시 음식물쓰레기 자원화 시설 복합악취 및 VOCs 처리 - 황화수소 99.5%, 메틸메캅탄 97.6%, 암모니아 99.8%, 트리메틸아민 99.7%, 아세트알데히드 98.3% 제거
기술 자료	< 처리계통도 >
< 광양시 음식물쓰레기 자원화 시설 복합악취 처리 설비 >	

폐기물 파쇄기, 분쇄기, 트롬멜 선별기, 스크류 프레스		
SL공사 관련 시설	생활폐기물 고형연료화 시범시설	
업체명	페리투스 이큅먼트(주)(서울 영등포구 당산동, 02-2677-0750)	
주요 기술	1. 용도 : 생활폐기물 파쇄, SRF 연료 생산 2. 처리 용량 : 15~20 ton/h 3. 성능 : 30 mm 까지 파쇄가능(SRF 50 mm 길이 규격) - 1차 파쇄기(Hammel) : 100~300 mm 파쇄(5억) - 2차 파쇄기(UNTHA) : 30~50 mm 파쇄(7억) - Steiner 센서선별기 : 고철, 비철, 플라스틱, 광물 선별(2억) 4. 장점 - 처리용량 높음(기존 파쇄기 용량 : 5 ton/h) - 에너지 소비율 기존제품의 50% 정도 5. 내구연한 : 10년 정도(기존 제품 5년 정도)	
적용 실적	1. 화성 자원순환 클러스터(EFRC) 설치 2. 원주 지온(가연성폐기물 분리, 시멘트공장 연료 공급) 3. 경주 성호기업(철스크랩 사업)	
기술 자료		
	< 폐기물 처리 공장 >	< UNTHA XR 시리즈 파쇄기 >
	 	 
< 화성 자원순환 클러스터(EFRC) 설치 >		

폐기물 파쇄기, 분쇄기, 트롬멜 선별기, 스크류 프레스		
SL공사 관련 시설	생활폐기물 고형연료화 시범시설	
업체명	다호물산(주), Doppstadt(독일)(경기도 김포시 장기동, 1566-3342)	
주요 기술	1. 기술 장점 - 일축파쇄기로 날 탈부착 가능(유지보수 용이) - 파쇄크기 일정(1차 파쇄기 120~300 mm) - 다양한 종류의 물질 파쇄 - 직구동 롤러에 의한 고효율 시스템 2. 1차 파쇄기 비용 : 약 6억3천만원(60 ton/h) 3. 운영비 : 0.5 L(경유)/톤(폐기물) 4. 내구연한 : 10년 이상	
적용 실적	1. 독일 MBT 시설 폐기물 파쇄·선별 용도(DW 3080 K) 2. 국내 24곳 적용 : 산업폐기물, 생활폐기물 파쇄 - 익산 RPF 생산 적용(종량제 폐기물 파쇄)	
기술 자료		
	< DW 2060 이동식 일차 파쇄기 >	< DW 2060E 고정식 일차 파쇄기 >
		
