

PROCESO PARA LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL MATERIAL CARBONOSO

CAMPO DE LA INVENCION

- 5 La presente invención se relaciona con el tratamiento de materiales carbonosos que comprende un paso de pretratamiento térmico. De manera más específica, se trata de un tratamiento de lodos o residuos orgánicos que incluye al menos un paso de tratamiento biológico como la digestión anaeróbica.

ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS

- 10 La digestión anaeróbica es un proceso clave para recuperar la energía presente inicialmente en el material carbonoso, como las aguas residuales y los residuos orgánicos, en forma de biogás. La mejora en la eficiencia de la digestión conduce a una mayor producción de energía en el camino hacia la PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) energéticamente autosuficiente y las instalaciones de tratamiento de residuos. Sin embargo, la digestión anaeróbica muestra ciertas limitaciones en el primer paso hidrolítico, lo que lleva a una lenta degradación de la materia orgánica y altos tiempos de retención en el digestor. Para mejorar la cinética de la biodegradación anaeróbica, se han desarrollado muchas tecnologías de pretratamiento con el objetivo de acelerar el paso que limita la hidrólisis y mejorar la productividad del biogás, así como las características del material carbonoso (o lodos) digerido.

- 20 En la Figura 1 se muestra un proceso de digestión mejorado del estado de la técnica, con diferentes ejemplos de pasos de pretratamiento de hidrólisis implementados aguas arriba de un digestor mesófilo. El paso de pretratamiento de hidrólisis (PT) puede ser una hidrólisis térmica (TH) o una hidrólisis biológica (BH), llevada a cabo en un tanque (H). El paso de pretratamiento también puede comprender un paso de predeshidratación (llevado a cabo en una unidad de predeshidratación DU) y almacenar el material carbonoso en una unidad de almacenamiento (SS), en donde el material carbonoso es pretratado antes de ingresar al reactor de tratamiento térmico (H).

- 30 La hidrólisis térmica (TH o THP) es la tecnología de pretratamiento más extendida que se utiliza para mejorar la digestión anaeróbica (AD) de lodos en la PTAR. La hidrólisis térmica tiene como objetivo mejorar el rendimiento de la digestión y la deshidratabilidad de los lodos biológicos o mixtos mediante la ruptura de las paredes celulares de las bacterias; en consecuencia, el contenido celular se vuelve fácilmente degradable de manera anaeróbica.

- 35 Otro método utilizado para mejorar el paso de hidrólisis que limita la velocidad se basa en la hidrólisis biológica (BH), también conocida como digestión anaeróbica por fases de temperatura (TPAD o 2PAD). La TPAD combina generalmente una etapa de pretratamiento termófilo breve (1 a 3 días) (generalmente de 50 a 70° C o 75° C) aplicada antes de una digestión anaeróbica mesófila convencional (generalmente de 35° C a 38° C, 10 a 20 días). La TPAD se alimenta generalmente con un material carbonoso que exhibe un contenido de sólidos secos (DS) que varía de 3 a 8 % DS. Combina una etapa corta de pretratamiento termófilo aplicada antes de una digestión anaeróbica mesófila convencional. Se ha demostrado que la TPAD termofílica-mesofílica o 2PAD es un tratamiento eficaz para aumentar la producción de metano y la destrucción de sólidos volátiles (VS), en comparación con una digestión mesófila de una sola etapa.

- 45 En comparación con la hidrólisis térmica, la hidrólisis biológica muestra rendimientos inferiores en términos de deshidratabilidad de lodos y rendimiento de digestión (producción de biogás, el biogás producido que se almacena en una BS de almacenamiento de biogás). Sin embargo,

la hidrólisis biológica es una alternativa interesante porque requiere menores gastos de capital y es, en particular, más relevante en los países emergentes.

La TPAD permite la producción de biosólidos de clase B de EPA US, mientras que el 2PAD permite la producción de biosólidos de clase A.

