

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Proyecto Therm²

Valorización Energética de Residuos Orgánicos y Economía Circular Mediante Digestión Anaerobia Avanzada



Autor Principal: Alejandro Sánchez Rembado (EMASESA)

Otros autores: Sara I. Pérez Elvira (Universidad de Valladolid) - María Dolores Garvi Higueras (Universidad de Sevilla) - Diego Fernández-Polanco (teCH4+) - Rosario Arnau Notari (FACSA-Hydrens)

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Contenido

Resumen
Introducción
Materiales y métodos 4
Definición de escenarios y configuraciones de estudio4
Caracterización de los lodos de trabajo 5
Potencial metanogénico teórico y experimental de los lodos (Digestión anaerobia en discontinuo)6
Digestión anaerobia en continuo – Estudio de escenarios6
Tratamiento térmico en planta piloto de laboratorio7
Caracterización reológica
Transición de digestión anaerobia mesófila a termófila10
Resultados y discusión 13
Influencia del tratamiento térmico en la caracterización físico-química y bioquímica de lodos 13
Influencia del tratamiento térmico y de la temperatura de digestión en la productividad de metano de lodos
Operación en continuo de las configuraciones estudiadas16
Comparativa inicial de configuraciones (CAPEX y OPEX)17
Caracterización reológica
Transición de digestión anaerobia mesófila a termófila
Conclusión
Reconocimientos
Bibliografia

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

RESUMEN

El proyecto Therm2 (**Therm**al Hydrolysis and **Therm**ophilic Digestion), que desarrolla el consorcio formado por las empresas EMASESA, Hydrens y teCH4+ y las Universidades de Valladolid (UVa) y Sevilla (US), tiene como objetivo el desarrollo experimental de la configuración óptima de la línea de lodos de EDAR mediante la integración de las tecnologías de hidrólisis térmica (HT) y digestión anaerobia mesófila (DAM) y/o termófila (DAT).

Este articulo presenta los resultados obtenidos por este proyecto a escala laboratorio, concretamente la investigación a nivel batch y en continuo de diferentes configuraciones, los resultados empíricos de las transiciones de régimen mesófilo a termófilo y la caracterización reológica previa a la optimización de la energía de agitación.

Partiendo de estos resultados, se están actualmente ensayando en planta piloto las configuraciones más prometedoras. La que se identifique como óptima será escalada de forma teórica tomando como base la infraestructura de la EDAR Copero (Sevilla), donde se implementará a escala real.

INTRODUCCIÓN

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) municipales juegan un papel decisivo en la transición del metabolismo urbano hacia una economía circular ya que, mediante Digestión Anaerobia Mesófila (DAM), transforman residuos orgánicos en energía renovable (biogás) y subproductos valorizables (digestato).

Superando el esquema convencional, EMASESA implementó un modelo pionero de gestión que integra la codigestión de residuos orgánicos no peligrosos y la innovadora tecnología de hidrólisis térmica (HT) de teCH4+, para incrementar la producción de biogás y generar un biosólido higienizado apto para la aplicación agrícola directa.

El proyecto Therm2 (**Therm**al Hydrolysis and **Therm**ophilic Digestion) da un paso más, incorporando la Digestión Anaerobia Termófila (DAT). Y es que las potenciales sinergias entre la HT y la DAT, aunque evidentes, no han sido suficientemente estudiadas y no existe experimentación a escala piloto que verifique sus presuntos beneficios.

El objetivo de este proyecto es identificar empíricamente la combinación de procesos óptima, consolidando las condiciones operativas y de diseño a nivel piloto para posibilitar su posterior escalado e implantación a escala real, mejorando sustancialmente la eficiencia y la flexibilidad de la valorización energética de los residuos orgánicos.

Siguiendo las etapas de la Figura O, se presentan en este articulo los resultados obtenidos a escala laboratorio, en concreto la investigación a nivel batch (BMP) y en continuo de diferentes configuraciones de la Universidad de Valladolid (UVa), los resultados empíricos de las transiciones de régimen mesófilo a termófilo de la Universidad de Sevilla (US) y la caracterización reológica de Hydrens que tiene el objetivo de optimizar la agitación y, por tanto, la eficiencia del proceso.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada



Figura 0. Etapas del proyecto Therm2.

En paralelo a los resultados de laboratorio que se presentan aquí, se ha diseñado y construido una planta piloto en la que ya se están ensayando las configuraciones más prometedoras.

Los resultados de la planta piloto serán escalados de forma teórica a escala real teniendo en cuenta, además de la generación de biogás y la higienización del biosólido, todos los aspectos que impactan en el CAPEX y en el OPEX, entre los que destaca una integración energética óptima que aproveche las altas temperaturas de la HT y los calores residuales de los sistemas de cogeneración de las EDAR.

Como base de este escalado se tomará la infraestructura de la línea de lodos de la EDAR Copero (EMASESA) en Sevilla, depuradora donde se ha instalado la planta piloto y que cuenta con una configuración de hidrólisis térmica como inter-tratamiento entre una pre- y una post-digestión anaeróbia mesófila, y donde se implementará la configuración avanzada resultante de este proyecto.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

MATERIALES Y MÉTODOS

Definición de escenarios y configuraciones de estudio

Con el objetivo de identificar la configuración óptima para la línea de lodos, se hizo una revisión preliminar de posibles escenarios de estudio. Los dos procesos clave que se combinan son la digestión anaerobia y la hidrólisis térmica, y son varias las configuraciones a que pueden dar lugar, atendiendo a tres aspectos: la temperatura a la que tiene lugar la digestión (mesófila, 35°C o termófila, 55°C), el número de etapas de digestión (una o dos etapas), y la ubicación de la unidad de hidrólisis dentro del esquema global (tipo de lodo que trata en el pretratamiento de hidrólisis).