< 생활폐기물 플랜트 구성 사례 >		

2 폐자원에너지화 핵심기술과 최근 사업동향 교육 심포지엄

□ 교육 심포지엄

- 주최 : 한국폐자원에너지기술협의회
- 주제 : 폐자원에너지화 핵심기술과 최근 사업동향
- 일시 : 2015.11.25

□ 주요 발표내용

- ‘폐기물 에너지 국내외 R&D 현황’(국립환경과학원, 박진원 원장)
 - 신재생에너지 바이오매스(15.1%)에 바이오가스 매립지가스, 바이오디젤, 우드칩, 목재펠릿, 폐목재, 하수슬러지 고형연료 등 포함
 - 신재생에너지 폐기물(67.8%)에 폐가스, 산업폐기물, 생활폐기물, 대형도시쓰레기, 시멘트킬른보조연료, RDF/RPF, 정제연료유 포함
 - OECD 기준 폐기물은 신재생에너지로 분류되지 않고 Biomass로 분류
 - 폐기물이 시멘트킬른 보조연료로 사용되면서 시멘트 질 저하가 우려되어 계속적 감시 실시(시멘트 회사가 폐기물 처리로 수익 창출 현상)
 - 국내 폐기물 재활용률은 84.4%(재활용업체 반입 기준, 12년)이나 실제 재활용률이라 보기 어려움
 - 하수슬러지 건조에 약 10만원/톤이 소요되고 건조연료는 약3만원/톤으로 판매되고 있으나 나머지 비용은 하수슬러지 처리비용으로 보아야 함
 - 폐기물 열분해 유화는 일본에서 화재우려로 적용되고 있지 않음
 - 국내 소각로의 핵심부품을 수입하여 소각로 수출시 문제 있음
 - 목질계(셀룰로오스) 바이오에탄올 생산기술은 상용화 직전 단계임
 - RDF는 발열량이 낮아짐으로(기준변경) 품질 문제 발생(시장 사용 관점)
 - 한국 전기생산량은 전세계 5위(제조업 영향)이나 신재생에너지 비율은 약 30위 정도임
- ‘국내 폐기물 정책의 변화와 폐기물에너지화 시설의 환경성 검토’(한국정책평가연구원, 이소라 부연구위원)
 - ‘자원순환사회전환촉진법’ 향후 시행예정
 - : ‘폐기물 종료인정’(업계 지원), ‘처분부담금’(2020년 매립률 3% 목표), ‘자원순환 성과관리’(업종별 목표 설정, 자발적 이행), ‘제품 등 자원순환성 평가’ 등 도입 예정

- 소각시설과 SRF 시설 경제성 평가(전과정평가, LCA)
 - : 소각시설 85천원/톤, SRF 시설 48천원/톤, SRF+보일러 시설 19천원/톤
 - : 소각시설은 용량이 커짐에 따라 처리비 감소
 - : SRF 시설은 건조 열원에 따라 비용이 달라짐(건조 열원 개선 필요)
 - : SRF 시설 고형연료를 시설에서 건조연료 등으로 사용시 환경성 제고
- ‘폐기물고형연료 제조 및 이용 기술 현황’(한국기계연구원, 최연석 박사)
 - SRF 고형연료에 생활폐기물, 사업장폐기물 등 연료공급처 구분 필요
 - SRF 품질 저하로 수요자 수용 외면 우려(비성형 SRF 저장성 떨어짐)
 - 고형연료 제조 건조시 화재 제어 중요
 - : 건조기 배가스를 앞단으로 순환하여 화재 예방
 - SRF 시설 악취는 열분해 처리하며 열교환기로 열을 회수하여 공정 앞단에 사용
 - 한국에너지기술연구원 개발한 CFBC 보일러는 해외 보일러의 50% 비용
 - 고형연료는 수요처 확보가 중요 : 석탄화력발전소 등
 - 고형연료는 연료 장기보관 목적으로 제조
- ‘고형연료제품 품질관리 및 현황’(한국환경공단, 박홍조 과장)
 - SRF 연료제조 후 연소는 산업시설에 연료로 사용됨으로 온실가스, 대기오염물질 배출 절감효과 있음
 - 분리수거품(선별)의 60% 정도가 고형연료 원료로 사용됨
 - 사업장폐기물 고형연료의 중금속 관리 필요
 - 고형연료 사용시설 증가는 크지 않으나 생산시설의 증가폭이 큼
 - 219개소 SRF 제조 시설 중 130개소에서 사용 중임
 - SRF 순환유동층발전보일러로 여름철 전기, 겨울철 열 공급
 - 유럽에서는 고형연료를 만드는 데 더 많은 연료가 소비되면 기준심사에서 탈락되어 고형연료제품의 지속가능성 평가
 - 폐기물 PVC에 의한 SRF 시설 부식 초래
 - 고형연료 제조시설에서 폐기물처리비를 받고 고형연료로 만들지 못하고 소각장으로 보내고 있음(사유 : 품질 기준 미달)
- ‘국내외 저급 폐열에너지 기술개발 동향’(고등기술연구원, 성호진 수석연구원)
 - 중소형소각로 산 인근 설치시 열수요 없어 전기발전 활용기술 필요
 - 중저온 열원 이용 기술로 바이너리사이클 적용시 에너지 효율 향상
 - : 열원으로 공장 중저온 폐열, 지열, 온천열 등 이용
 - 미국에서 매립가스를 이용한 엔진에 UTC Power에서 분산발전용으로 개발한 PureCycle 200을 적용하여 테스트 수행(2003년부터)