- 5 La reutilización beneficiosa de biosólidos a través de la aplicación al suelo es regida en los Estados Unidos (US) por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), más específicamente a través de la norma CFR 40 Parte 503 de la EPA para biosólidos. Dentro de la norma de la parte 503, se define la definición de la calidad de biosólidos y tiene dos terminologías comúnmente identificadas: Biosólidos Clase A; y Biosólidos Clase B. Si bien la norma de la parte 503 también define la calidad en torno a cosas como los metales pesados, el enfoque de los procesos de AD y las mejoras de la digestión, se centran en cumplir con los requisitos relacionados con las reducciones de atracción de patógenos y vectores.

- 10 En un sistema TPAD/2PAD, el lodo debe enfriarse entre el reactor de hidrólisis biológico (termófilo) (aproximadamente 55° C) H y el digestor mesófilo D, generalmente a 37° C. En la actualidad, aguas abajo del paso de hidrólisis de una TPAD, el enfriamiento de los lodos se produce a través de intercambiadores de calor (intercambiadores de calor de recuperación o agua/lodos, designados en adelante como HEX), como se muestra en la figura 2.

El agua utilizada en HEX suele ser el agua de proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales.

- 20 El tamaño del intercambiador de calor puede llegar a ser significativamente grande, ya que depende de la temperatura del agua de proceso. De hecho, el dimensionamiento del HEX depende de la temperatura delta en el intercambiador de calor entre el lado frío (agua de enfriamiento) y el lado caliente (lodos hidrolizados). Cuanto menor sea la temperatura delta, mayor será el HEX.

- 25 Con el HEX actual, se encuentran múltiples limitaciones de las configuraciones actuales.

- La viscosidad varía significativamente dependiendo del tipo de lodo y de un sitio a otro, que puede tener un gran impacto en el tamaño del intercambiador de calor (variabilidad del coeficiente de intercambio de calor) e inducir un costo de energía significativo para el bombeo (importantes pérdidas de carga). Esto puede hacer que la recuperación de calor HEX sea antieconómica o incluso imposible de llevar a cabo. Esto también limita la escalabilidad del proceso de un sitio a otro.

- 30 Muchos países emergentes se encuentran en regiones de clima tropical o cálido donde la temperatura del agua de proceso (utilizada para el enfriamiento) puede ser demasiado alta para enfriar el lodo de manera eficiente (la temperatura del agua de proceso suele ser superior a los 20° C). Esto aumenta significativamente el tamaño del HEX, en el que la pérdida de carga generada requiere el uso de una gran capacidad y tamaño de bombeo y, en consecuencia, hace que la solución sea intensiva en energía y/o antieconómica. Esto no es compatible con el requisito de reducir el consumo de energía en países donde los costos de energía son altos.

- 35 Esta es la razón por la que muy pocos actores en el mercado ofrecen un TPAD/2PAD en grandes instalaciones industriales, donde los problemas del tamaño del HEX se vuelven inmanejables.

Por último, los depósitos que se producen en el intercambiador de calor también pueden disminuir la calidad del intercambio ya que reducen el coeficiente del intercambio de calor.

- 40 Para superar las limitaciones mencionadas anteriormente, los diseños de los intercambiadores de calor incluyen numerosos márgenes de seguridad para garantizar un

45

funcionamiento adecuado. En consecuencia, los intercambiadores de calor de enfriamiento pueden ser muy largos. Cuanto más largo sea el intercambiador de calor, mayor será la pérdida de carga y, con ello, el consumo eléctrico de las bombas.

- 5 Además, el intercambiador de calor debe mantenerse y conservarse libre de incrustaciones (pueden producirse depósitos de grasa, sólidos y minerales). Este último disminuye continuamente el intercambio de calor global a un valor por debajo del deseado, además de aumentar las pérdidas de carga de la bomba.

- 10 Y como la TPAD puede funcionar por lotes, en cuyo caso se denomina 2PAD, el intercambiador de calor puede utilizarse solo una fracción del día, sin flujo pasando a través de él. Durante estas fases de lote, pueden ocurrir depósitos significativos y adherirse permanentemente a las paredes del HEx, lo que acelera aún más los depósitos futuros.

Otra dificultad de los procesos actuales de la TPAD/2PAD es el paso de precalentamiento del lodo antes de ser alimentado al reactor de hidrólisis biológica.