El Cuadro 1 resume 14 configuraciones posibles que combinan la hidrólisis térmica como pretratamiento de digestión, y la digestión anaerobia de lodos en sus distintas alternativas mesófila, termófila y doble etapa (meso-termo). Para facilitar la discusión posterior, en el Cuadro 1 se clasifican dichas configuraciones en 5 tipos de escenarios, en función de la ubicación de la etapa de hidrólisis en el proceso y el tipo de lodo que procesa:

- Escenarios 1: Digestión de lodo mixto (escenarios de referencia o control).
- Escenarios 2: Digestión de lodo mixto hidrolizado.
- Escenarios 3: Digestión de lodo mixto, hidrolizando sólo el lodo secundario.
- Escenarios 4: Predigestión de lodo primario y codigestión con secundario hidrolizado.
- Escenarios 5: Hidrólisis intermedia entre dos etapas de digestión.

Cuadro 1. Configuraciones estudiadas, combinando hidrólisis térmica (HT) y digestión de lodos mesófila (DAM) y/o termófila (DAT)

Escenarios	Tipo de digestión	Configuración	Denominación del esquema
	Mesófila	Mixto DAM	DAM_ 1
ESCENARIOS 1	Termófila	Mixto DAT	DAT_ 1
	Doble etapa (meso- termo)	Mixto DAT DAM	DADE_ 1
	Mesófila	Mixto	DAM_ 2
ESCENARIOS 2	Termófila	Mixto DAT	DAT_ 2
	Doble etapa (meso- termo)		DADE_ 2

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

	Mesófila		DAM_ 3
ESCENARIOS 3	Termófila		DAT_ 3
	Doble etapa (meso- termo)		DADE_ 3
	Mesófila		DAM_ 4
ESCENARIOS 4	Termófila		DAT_ 4
	Doble etapa (meso- termo)	1° DAT DAM 2° HT DAM	DADE_ 4
ESCENARIOS	Mesófila		DAM_ 5
5	Termófila		DAT_ 5

Las distintas configuraciones han sido estudiadas experimentalmente, mediante operación de plantas piloto a escala de laboratorio. La descriptiva de dichas plantas, así como la metodología de caracterización, se detalla a continuación.

Caracterización de los lodos de trabajo

El proyecto se focaliza en los lodos de la EDAR de Copero (Sevilla), que son la materia prima del estudio. Se identifican cuatro tipos de lodo de trabajo, que corresponden a las alimentaciones a los distintos escenarios:

- Lodo primario: procedente de la decantación primaria.
- Lodo secundario: lodo biológico de la recirculación del sistema de fangos activos.
- Lodo mixto: mezcla de lodo primario y secundario, en ratio 60/40.
- Lodo digerido: efluente de la digestión mesófila de lodo mixto a THR 20d.

Se ha realizado una caracterización físico-química básica (sólidos, materia orgánica y nitrógeno, siguiendo la metodología Standard), bioquímica (fraccionamiento en carbohidratos, lípidos y proteínas), tanto a los lodos frescos como hidrolizados, con el objetivo de valorar la influencia de la hidrólisis térmica en cada uno de ellos.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

A partir de la caracterización bioquímica, se ha determinado el potencial metanogénico máximo de los lodos. Atendiendo a bibliografía [1], los factores de conversión a CH4 para para carbohidratos, proteínas y lípidos son 415, 496 y 1014 L CH4/kg compuesto, respectivamente.

Potencial metanogénico teórico y experimental de los lodos (Digestión anaerobia en discontinuo)

Con el objetivo de tener una valoración experimental de la capacidad de producción de metano para los distintos tipos de lodos y la influencia de la temperatura de digestión y la hidrólisis térmica sobre cada uno de ellos, se realizó la determinación de la capacidad de producción de metano de los lodos tanto frescos como hidrolizados térmicamente, en condiciones mesófilas y termófilas, mediante la metodología BMP (Biochemical Methane Potential).

Los ensayos de BMP (Figura 1) se realizaron por triplicado para cada tipo de lodo, en cámara de temperatura controlada (37ºC o 55ºC, según régimen mesófilo o termófilo), en reactores mantenidos en agitación constante durante todo el ensayo, y con seguimiento manométrico de la producción de biogás-metano.



Figura 1. Dispositivo experimental de determinación de potenciales metanogénicos (BMP)

Los resultados del estudio se muestran expresados por unidad de materia degradable (SV), y también en valor relativo con respecto al potencial metanogénico máximo estimado teóricamente a partir de la composición. Los indicadores resultantes son por tanto:

- NL CH4/kg SV: potencial metanogénico teórico/experimental (BMP-teórico/BMP-exper)
- % BD = porcentaje de biodegradabilidad (BMP-exper / BMP-teórico)

Digestión anaerobia en continuo – Estudio de escenarios

Las actividades de investigación a escala piloto corresponden al seguimiento de digestores anaerobios en continuo, ensayando las 14 diferentes configuraciones de proceso, que combinan HT con DAM y /o DAT (Cuadro 1).

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

La Figura 2 muestra esquema e imágenes del dispositivo experimental. Los digestores se mantienen en agitación constante y a la temperatura deseada (encamisado de agua caliente), y están dotados de alimentación y salida de efluente, y conexión directa a un equipo de medida de biogás (por desplazamiento de líquido).



Figura 2. Batería de digestores empleada, y esquema de un digestor tipo.

Las condiciones de operación de los digestores y predigestores se resumen en el Cuadro 2, en sus parámetros fundamentales de temperatura, tiempo de residencia (THR), carga orgánica de trabajo (CO) y concentración de materia seca (%MS) en la alimentación.

Etapa	Descripción	T (≌C)	THR (d)	CO (kg SV/m ³ .d)	% MS alimentación
DAM	Digestión Anaerobia Mesófila	37ºC	20 d	1,2 — 1,4	2,5 – 3%
DAT	Digestión Anaerobia Termófila	55ºC	15 d	1,5 – 1,8	2,5 – 3%
DADE (DAT)	Digestión Doble Etapa (etapa termófila)	55ºC	2,5 d	13,5 – 15,0	2,5 – 3%
Predigestión (DAM)	Pre-digestión (etapa mesófila)	37ºC	20 d	1,2 – 1,4	2,5 – 3%

Cuadro 2: Resumen de las condiciones de operación establecidas

Tratamiento térmico en planta piloto de laboratorio

Como se observa en el Cuadro 1, los escenarios 2-5 incorporan una etapa de tratamiento térmico que se combina con la digestión. El equipo experimental empleado (Figura 3) consiste en una planta piloto semi-automática que permite llevar a cabo el proceso de cocción en las condiciones de presión y temperatura prefijados, y posterior descompresión súbita o steam explosion. El lodo alimentado es previamente espesado por centrifugación hasta un valor en torno a 9-12 % de materia seca. El experimento estándar consiste en la carga manual del lodo, previamente concentrado por centrifugación, y posterior tratamiento térmico a 140ºC durante 30 min.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada



Figura 3: Planta piloto de hidrólisis térmica utilizada en la Universidad de Valladolid

Caracterización reológica

Con el objetivo final de minimizar la energía de mezcla en los digestores, la caracterización reológica utiliza (Figura 4) un reómetro Discovery HR-1 de la marca TA Instruments que cuenta con una pequeña cámara térmica para el control de la temperatura, que permite calentar muestras y mantener la temperatura hasta 600 °C.