V 기타 분야

- 저급폐열 발전 기술개발 주요 이슈
 - : 컴팩트한 패키지 시스템 개발 및 바이너리 터빈의 효율 향상
- 한국에너지기술원 개발 30 kW급 유기랭킹사이클 시스템
 - : 작동 유체 R245fa 사용, 열원으로 보일러 150°C 스팀 사용, 냉각은 냉각탑과 물 사용
- 고등기술연구원, HK 터빈, 청류에프엔에스에서 50 kW 클린연도 바이너리 발전시스템 개발 중
 - : 170°C 고온 열원 사용한 발전기술

○ ‘바이오가스 기술개발 및 시설운영 사례’(대우건설 기술연구원, 유영석 책임연구원)

- 유기성폐자원의 혐기성소화에 의한 바이오가스화는 유럽에서 소화폐수를 액비, 퇴비로 활용하고 있어 적용성이 높음
- 우리나라는 소화폐수를 액비나 퇴비로 활용이 어려워 소화폐수를 하수처리시설에서 처리함으로 혐기성소화 기술 경제성은 낮음
- 유기성폐자원 바이오가스화는 온실가스 감축과 유기성폐기물 해양배출 금지로 필요한 기술임
- 대우 바이오가스 시스템 기술
 - : TS(총고형물) 6% 미만 시스템, UASB 소화조(2상소화) → 폐수처리
 - : TS 13% 미만 시스템, 원통형 소화조(2상 소화) → 탈수건조 → 폐수처리
 - : TS 25% 미만 시스템, 수평형 소화조 → 탈수건조 → 폐수처리
- 한라산 바이오가스 시설(제주도 농림부 가축분뇨 에너지화 사업)
 - : 100 m³/일(가축분뇨 70 m³, 음폐수 30 m³) 처리용량, 250 kW 2기 전력
 - : 소화액 액비 90 m³/일 생산
 - : 메탄발효조, 액비저장조, 열병합발전기 구성
 - : 바이오가스 전력 생산량 2,792 MWh/년

○ ‘국내 폐기물 소각시설의 출열분포 및 발열량 산정방법’(국립환경과학원, 김기현, 권영현)

- 폐기물 저위발열량은 소각시설 에너지 효율 평가에 중요 요소
- 저위발열량 산출에 EU NCV 식 도출방법 도태로 NCV_{KOREA} 식을 확정하여 저위 발열량 산출방법 객관성 확보 필요
- $NCV_{KOREA} = 1.011 \times (m_{stw} / m) \times C_{stx} + 0.007 \times T_b$
 - m_{stw} : m_{st} 에 해당하는 기간에 폐기물에서 생산되는 증기의 총량
 - m : m_{st} 로 규정된 기간에 소각된 폐기물의 양
 - C_{stx} : 증기의 순 엔탈피(증기 엔탈피 - 보일러 물 엔탈피)

T_b : 보일러 출구의 배기가스의 온도

- 생활폐기물 33개 소각시설 대상 저위발열량 평균 2,318 kcal/kg 산정

○ 'SRF 연소용 유동층보일러 운전 특성'(한국에너지기술연구원, 배달희 박사)

- 순환유동층보일러 폐기물 발열량 변동이 커서 10~20 MW 발전량 변동
- 연소로 클링커 형성, 마모 및 부식에 의한 손상 발생
- Fluff RDF 연소시 후단에서 후연소 발생(폐목재 등)
- Fluff RDF 연소시 에너지 회수율 낮음
- 원주 SRF 보일러의 발전효율은 27~28% 정도임
- Fluff RDF 연소시 폐기물의 이송에 문제 발생 : 적절한 전처리 필요

○ '국내 소각시설 운영 현황과 전망'('한국시거스', 박관선 상무)

- 일체형 소각로는 에너지 효율이 높아 향후 적용 필요
: 일체형 소각로는 공기비를 낮출수 있음
- 증기 압력 및 높은 온도로 발전효율 향상
- 연소공기 온도가 높을수록 연소 효율은 높음
- 터빈 출구의 증기압력이 낮을수록 발전효율은 낮아짐
- 고온 부식에 의한 시설 가동 중단이 많음
- 일반 소각시설과 SRF 전용보일러 발전효율은 비슷함
- 유럽 소각시설에서 바닥재를 재활용하고 있어 향후 사업분야로 판단됨