- 15 En un sistema TPAD/2PAD, como la primera etapa (BH) funciona en condiciones termófilas, es necesario precalentarlo. Para reducir los requerimientos de calor de esta primera etapa, es posible utilizar los lodos hidrolizados calientes para calentar los lodos crudos fríos que alimentan el sistema. Esta recuperación de calor se suele realizar en un intercambiador de calor doble de lodo caliente/agua/lodo frío. El agua es el medio de transferencia de energía que lleva la energía del lodo caliente al lodo frío.

- 20 Esto lleva a la necesidad de construir otro intercambiador de calor para recuperar la energía. Otra posibilidad es disponer de un intercambiador de calor lodo caliente/lodo frío. En este caso, el coeficiente de intercambio de calor es muy limitante, y en términos de masa total, la masa de este lodo/lodo HEx es equivalente a la del lodo/agua/lodo HEx y, en consecuencia, su costo también está en el mismo rango.

- 25 Las mismas deficiencias se encuentran en los procesos de digestión anaeróbica que incluyen un paso de pretratamiento con TH aguas arriba de la digestión anaeróbica, o cuando el material carbonoso debe pasteurizarse antes de ser digerido.

RESUMEN DE LA INVENCION

- 30 La presente invención casi elimina los inconvenientes intermedios del HEx que se describen anteriormente. Los inconvenientes de los pasos de precalentamiento y los costes adicionales también pueden reducirse significativamente.

- 35 La presente invención está dirigida en particular a un proceso de digestión anaeróbica por fases de temperatura de lodos de aguas residuales, residuos orgánicos o cualquier tipo de material carbonoso, ya sea en continuo (TPAD) o por lotes (2PAD), donde el enfriamiento de los lodos aguas abajo del paso de hidrólisis biológica se realiza utilizando un paso de enfriamiento al vacío.

En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un proceso para el tratamiento de material carbonoso, como lodos de aguas residuales o residuos orgánicos, que comprende los pasos de:

- 40 (1) realizar un tratamiento térmico de dicho material carbonoso, proporcionando así material carbonoso tratado térmicamente,
- (2) enfriar dicho material carbonoso tratado térmicamente, proporcionando así material carbonoso enfriado y vapor recuperado, y
- (3) realizar un postratamiento de dicho material carbonoso enfriado,

en donde el enfriamiento del paso 2) se realiza utilizando un paso de enfriamiento al vacío.

Como se usa en el presente documento, un “material carbonoso” se entiende como una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, como la biomasa. En la invención, también puede denominarse “materia orgánica”. El material carbonoso es normalmente húmedo. Su contenido en sólidos secos está ventajosamente entre el 3 y el 25 %. Ejemplos de material carbonoso son los residuos y/o lodos orgánicos, y más particularmente los lodos de residuos orgánicos o de plantas de tratamiento de aguas potables o residuales. Normalmente, en la presente invención, el material carbonoso es un lodo, tal como un lodo de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos de lodos son los lodos municipales, lodos biológicos y lodos frescos o crudos.

Tal como se utiliza en el presente documento, se entiende por “enfriamiento al vacío” una evaporación al vacío, es decir a una presión inferior a la atmosférica. En general, se refiere a una técnica de enfriamiento rápido para evaporar agua de cualquier suspensión que contenga materia orgánica, como lodos o residuos orgánicos, en donde dicha evaporación se lleva a cabo al vacío. En algunos casos, se denomina “enfriamiento instantáneo” o “enfriamiento instantáneo al vacío”, ya que la evaporación es casi “instantánea”. El enfriamiento al vacío generalmente funciona a una presión absoluta que oscila entre 0,055 y 0,480 bar (es decir, entre 5 500 y 48 000 Pa), como entre 0,055 y 0,170 bar (es decir, entre 5 500 y 17 000 Pa), o entre 0,15 y 0,48 bar (es decir, entre 15 000 a 48 000 Pa).