Figura 4: Reómetro empleado en el análisis: con el horno abierto (izq.) y geometría de cilindros concéntricos (drch.).

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

La geometría empleada para las mediciones es de cilindros concéntricos (o cilindro coaxial) con un espacio entre cilindros de 1mm.

Las muestras de lodo a analizar se conservan en la nevera hasta su análisis reológico. Previamente a la realización del ensayo, la muestra se lleva a temperatura ambiente y se realiza el ensayo calentando la muestra a la temperatura de análisis establecida.

Se han realizado análisis reológicos a diferentes escalas de operación: a escala de laboratorio y a escala real (muestras de la EDAR de Copero). En los siguientes apartados se mostrará la metodología y resultados obtenidos de las diferentes muestras analizadas.

Para el análisis reológico se ha aplicado el siguiente procedimiento:

- 1. Calentamiento de la muestra hasta la temperatura establecida de análisis.
- 2. Durante 1 min, aplicación de una velocidad de cizallamiento de 100 s⁻¹.
- 3. Aplicación de una rampa de velocidad de cizallamiento desde 0,005 hasta 100 s⁻¹.
- 4. Segunda rampa de velocidad de cizallamiento desde 0,005 hasta 100 s⁻¹.

Muestras a escala de laboratorio

Se recibieron desde el laboratorio de la Universidad de Valladolid las siguientes muestras:

- 1. Lodo mixto (alimentación escenarios 1).
- 2. Lodo mixto hidrolizado (alimentación escenarios 2).
- 3. Lodo primario.
- 4. Lodo secundario.
- 5. Lodo secundario hidrolizado.

Muestras a escala real

Se recibieron 3 muestras desde la EDAR de Copero de 4 puntos diferentes (Figura 5):

- 1. Predigestión: lodo de salida de la pre-digestión de la EDAR.
- 2. Entrada de HT: lodo de entrada a la planta de hidrólisis térmica.
- 3. Salida de HT: lodo de salida de la planta de hidrólisis térmica.
- 4. Postdgestión: lodo de salida de la post-digestión de la EDAR.



Figura 5. Puntos de muestreo para el estudio de viscosidad del lodo.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Caracterización de la viscosidad

La viscosidad del lodo es un parámetro que se pone de relevancia en cualquier modelo CFD de un digestor anaerobio por su influencia en el grado de mezcla. Por este motivo, se ha decidido realizar varios análisis reológicos del lodo en el laboratorio para caracterizar su viscosidad.

El lodo anaerobio se describe como un fluido No-newtoniano pseudoplástico ([2], [3]) con una densidad variable en función del contenido de TS. En fluidos no-newtonianos, la viscosidad aparente depende del gradiente de velocidad como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$
 1

donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), η es la viscosidad aparente del lodo (Pa·s) y γ es el gradiente de velocidad(s⁻¹). Existen diferentes modelos para describir el comportamiento de los fluidos no newtonianos al gradiente de velocidad y los fangos activos residuales y el digestato anaerobio se describen generalmente con el modelo de Ostwald (power-law model), el modelo Bingham o el modelo Herschel-Bulkley [3], [4]. El modelo de Ostwald es el modelo reológico más simple y se define como Ec. 2. El modelo Herschel-Bulkley (Ec. 3) combina la ley de la potencia y el modelo de Bingham.

$$\tau = K\gamma^n \qquad \qquad 2$$

donde *K* es el índice de consistencia del fluido (Pa·sⁿ), *n* es el índice de la ley de potencia (-) y τ_0 es el esfuerzo crítico de fluencia (Pa). Las mediciones experimentales del gradiente de velocidad, el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente se ajustan a estos modelos para establecerlos en el modelo CFD. La calibración de τ_0 es probablemente el más difícil en estas mediciones, por los bajos gradientes de velocidad (inferior a 0,001 s⁻¹) que requieren un equipo muy preciso.

Transición de digestión anaerobia mesófila a termófila

Uno de los grandes retos que presenta la implementación de las configuraciones estudiadas en este proyecto es la adaptación de los digestores mesófilos convencionales a su operación en el rango de temperatura termófilo. La estrategia de conversión hacia digestión termófila se ha estudiado experimentalmente en laboratorio, como se describe a continuación.

Sustrato

El sustrato con el que se alimenta a los reactores es una mezcla de lodo primario y lodo secundario flotado (60:40 v/v) e hidrolizado posteriormente en hidrólisis térmica y diluido con agua industrial que se obtuvo de la EDAR Copero de Sevilla.

El lodo hidrolizado se almacenó refrigerado a 4 ºC en recipientes de plástico de 10 L. De este lodo se determinó la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos totales (ST), los sólidos volátiles (SV), acidez total (AT), alcalinidad y el pH. Las principales características promedio de la

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

mezcla se muestran en el Cuadro 3. El inóculo utilizado para las experimentaciones fue lodo digerido obtenido de la misma EDAR que opera en condiciones mesófilas (35 °C). Los reactores a escala de laboratorio utilizados en este estudio trabajaron en condiciones mesófilas durante varias semanas antes del inicio de los experimentos.

Parámetro	Valor
DQO (mg/L)	52342
ST (mg/L)	47483
SV (mg/L)	34509
рН	7,135

Cuadro 3. Caracterización lodo hidrolizado diluido (alimentación)

Montaje y funcionamiento del experimento

El experimento se llevó a cabo en dos reactores de doble camisa de agitación completa de 5 L.