En dicho paso de enfriamiento al vacío, se evapora parte del contenido de agua del lodo, produciéndose vapor a una temperatura determinada por la presión absoluta en el recipiente de enfriamiento al vacío, en adelante denominado “vapor recuperado”. En lo sucesivo, también se puede denominar “vapor instantáneo” o simplemente “vapor”. El vapor recuperado se distingue del “gas residual” o “gas no condensable”, que en este documento se entiende como gas producido aguas abajo de la unidad de enfriamiento, no condensado, por ejemplo, en un paso posterior de recuperación de calor (normalmente a una temperatura de entre 50° C y 80° C, y a una presión igual o cercana a la presión en el paso/unidad de enfriamiento al vacío, es decir, a una presión absoluta que oscila entre 0,055 y 0,48 bar (es decir, entre 5 500 y 48 000 Pa)). Los gases residuales comprenden generalmente o consisten esencialmente en N₂ (nitrógeno), H₂S (sulfuro de hidrógeno), CO₂ (dióxido de carbono), hidrocarburos ligeros (cadenas de hidrocarburos C₁-C₄ saturadas, lineales o ramificadas, en particular metano), y/o NH₃ (amoníaco).

De manera ventajosa, el material carbonoso tratado térmicamente (en particular, el lodo) se enfría (por ejemplo, a una temperatura de alrededor de 37° C) antes de ser almacenado temporalmente (normalmente mantenido en un tanque de almacenamiento intermedio) y/o sometido a un postratamiento.

Tal como se utiliza en el presente documento, se entiende que el “tratamiento térmico” del paso 1) comprende calentar el material carbonoso a 50° C o más, normalmente entre 50° C y 90° C. Ejemplos de tratamiento térmico comprenden hidrólisis térmica a baja temperatura (TH), hidrólisis biológica (BH, correspondiente al primer paso de una digestión anaeróbica por fases de temperatura), digestión anaeróbica termófila o pasteurización.

La “pasteurización” es bien conocida en el arte. Se suele entender como un proceso en el que un producto líquido se trata con calor suave, normalmente a una temperatura inferior a 100° C, ventajosamente entre 70° C y 75° C, para eliminar patógenos.

La digestión anaerobia es un proceso en el que intervienen microorganismos que descomponen el material carbonoso en ausencia de oxígeno. Este proceso produce un

digestato y una fracción gaseosa que comprende metano y, por lo general, consiste esencialmente en metano y CO₂, también llamado biogás. La digestión anaeróbica se suele llevar a cabo en condiciones de pH entre 7,0 y 7,5, preferiblemente entre 7,0 y 7,2.

La “digestión anaeróbica termófila” es bien conocida en el arte. Se trata de una digestión anaeróbica que normalmente se realiza a una temperatura de entre 50° C y 60° C.

La “hidrólisis térmica a baja temperatura”, abreviada como “TH”, es bien conocida en el arte. Tal como se utiliza en el presente documento, se entiende como un proceso que tiene como objetivo mejorar el rendimiento de la digestión y la deshidratabilidad del material carbonoso (comúnmente, lodos biológicos o mixtos) al descomponer las paredes celulares de las bacterias; en consecuencia, el contenido celular se vuelve fácilmente degradable anaeróbicamente.

En la Figura 1 se representa un proceso TH común del arte previo. En este proceso, el material carbonoso, generalmente lodo, preferiblemente con un contenido de sólido seco (DS) que oscila entre el 12 y el 22 %, se calienta a una temperatura de entre 140 y 165° C, normalmente durante 30 minutos. El lodo hidrolizado se enfría posteriormente en un tanque instantáneo antes de ser alimentado al digestor D, en donde se realiza la digestión anaerobia. Después de la hidrólisis, el lodo se diluye generalmente hasta aproximadamente un 10 % de contenido de materia seca antes de ser inyectado en el digestor: La mezcla es eficaz a pesar de esta alta concentración, ya que la hidrólisis térmica reduce la viscosidad del lodo. El biogás producido se recupera en un tanque T.

Las siguientes publicaciones divulgan más procesos TH:

- Barber, W. P. F. "Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review." Investigación del agua 104 (2016): 53-71.
- Sandino, Julián, et al. "Hidrólisis Térmica e Incineración de Lodos: Evaluación de su papel en la optimización de los perfiles energéticos en las instalaciones avanzadas de BNR". Actas de la Federación Ambiental del Agua 2018.18 (2018): 372-386.
- González, A., et al. "Pretratamientos para mejorar la biodegradabilidad de los lodos activados residuales: dilucidar el paso limitante de la velocidad". Avances biotecnológicos 36,5 (2018): 1434-1469.

La “hidrólisis biológica” (BH) es bien conocida en el arte. Tal como se utiliza en el presente documento, es el primer paso de la digestión anaeróbica por fases de temperatura (TPAD o 2PAD). Normalmente, BH es un paso de digestión termófila, ventajosamente operado a una temperatura de entre 50° C y 75° C (mientras que el segundo paso de una TPAD/2PAD es generalmente una digestión mesófila operada a una temperatura de entre 30-40° C, ventajosamente entre 35° C y 38° C). Las TPAD/2PAD del arte previo que incluyen un paso BH se describen, por ejemplo, en ES2430739, DK3008193 y KR100588166B1.

Las descripciones de los procesos TPAD/2PAD del estado de la técnica también se pueden encontrar en las siguientes publicaciones:

- <https://www.epa.gov/biosolids/examples-equivalent-processes-pfrp-and-psrp> (buscar 2PAD)
- Huyard, A., B. Ferran, and J-M. Audic. "The two phase anaerobic digestion process: sludge stabilization and pathogens reduction." Water Science and Technology 42.9 (2000): 41-47.
- Willis, John, and Perry Schafer. "Advances in thermophilic anaerobic digestion." Proceedings of the Water Environment Federation 2006.7 (2006): 5378-5392.

- Ge, Huoqing, Paul D. Jensen, and Damien J. Batstone. "Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge." *Water Research* 45.4 (2011): 1597-1606.
- 5 • Ge, Huoqing, Paul D. Jensen, and Damien J. Batstone. "Increased temperature in the thermophilic stage in temperature phased anaerobic digestion (TPAD) improves degradability of waste activated sludge." *Journal of Hazardous Materials* 187.1-3 (2011): 355-361.
- 10 • Ge, Huoqing, Paul D. Jensen, and Damien J. Batstone. "Pre-treatment mechanisms during thermophilic–mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge." *Water research* 44.1 (2010): 123-130.
- Watts, S., G. Hamilton, and J. Keller. "Two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge from a biological nutrient removal plant." *Water science and technology* 53.8 (2006): 149-157.
- 15 • Akgul, D., M. A. Cella, and C. Eskicioglu. "Temperature phased anaerobic digestion of municipal sewage sludge: a Bardenpho treatment plant study." *Water Practice and Technology* 11.3 (2016): 569-573.

Tal como se utiliza en el presente documento, el “postratamiento” del paso 3) puede comprender o ser un tratamiento mecánico y/o biológico. Un ejemplo de “tratamiento mecánico” es un paso de deshidratación. Tal como se utiliza en el presente documento, un “tratamiento biológico” se entiende como una acidogénesis termófila, una digestión aeróbica, una digestión anaeróbica o una fermentación.

La “fermentación” es un proceso bien conocido en el arte y puede definirse como un proceso anaeróbico biológico que extrae energía de los carbohidratos en ausencia de oxígeno para producir pequeñas moléculas (sustratos orgánicos), en particular glóbulos rojos, mediante la acción, en particular, de enzimas. No se produce CH₄, o solo cantidades mínimas. Hay cinco tipos principales de fermentación:

- Fermentación alcohólica, en donde se produce principalmente etanol,
- Fermentación de ácido láctico,
- Fermentación con ácido propiónico, en donde se produce propionato,
- 30 • Fermentación de ácido butírico/butanol, en donde se produce butirato y butanol,
- Fermentación ácida mixta, en donde se produce VFA (principalmente acetato, pero también propionato, lactato, butirato).

El proceso de fermentación puede controlarse mediante el tiempo de retención del lodo en el tanque anaeróbico, la temperatura y el pH en el tanque anaeróbico, así como por la población microbiana específica involucrada en el proceso de fermentación (es decir, por la elección de cepas microbianas en el tanque anaeróbico).

En una realización preferida, el proceso comprende además un paso de precalentamiento del material carbonoso con el vapor recuperado del paso 2).