El montaje experimental (Figura 6) consta de un vaso de alimentación, una bomba de alimentación, un reactor, una bomba con el que se extrae el efluente, un recipiente de efluente, una bomba para la recirculación (agitación) y un medidor de gas de la marca Ritter. Los reactores se inocularon inicialmente con lodo mesófilo digerido de la EDAR Copero. La temperatura se controló mediante un baño de agua caliente externo desde donde se recirculaba a la camisa externa de los reactores.

Los reactores fueron alimentados con un caudal constante de 0,375 L/día y un tiempo de retención de 20 días en el primer periodo de estudio y en el segundo 0,500 L/día y un tiempo de retención de 15 días. La carga volumétrica en sólidos volátiles es de aproximadamente de 0,9-1,2 g/L*día. El sustrato se introdujo de forma semicontinua en los reactores cuatro veces al día a intervalos de 6 horas.

Ambos reactores se operaron en condiciones mesófilas durante unas semanas antes de que comenzara el experimento. A partir del día 1 de la experimentación, la temperatura se aumentó gradualmente 2 °C diarios hasta los 42 y 55 °C en el reactor A y B, respectivamente. El reactor B se operó a la temperatura de 55 °C, mientras que la temperatura en el reactor A se aumentó gradualmente para alcanzar 47, 51 y 55 °C en los días 38, 86 y 127, respectivamente.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada



Figura 6. Esquema del experimento (Grupo TAR, Universidad de Sevilla).

La producción y composición del biogás, además del contenido de acidez total, se eligieron como los parámetros principales para realizar el seguimiento de la estabilidad del proceso. Se introdujeron cambios de temperatura una vez que se logró la estabilización de los parámetros principales.

Durante el experimento, se tomaron muestras 2 veces a la semana para analizarlas.

Métodos analíticos

La concentración de alcalinidad y acidez total se determinó mediante volumetrías con ácido clorhídrico, llevándolo a ebullición y volumetría con hidróxido sódico.

Dilución de la muestra por el método de dicromato de potasio de reflujo cerrado [5].

Los ST se analizaron ponderando las muestras antes y después del secado a 105 $^{\circ}$ C. Los SV se determinaron a 550 $^{\circ}$ C durante 20 minutos [5].

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del tratamiento térmico en la caracterización físico-química y bioquímica de lodos

Como de punto de partida del estudio se realizó la caracterización los distintos tipos de lodos de la EDAR Copero (primario, secundario, mixto y digerido). Los valores promedio obtenido se muestran en el Cuadro 4.

		Lodo primario	Lodo secundario	Lodo mixto	Lodo digerido
	ST (g/kg)	24,46	45,79	32,99	22,78
	SV (g/kg)	17,93	31,99	23,55	12,92
ión ca	% SV	73%	70%	71%	57%
imi	DQO total (g/kg)	30,72	45,59	36,67	17,89
eri: -qu	DQO sol. (g/kg)	3,06	1,57	2,46	0,4
ico	% DQO sol	10%	3%	7%	2%
Caı fís	NKT (g/kg)	0,98	2,95	1,77	1,61
	N-NH4 (g/kg)	0,21	0,49	0,32	0,73
	% N-NH4	21%	17%	18%	45%
ión a	Carbohidratos (% m.s.)	40,6%	32,7%	35,9%	24,7%
erizac	Proteínas (% m.s.)	12,3%	32,8%	24,6%	30,7%
Iracte bioqu	Lípidos (% m.s.)	20,4%	4,4%	10,8%	1,3%
ů	Cenizas (% m.s.)	26,7%	30,1%	28,8%	43,3%

Cuadro 4: Caracterización físico-química y bioquímica de los lodos frescos

Los valores ponen de manifiesto que todos los lodos son, como cabe esperar, de naturaleza orgánica (elevado %SV y bajo contenido en cenizas), pero diferentes entre sí en cuanto a composición.

La caracterización de los lodos después del tratamiento térmico mostró una serie de cambios, no en la composición, pero sí en la solubilidad o disponibilidad, especialmente de la materia orgánica. La Figura 7 muestra los resultados obtenidos.

En vista de los valores se puede resumir que el tratamiento térmico no conduce a una mineralización (pérdida de volátiles) del lodo, ni a un cambio en su composición bioquímica, pero sí da lugar a un aumento en la materia orgánica soluble, especialmente para los lodos secundario y digerido.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada









Figura 7: Caracterización comparativa de los lodos antes y después del tratamiento térmico

Influencia del tratamiento térmico y de la temperatura de digestión en la productividad de metano de lodos

Como punto de partida para tener una valoración preliminar sobre la influencia de la hidrólisis térmica y de la digestión termófila sobre los distintos tipos de lodos, se realizó la determinación de la capacidad de producción de metano de los lodos tanto frescos como hidrolizados térmicamente, en condiciones mesófilas (37ºC) y termófilas (55ºC), mediante la metodología BMP descrita.

La Figura 8 presenta las curvas de productividad de metano obtenidas, expresando el metano como producción relativa respecto a la materia volátil alimentada al ensayo (mL CH4/g SV alimentado).

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada



Figura 8. Curvas de producción de metano obtenidas en los ensayos BMP

Los resultados del estudio de BMP dan una primera visión que permitirá comprender el comportamiento de los digestores en continuo, estudio que se presenta a continuación.

Una comparativa más ilustrativa se muestra en la Figura 9, que representa comparativamente los valores de productividad máxima calculada teóricamente (BMP-teórico) y con los valores experimentales obtenidos en digestión mesófila (BMP-experim_DAM) y termófila (BMP-experim_DAT).



Figura 9. Comparativa de productividad de metano teórica y experimental, en lodos frescos e hidrolizados en DAM y en DAT

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

El Cuadro 5 calcula, para cada lodo, la biodegradabilidad obtenida (%BD), expresada como el metano experimental obtenido con respecto al potencial teórico. Se calcula también el incremento en biodegradabilidad que tiene lugar por hidrólisis térmica (% Δ BD HT).

	Mesófilo (DAM)			Termófilo (DAT)				
	1º	2º	Mixto	Digerido	1º	2º	Mixto	Digerido
%BD	63%	43%	52%	25%	65%	44%	53%	27%
%BD _{нт}	64%	61%	63%	47%	67%	65%	66%	50%
$\%\Delta$ BD HT	2%	43%	27%	88%	3%	47%	29%	87%

Cuadro 5: Comparativa de biodegradabilidad, en lodos frescos e hidrolizados (DAM y DAT)

Las figuras y los valores ponen de manifiesto que:

- El lodo primario es el más biodegradable, siendo su capacidad de generación de metano 380 L CH4/kg SV alimentado). La menor productividad, como cabe esperar, corresponde al lodo digerido (126 L CH4/kg SV).
- La digestión termófila no demuestra un incremento en la producción de metano.
- Los lodos que incrementan de manera más notable su productividad de metano tras el tratamiento térmico son el lodo secundario (40-50% incremento) y especialmente el lodo digerido (85-89% incremento).
- En el caso del lodo primario, la hidrólisis térmica no tiene influencia.

Operación en continuo de las configuraciones estudiadas

Las 14 configuraciones establecidas han sido operadas durante aproximadamente un año. En la Figura 10 se muestran los valores promedio de productividad de metano obtenidos en el seguimiento de la operación de los digestores, correspondientes al estado estacionario. En ella se pueden identificar, de izquierda a derecha, los escenarios 1- 5, con sus correspondientes digestiones en mesófilo (DAM), escenarios en termófilo (DAT), y en doble etapa (DADE). La productividad de metano está expresada por unidad de materia volátil de entrada al escenario; es decir, correspondiente o equivalente al lodo mixto que se alimenta al escenario DAM_1, que corresponde a la digestión convencional, y es el escenario de "control".



Figura 10. Valores de productividad de metano (L CH4/kg SV lodo) en digestión en continuo

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Analizando los resultados de producción de metano se infieren las siguientes conclusiones:

- Comparando los escenarios DAT y DAM, se observa que la digestión termófila no incrementa la producción de metano (resultado similar al del estudio BMP).
- Valorando los resultados de la doble etapa (DADE) con respecto a la mono-etapa (DAM), se identifica que la operación en doble etapa únicamente ha dado lugar a un aumento en la producción de metano en ausencia de hidrólisis térmica previa (escenario DADE_1). Esto pone de manifiesto que etapas de hidrólisis térmica y termófila parecen ser redundantes, no dando lugar a sinergia alguna al combinarlas.
- Distintas ubicaciones de la HT en la línea de lodos no dan lugar a producciones de metano sensiblemente diferentes. La decisión del tipo de lodo a hidrolizar (mixto, secundario o digerido) atenderá pues los criterios que se discuten a continuación.

Comparativa inicial de configuraciones (CAPEX y OPEX)

Además de la producción de metano, ya evaluada, existen otros aspectos clave en la comparación de escenarios. Las gráficas de la Figura 11 comparan cinco de ellos: generación de metano, productividad de la digestión, volumen de digestión, higienización y tamaño de la HT. Así, valores positivos indican mejoras y valores negativos un empeoramiento respecto a la situación convencional (configuración DAM_1).

De forma complementaria, el Cuadro 6 presenta una comparativa preliminar de las diferentes configuraciones en base a los dos beneficios clave (aumento de la producción de biogás e higienización del biosólido) y a los elementos críticos de CAPEX (volumen de digestión y capacidad de HT) y OPEX (consumo de energía). En este estadio inicial, algunos de los parámetros se presentan de forma cualitativa (ej. alto/bajo) y no cuantitativa. El estudio de escalado con el que concluirá el proyecto Therm2 proporcionará mayor definición e incluirá parámetros adicionales de importancia como el impacto en la deshidratación final del lodo, tanto en el volumen de lodo derivado de la sequedad alcanzable como en la calidad de los retornos de deshidratación a cabecera de planta.

Las principales conclusiones:

- Configuraciones DAM: El escenario más prometedor es el DAM_2, hidrólisis de lodo mixto. Los escenarios DAM_3 y DAM_4 tienen la limitación de no higienizar. El escenario DAM_5 no presenta parámetros a priori atractivos.
- Configuraciones DAT: Los mejores valores parece presentarlos el escenario DAT_3, siempre que garantice la higienización del biosólido. Los escenarios DAT_1, DAT_2 y DAT_5 no presentan ventajas evidentes y el escenario DAT_4 tiene la ventaja de conferir flexibilidad a la línea de lodos de la EDAR Copero.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Configuraciones DADE: El escenario más prometedor parece ser el DADE 1, siempre que • garantice la higienización. Como se ha discutido anteriormente, la hidrólisis térmica y la enzimática parecen ser redundantes, penalizando el resto de los escenarios.



Escenarios en mesófilo

Escenarios en termófilo







- Incremento en metano (m3 CH4/ton SV)
- Incremento en productividad (m3 CH4/m3 reactor.d)
- Reduccción del volumen de digestión (>0%=reducción: <0%=incremento)
- Higienización (100%=higieniza; -100%=no higieniza: 0%=dudoso)
- Tamaño de la HT (-100%=todo el fango; -50%=sólo 2º; 0%=sin HT)

Figura 11: Comparativa de escenarios respecto a la digestión convencional de lodo mixto



Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Ecco	narios	Biogás	Biosólido	CA	PEX	OPEX	Comontaria
ESCE	1101105	vs. control	Higieniza	Vol. digestión	Capacidad HT	Uso energía	Comentano
	DAM 1	-	No	-	-	Bajo	Escenario de control
	DAM 2	+41%	Sí	Вајо	Alta	Bajo	HT estándar
DAM	DAM 3	+42%	No	Вајо	Ваја	Bajo	No higieniza
	DAM 4	+33%	No	Alto	Ваја	Bajo	No higieniza
	DAM 5	+40%	Sí	Alto	Alta	Alto	No especialmente atractiva
	DAT 1	+2%	?	Вајо	-	Alto	Bajo aumento de biogás, alto consumo energía
	DAT 2	+42%	Sí	Вајо	Alta	Вајо	No mejora a DAT-3 y requiere mayor HT
DAT	DAT 3	+42%	?	Вајо	Ваја	Bajo	Configuración prometedora (si higieniza)
	DAT 4	+32%	?	Alto	Ваја	Вајо	Configuración flexible para EDAR Copero
	DAT 5	+39%	Sí	Alto	Alta	Alto	No especialmente atractiva
	DADE 1	+38%	?	Вајо	-	Alto	Dudas sobre higienización y recrecimiento
DADE	DADE 2	+41%	Si	Вајо	Alta	Bajo	No mejora a DAM-2 y requiere mayor digestión
DADE	DADE 3	+43%	?	Вајо	Ваја	Вајо	No mejora a DADE-1 y requiere HT
	DADE 4	+33%	?	Вајо	Baja	Вајо	No mejora a DADE-1 y requiere HT