En una realización preferida, el precalentamiento del material carbonoso (como el lodo crudo) que entra en el paso 1) del tratamiento térmico se lleva a cabo por contacto directo del vapor recuperado que se produce en el paso 2) de enfriamiento al vacío con el material carbonoso. De manera alternativa, se puede realizar por inyección directa del vapor recuperado que se produce en el paso (2) de enfriamiento instantáneo, en el material carbonoso (como el lodo crudo).

En otra realización preferida, el vapor recuperado del paso 2) se pone en contacto directamente con el material carbonoso (lodos crudos) aguas arriba del paso 1) del tratamiento térmico. En consecuencia, el material carbonoso (lodo crudo) se dirige primero a un recipiente de recuperación de calor en donde dicho lodo está en contacto con el vapor recuperado que

se produce en el paso de enfriamiento al vacío. Posteriormente, el lodo entra en un reactor de una primera unidad donde se somete a un tratamiento biológico termófilo o a un tratamiento mecánico.

En una realización particular, el proceso según la invención comprende los pasos de

- 5 (1) Realizar un primer tratamiento térmico de lodos de aguas residuales o materia orgánica o cualquier material carbonoso, a una temperatura T_1 entre 50 y 90° C, preferiblemente entre 50° C y 75° C, produciendo así material carbonoso tratado térmicamente,
- 10 (2) Enfriar dicho material carbonoso resultante que se trató térmicamente aguas abajo del paso (1) a una temperatura T_2 (T_2 menor que T_1) de entre 34-75° C en una unidad de enfriamiento (enfriador instantáneo) que opera al vacío (operando normalmente de 0,055 a 0,170 bar (presión absoluta, es decir, 5 500 a 17 000 Pa), produciendo así material carbonoso enfriado,
- (3) Realizar un postratamiento de dicho material carbonoso enfriado.

- 15 El tratamiento térmico del paso (1) puede ser una pasteurización, un tratamiento biológico termófilo y/o una hidrólisis térmica a baja temperatura.

- 20 El postratamiento del paso (3) puede ser cualquier tratamiento adecuado. Este postratamiento puede ser un tratamiento mecánico como un proceso de deshidratación, almacenamiento temporal. También puede ser un tratamiento anaeróbico, como una fermentación o una digestión anaeróbica. Dicha digestión anaeróbica puede ser una digestión en dos etapas o una digestión mesófila.

- 25 En una realización particular, el tratamiento térmico del paso (1) es una pasteurización o una hidrólisis térmica a baja temperatura, preferiblemente una pasteurización. En tal caso, el postratamiento comprende ventajosamente o es un tratamiento anaeróbico, tal como una fermentación o una digestión anaeróbica. Dicha digestión anaeróbica puede ser una digestión en dos etapas o una digestión mesófila.

El paso (2) se puede realizar en un solo paso o en varios subpasos. En otras palabras, el paso de enfriamiento al vacío puede comprender varias etapas de enfriamiento.

En esta variante, el proceso de la invención comprende normalmente:

- 30 (1) Realizar un primer tratamiento térmico del material carbonoso, a una temperatura T_1 de entre 50 y 90° C, preferiblemente entre 50° C y 75° C, proporcionando así material carbonoso tratado térmicamente,
- 35 (2) a) Enfriar dicho material carbonoso resultante que se trató térmicamente aguas abajo del paso (1) a una temperatura intermedia T_{2a} (T_{2a} menor que T_1) de entre 50° C y 80° C en una unidad de enfriamiento (enfriador instantáneo) que opera al vacío (operando normalmente de 0,15 a 0,48 bar (presión absoluta, es decir, de 15 000 a 48 000 Pa), produciendo así material carbonoso enfriado intermedio,
- 40 (2) b) Enfriar dicho material carbonoso enfriado intermedio aguas abajo del paso 2a) a una temperatura final T_{2b} (T_{2b} menor que T_{2a}) de entre 34° C y 47° C en una unidad de enfriamiento (enfriador instantáneo) que opera al vacío (operando normalmente de 0,05 a 0,1 bar (presión absoluta), es decir, de 5 000 a 10 000 Pa), y preferiblemente de 0,055 a 0,17 bar (presión absoluta), es decir, de 5 500 a 17 000 Pa), produciendo así material carbonoso enfriado,
- (3) Realizar un postratamiento del material carbonoso enfriado.