Cuadro 6: Comparativa preliminar de escenarios en aspectos clave

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Caracterización reológica

Una adecuada calidad de mezcla y la energía requerida para conseguirla son aspectos clave de la operación de los digestores anaerobios. Para optimizar estos parámetros clave, es fundamental caracterizar la propiedad física los condiciona: la viscosidad.

Muestras procedentes del estudio en digestores de laboratorio: efecto de la HT

La Figura 12 muestra una comparativa de diferentes muestras que permitirá el estudio del impacto de la hidrólisis térmica en la reología a escala de laboratorio.



Figura 12. Comparación de las viscosidades experimentales en función del gradiente de velocidad para los distintos lodos.

Cualitativamente, se observa que la viscosidad de las dos muestras que han sufrido el proceso de hidrólisis térmica es inferior a las muestras que no han pasado por este proceso.

Para cuantificar el grado de reducción de la viscosidad, se decide normalizar estas viscosidades experimentales por el contenido en sólidos totales. El motivo de esta normalización es la modificación de la viscosidad que la propia variación de la concentración de sólidos puede generar en la viscosidad del lodo. Del resultado de esta normalización se obtienen nuevas curvas que se ajustan matemáticamente a una ecuación potencial como el modelo Ostwald de Waelle. El Cuadro 7 muestra el cambio de los parámetros K y n del modelo Ostwald de Waelle.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

	ST (%)	K	n	<i>K</i> normalizada	n normalizado
1. Lodo mixto	3,68	0,7512	0,754	0,2041	0,754
2. Lodo mixto hidrolizado	3,54	0,264	0,67	0,0746	0,67
4. Lodo secundario	3,48	2,2897	0,714	0,658	0,714
5. Lodo secundario hidrolizado	3,46	0,1671	0,692	0,0483	0,692

Cuadro 7. Parámetros del modelo potencial de algunas muestras a escala de laboratorio.

Como se observa, la n no cambia su valor con la normalización de la viscosidad pero sí lo hace el índice de consistencia del fluido (K): un índice más alto indica una mayor viscosidad del fluido para el gradiente de velocidad medido y éste se reduce en ambos tipos de lodo siendo en el caso del lodo mixto un 37% del valor inicial y en el caso del lodo secundario un 7% del valor inicial.

Por otro lado, tras esta normalización también se ha comparado par a par las viscosidades para los gradientes de velocidad medidos de ambos tipos de lodo con la siguiente fórmula:

Diferencia relativa =
$$\frac{|A - A'|}{A}$$
 1

donde A es el valor de viscosidad normalizada de la muestra de referencia y A' la viscosidad normalizada de la muestra en comparativa. Esta diferencia relativa se ha expresado en porcentaje y se ha obtenido el promedio, máximo y mínimo de la diferencia en todo el rango de gradientes de velocidad medido y se muestra de manera resumida en el Cuadro 8. En resumen, puede concluirse que la hidrólisis térmica reduce la viscosidad en un lodo mixto en un 63% como promedio y en un lodo secundario en un 92% como promedio.

Cuadro 8. Comparación de resultados del efecto de la hidrólisis térmica en lodo mixto y secundario a escala de laboratorio tras normalizar por ST.

Parámetro	Lodo Mixto	Lodo Secundario
Diferencia promedio en el rango medido	63%	92%
Diferencia máxima en el rango medido	78%	95%
Diferencia mínima en el rango medido	51%	89%

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Muestras procedentes de la EDAR Copero

En las siguientes figuras, se muestran los resultados obtenidos del análisis reológico de las diferentes muestras de lodos con el ajuste potencial a un modelo Ostwald de Waelle.



Figura 13. Viscosidades promedio en función del gradiente de velocidad.

Las curvas de viscosidad obtenidas de la muestra de salida de HT a diferentes temperaturas se emplearán en las simulaciones CFD para la comparación del grado de agitación del lodo para diferentes temperaturas de operación del lodo en los digestores de postdigestión. En la Figura 13, se observa que, a mayor temperatura de operación, menor viscosidad del lodo y, por tanto, más sencilla será su agitación en postdigestión y, por ende, menores serán sus necesidades de agitación en esta etapa.

Puesto que la ST era tan diferente entre las diferentes muestras, se decide normalizar la viscosidad según este parámetro (datos no mostrados en este informe) para eliminar la influencia de este factor en las mediciones. Las viscosidades obtenidas han sido las siguientes:



Figura 14. Viscosidad/ST en función del gradiente de velocidad.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Pese a la normalización por ST, el orden de las curvas sigue siendo el mismo: la mayor viscosidad siempre se ha registrado con el lodo de entrada a HT y la menor viscosidad con la muestra de postdigestión. No obstante, la diferencia observada anteriormente entre las muestras relativas con HT (entrada y salida) y las muestras de predigestión y postdigestión se han reducido en un orden de magnitud al normalizar con la concentración de sólidos totales.

Tras la normalización con la concentración de sólidos, se han reajustado a un modelo Ostwald de Waelle las diferentes curvas obtenidas para establecer una mejor comparación del índice de consistencia del fluido (K). También se ha comparado la viscosidad a diferentes velocidades de cizallamiento llegándose a obtener el promedio, máximo y mínimo de la diferencia de viscosidad entre unas muestras y la de predigestión.

En primer lugar, se comparan las diferentes muestras tomando como muestra de referencia la de predigestión con el fin de observar la influencia de los procesos de concentración del lodo digerido, HT y digestión anaerobia.

Parámetro	Predigestión, 38 °C	Entrada HT, 90 °C	Salida HT, 38 °C	Salida HT, 55 °C	Salida HT, 90 °C	Postdigestión, 38 °C
К	0,1741	1,7414	0,9063	0,6857	0,4354	0,1129
Ratio K/K _{predigestion}		10,00	5,21	3,94	2,50	0,65
Diferencia relativa						
promedio	-	913%	448%	319%	151%	-34%
Diferencia relativa						
máxima	-	1100%	848%	648%	227%	-5%
Diferencia relativa mínima	-	754%	161%	88%	84%	-58%

Cuadro 9. Comparación de resultados de las muestras de la EDAR tras normalizar por ST.

Del Cuadro 9, cabe destacar la comparación entre la muestra de predigestión y las muestras de entrada a HT para observar el efecto de la deshidratación del lodo y la muestra de postdigestión para entender el efecto global de todo el proceso de esta línea de lodos en la viscosidad del lodo: En primer lugar, la deshidratación del lodo aumenta notablemente la viscosidad del lodo llegando a ser como mínimo un 754% más de la viscosidad inicial y como máximo un 1100% más de forma que el índice de consistencia del fluido se aumenta 10 veces respecto al valor inicial. En segundo lugar, cabe comparar la muestra de predigestión con la de postdigestión para evaluar el efecto global de las diferentes fases de tratamiento. A partir de los datos de la tabla, se observa que el índice de consistencia del fluido de postdigestión se reduce y finaliza con un 65% del valor inicial y las viscosidades se reducen en promedio un 34% respecto a la muestra inicial de predigestión.

Con el fin de evaluar el efecto de la HT en la viscosidad del lodo, es importante comparar la viscosidad del lodo a la misma temperatura de medición en las muestras de entrada y salida de HT. El Cuadro 10 muestra esta comparativa: el índice de consistencia se reduce y acaba siendo

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

un 25% del valor de entrada siendo la reducción de las viscosidades entre un 62 y un 85%, lo que en promedio resulta en una reducción de un 74%.

Cuadro 10. Comparación de resultados de las muestras de entrada y salida de HT a 90°C tras normalizar por ST.

Parámetro	Entrada HT, 90 °C	Salida HT, 90 °C
К	1,7414	0,4354
Ratio K/K		0,25
Diferencia relativa promedio	-	-74%
Diferencia relativa máxima	-	-62%
Diferencia relativa mínima	-	-85%

Transición de digestión anaerobia mesófila a termófila

Con el objetivo de identificar la estrategia óptima de adaptación de los digestores mesófilos convencionales a su operación en rango termófilo, se ensayaron los dos protocolos que se discuten a continuación: aumento escalonado de temperatura y aumento por choque térmico.

Aumento escalonado de la temperatura

La primera fase, con un aumento de temperatura de 37ºC a 42ºC, solo tuvo un ligero efecto en el proceso de digestión, que resultó en una disminución de la producción de biogás de 4053 a 3253 mL de biogás/día (Figura 15). La concentración de Acidez Total no varió, siendo la relación de alcalinidad y acidez de entre 0,10 y 0,12 (Figura 16).

La segunda fase, con un aumento de temperatura de 42°C a 47°C, provocó una grave perturbación en el reactor. La producción de biogás primero descendió a un mínimo de 23 mL/día, empezando a remontar progresivamente a partir de ese momento hasta llegar a una producción de 3992 mL/día. Respecto a la Acidez Total cabe destacar que comienza a subir drásticamente y cuando llega a 2200 mg/L se deja de alimentar, este parámetro sigue subiendo hasta una acidez máxima de 3310 mg/L, en ese momento comienza a disminuir llegando a valores de 750 mg/L.

La fuerte perturbación observada al cambiar de 42°C a 47°C se puede explicar confrontando el óptimo intervalo de temperatura de mesófilos y termófilos. De hecho, a 47 °C, el sistema podría estar en un punto crítico, el nivel umbral superior de la temperatura óptima requerido para los mesófilos, lo que podría causar la muerte de las bacterias mesófilas. Sin embargo, estas condiciones puede que tampoco sean muy adecuadas para bacterias termófilas, ya que corresponde a su menor tasa de crecimiento. La combinación de estos dos factores podría explicar la fuerte variación en la producción de biogás y todos los efectos asociados. Es decir, el cambio de temperatura de 42°C a 47°C puede tener un impacto significativo en la actividad microbiana, especialmente en sistemas que incluyen tanto bacterias mesófilas como termófilas.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

Los mesófilos, que suelen tener un rango óptimo de crecimiento entre 20 y 45°C, pueden sufrir estrés térmico y eventualmente morir a temperaturas superiores a su límite, lo que afecta la dinámica del sistema. Al alcanzar 47°C, la actividad de las bacterias mesófilas puede verse inhibida o completamente eliminada, resultando en una disminución de la degradación de materia orgánica y en la estabilidad del proceso de estabilización de lodos, por eso este es el punto crítico en la transición de temperatura. Las bacterias termófilas que prosperan en temperaturas más altas comienzan a dominar en ese rango.

Se dejó de alimentar el día 45 en esta segunda fase cuando hubo el acúmulo de acidez y se volvió a alimentar cuando la acidez descendió a 1500 mg/L. El tiempo de retención hidráulico se pasó de 20 a 15 días el día 147, esto hizo que el biogás descendiese ligeramente.

El comportamiento del reactor en la tercera y cuarta fase, de 47°C a 51°C y de 51°C a 55°C, fueron similares y contantes no registrándose ninguna caída de biogás ni aumento de acidez. Más al contrario, al final del experimento, en la cuarta fase, hubo un ligero aumento de biogás.





Figura 15. Transición por fases, escalonada volumen de biogás experimental producido



Aumento de temperatura por choque térmico.

La temperatura se incrementó cada día 2ºC hasta alcanzar los 55ºC. Después del aumento de temperatura la acidez empezó a aumentar y el biogás a disminuir su producción drásticamente, teniendo que dejar de alimentar el día 43, a partir de este momento siguió descendiendo el biogás hasta tener como valor mínimo de 12 mL/día. Tras 40 días de no alimentar el reactor, se volvió a alimentar. Siguió descendiendo la acidez y aumentando el volumen de biogás hasta llegar a ser constantes.

El día 125 se pasa de 20 a 15 días de tiempo de retención hidráulico, después del primer periodo de TRH el reactor sufrió un ligero descenso de biogás hasta llegar a estabilizarse de nuevo con valores medios de producción de unos 2500 mL/día de biogás.

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada





Figura 17. Transición choque térmico, volumen de biogás experimental producido

Figura 18. Transición choque térmico, escalonada Acidez Total

El proceso de adaptación fue similar a la segunda fase del proceso escalonado descrito anteriormente.

La rápida adaptación del sistema a las condiciones termófilas indica la presencia de microorganismos termófilos en el inóculo mesófilo. Estos resultados fueron respaldados por los hallazgos de [6], quien informó que generalmente hay un pequeño porcentaje de termófilos en los lodos mesófilos, lo que puede servir como base para el rápido desarrollo de la comunidad de bacterias termófilas con respecto a una tasa de crecimiento relativamente mayor de los termófilos. En un estudio sobre la caracterización de la comunidad microbiana basado en un experimento de puesta en marcha [7], concluyeron que las especies dominantes que participan en la digestión termófila anaeróbica no eran mesófilos adaptados, sino los termófilos ya presentes en el inóculo a un nivel subdominante que rápidamente se volvieron dominantes en condiciones anaeróbicas termófilas.

CONCLUSIÓN

Las principales conclusiones derivadas de los resultados que se presentan en este articulo son los siguientes:

- 1. Los ensayos BMP y los ensayos en continuo en el laboratorio muestran resultados comparables. En etapas posteriores se verificará si también están en línea con los resultados obtenidos en la planta piloto.
- 2. El lodo primario es muy biodegradable *per se* y someterlo a un proceso térmico tiene escaso impacto en su producción de metano.
- El tratamiento mediante hidrólisis térmica aumenta significativamente la materia orgánica soluble, especialmente en los lodos secundario (incremento del 40-50%) y digerido (incremento del 85-89%).
- 4. La digestión termófila (DAT) no incrementa la producción de metano cuando se compara con la digestión mesófila (DAM), en ninguno de los escenarios.
- 5. La digestión de doble etapa (DADE) sólo incrementa la producción de metano de la

Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

digestión en una sola etapa (DAM) en ausencia de hidrólisis térmica previa. Esto evidencia una competencia entre la hidrólisis enzimática de la DADE y la hidrólisis térmica que hace que en presencia de una de ellas, la otra sea redundante.

- 6. Las configuraciones más atractivas tras la evaluación preliminar son DAM_2, DAT_3 y DADE_1 por los parámetros que presentan y la DAT_4 por su versatilidad y flexibilidad.
- 7. La ubicación de la hidrólisis térmica tiene un impacto relativamente modesto en la producción de metano, por lo que es razonable proponer que su elección dependa fundamentalmente de parámetros económicos (CAPEX y OPEX).
- 8. La estrategia de choque térmico, aumentando la temperatura en un sólo paso, demostró ser una transición de régimen mesófilo a termófilo más rápida que la del aumento progresivo y por fases de la temperatura, sin presentar ninguna desventaja significativa.
- 9. La hidrólisis térmica reduce muy significativamente la viscosidad del lodo (reducciones en el rango del 60%-90%), y este efecto es más marcado en los resultados a escala real que en sus equivalentes a escala de laboratorio.
- 10. Las configuraciones ensayadas presentan una reducción media de la viscosidad final del lodo del 34%. El siguiente paso será traducir, mediante simulación fluidodinámica con CFD, esta reducción de viscosidad en velocidades de lodo en digestores a escala real y en la energía necesaria para una mezcla óptima.

Partiendo de los resultados de laboratorio presentados, ya se están ensayando en planta piloto las configuraciones más prometedoras. Los resultados de la planta piloto se escalarán de forma teórica a escala real, tomando como base la línea de lodos de la EDAR Copero (Sevilla), donde se implementará la configuración avanzada resultante de este proyecto en sustitución de la configuración actual con hidrólisis térmica como inter-tratamiento entre una pre- y una post-digestión anaeróbia mesófila.

RECONOCIMIENTOS

El proyecto CPP2021-008678 ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de la convocatoria de ayuda a Proyectos de I+D+i en Colaboración Público-Privada (Orden CIN/1502/2021, de 27/12/2021) MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR

Todos los datos presentados en esta publicación son propiedad del Consorcio del proyecto Therm2.



Valorización energética de residuos orgánicos y economía circular mediante digestión anaerobia avanzada

BIBLIOGRAFIA

- I. Angelidaki and W. Sanders, "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 3, no. 2, pp. 117–129, Jun. 2004, doi: 10.1007/s11157-004-2502-3.
- [2] J. C. Baudez, F. Markis, N. Eshtiaghi, and P. Slatter, "The rheological behaviour of anaerobic digested sludge," *Water Res*, vol. 45, no. 17, pp. 5675–5680, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.watres.2011.08.035.
- [3] N. Eshtiaghi, F. Markis, S. D. Yap, J. C. Baudez, and P. Slatter, "Rheological characterisation of municipal sludge: A review," *Water Res*, vol. 47, no. 15, pp. 5493–5510, 2013, doi: 10.1016/j.watres.2013.07.001.N.
- [4] N. Ratkovich *et al.*, "Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling," *Water Res*, vol. 47, no. 2, pp. 463–482, 2013, doi: 10.1016/j.watres.2012.11.021.
- [5] APHA/AWA/WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. Washington D.C., 1998.
- [6] M. Chen, "Adaptation of mesophilic anaerobic sewage fermentor populations to thermophilic temperatures," *Appl Environ Microbiol*, vol. 45, no. 4, pp. 1271–1276, Apr. 1983, doi: 10.1128/aem.45.4.1271-1276.1983.
- [7] M. Chachkhiani *et al.*, "16S rDNA characterisation of bacterial and archaeal communities during start-up of anaerobic thermophilic digestion of cattle manure," *Bioresour Technol*, vol. 93, no. 3, pp. 227–232, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.11.005.