La temperatura de enfriamiento T_{2a} del paso (2a) es preferiblemente alrededor de 50° C cuando el paso (1) se lleva a cabo a 55-60° C, alrededor de 65° C cuando el paso (1) se lleva a cabo a 70-75° C y alrededor de 80° C cuando el paso (1) se lleva a cabo a 85° C – 90° C.

- 5 En esta variante, el paso (1) es preferiblemente un paso de pasteurización. En tal caso, el postratamiento es preferiblemente un tratamiento anaeróbico, tal como una fermentación o una digestión anaeróbica. Dicha digestión anaeróbica puede ser una digestión en dos etapas o una digestión mesófila.

En una realización particular, el proceso según la invención comprende los pasos de

- 10 (1) Realizar un primer tratamiento biológico termófilo de lodos de aguas residuales o materia orgánica o cualquier material carbonoso, a una temperatura entre 50 y 75° C,
 (2) Enfriar el lodo hidrolizado o la materia orgánica o el material carbonoso resultante aguas abajo de la primera etapa desde 50-75° C hasta 35-42° C en un enfriador instantáneo que opera al vacío (que opera normalmente de 0,05 a 0,1 bar (presión absoluta, es decir, de 5000 a 10.000 Pa), preferiblemente de 0,055 a 0,17 bar,
 15 produciendo así lodos enfriados,
 (3) Realizar un postratamiento de los lodos enfriados.

- 20 Cuando el postratamiento del material carbonoso enfriado e hidrolizado resultante tal como lodo (es decir, el material carbonoso producido en el paso (2)) es un paso de digestión mesófila, se realiza ventajosamente en un segundo reactor a 35-42° C.

El vapor recuperado que se produce en el paso (2), a baja presión y baja temperatura, puede condensarse en otras operaciones unitarias.

- 25 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a una instalación para implementar dicho proceso y una unidad de enfriamiento instantáneo diseñada para implementar dicho proceso.

La nueva instalación está diseñada para que:

- 30 • La viscosidad del material carbonoso (especialmente el lodo) no influya en el diseño del sistema,
 • La sedimentación de arena no influya en el diseño del sistema,
 • La temperatura del material carbonoso crudo (especialmente los lodos) no influya en el diseño del sistema,
 • La pérdida de carga generada sea insignificante en comparación con un intercambiador de calor,
 • El mantenimiento se reduzca significativamente.

- 35 La invención se refiere por tanto a una instalación que comprende:

- 40 ○ al menos una unidad de tratamiento térmico (1) para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C,
 ○ al menos una unidad de enfriamiento al vacío (2) aguas abajo de la unidad de tratamiento térmico para enfriar el material carbonoso, y
 ○ al menos una unidad de postratamiento (3), aguas abajo de la unidad de enfriamiento al vacío (2), para el postratamiento del material carbonoso enfriado.

En una realización, una instalación según la invención comprende:

- Una primera unidad con uno o múltiples reactores en donde se realiza un tratamiento térmico como el tratamiento biológico termófilo de lodos/materia orgánica entre 50 y

90° C, preferiblemente entre 50 y 75° C. Esta unidad se puede segmentar en múltiples subunidades en serie o funcionar como un tanque.

- Una unidad de enfriamiento al vacío aguas abajo de la primera o las primeras unidades de tratamiento térmico,
- 5 • Una segunda o múltiples unidades para el postratamiento aguas abajo de la unidad de enfriamiento al vacío.

Por lo tanto, la instalación puede comprender:

- una unidad de tratamiento térmico para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C, que tiene una primera entrada I_1 y una primera salida O_1 , en donde dicha unidad de tratamiento térmico está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_1 con material carbonoso y producir un material carbonoso tratado térmicamente, recuperado en la primera salida O_1 ,
- 10 • una unidad de enfriamiento al vacío que tiene una primera entrada I_2 y una primera salida O_2 y, opcionalmente, una segunda salida O_2' , en donde dicha primera entrada I_2 está en conexión fluida con la primera salida O_1 de la unidad de tratamiento térmico, en donde dicha unidad de enfriamiento al vacío está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_2 con dicho material carbonoso tratado térmicamente y producir material carbonoso enfriado recuperado en la primera salida O_2 y, opcionalmente, vapor recuperado en la segunda salida O_2' ,
- 15 • una unidad de postratamiento, que tiene una primera entrada I_3 y una primera salida O_3 , en donde dicha primera entrada I_3 está en conexión fluida con la primera salida O_2 de la unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicha unidad de postratamiento está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_3 con dicho material carbonoso enfriado y producir material carbonoso postratado recuperado en la primera salida O_3 .
- 20 Tal como se utiliza en el presente documento, una “unidad de tratamiento térmico” se entiende como una unidad adecuada para realizar un tratamiento térmico de material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C. La unidad de tratamiento térmico puede ser una unidad TH, una unidad BH, un digestor anaeróbico termófilo o una unidad de pasteurización.
- 25 Tal como se utiliza en el presente documento, una “unidad de enfriamiento al vacío” se entiende como una unidad adecuada para realizar la evaporación al vacío, es decir, a una presión por debajo de la presión atmosférica, normalmente que opera a una presión absoluta que oscila entre 0,055 y 0,480 bar (es decir, 5 500 a 48 000 Pa), como de 0,055 a 0,170 bar (es decir, de 5 500 a 17 000 Pa), o de 0,15 a 0,48 bar (es decir, de 15 000 a 48 000 Pa).
- 30 Tal como se utiliza en el presente documento, una “unidad de tratamiento posterior” o una “unidad de postratamiento” se entiende como una unidad adecuada para realizar un tratamiento biológico adicional o un tratamiento mecánico. En una realización preferida, el paso de postratamiento comprende un tratamiento biológico adicional, en particular un paso de digestión mesófila.
- 35 De manera ventajosa, la instalación incluye además un recipiente de recuperación de calor aguas abajo de la unidad de enfriamiento al vacío. En otras palabras, la instalación comprende además de manera ventajosa:
 - un recipiente de recuperación de calor, que tiene una primera entrada I_4 , una primera salida O_4 y una segunda salida O_4' , en donde dicha primera entrada I_4 está en conexión fluida con la segunda salida O_2' de la unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicho recipiente de recuperación de calor está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_4 con dicho vapor recuperado, en donde dicho vapor recuperado se pone en contacto posteriormente con
- 40 un recipiente de recuperación de calor, que tiene una primera entrada I_4 , una primera salida O_4 y una segunda salida O_4' , en donde dicha primera entrada I_4 está en conexión fluida con la segunda salida O_2' de la unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicho recipiente de recuperación de calor está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_4 con dicho vapor recuperado, en donde dicho vapor recuperado se pone en contacto posteriormente con
- 45 un recipiente de recuperación de calor, que tiene una primera entrada I_4 , una primera salida O_4 y una segunda salida O_4' , en donde dicha primera entrada I_4 está en conexión fluida con la segunda salida O_2' de la unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicho recipiente de recuperación de calor está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_4 con dicho vapor recuperado, en donde dicho vapor recuperado se pone en contacto posteriormente con

material carbonoso (o materia orgánica fresca) en el recipiente, para producir material carbonoso precalentado recuperado en la primera salida O_4 , y además recuperar vapor recuperado en la segunda salida. De manera ventajosa, dicha salida O_4 de dicho recipiente de recuperación de calor está en conexión fluida con la entrada. Alternativamente, dicha

5 unidad de tratamiento térmico comprende una segunda entrada I_1 , y dicha salida O_4 de dicho recipiente de recuperación de calor está en conexión fluida con la entrada I_1 , en donde dicha unidad de tratamiento térmico está configurada para ser alimentada con dicho material carbonoso precalentado.

De manera ventajosa, la instalación comprende además un recipiente de recuperación de calor aguas arriba de la unidad de tratamiento térmico para poner en contacto el material carbonoso con el vapor recuperado.

10

De manera ventajosa, la instalación comprende además un condensador que tiene una primera entrada I_{Hex} , una primera salida O_{Hex} y una segunda salida $O_{Hex'}$ (no se muestra), en donde dicha primera entrada I_{Hex} está en conexión fluida con la segunda salida O_4 del

15 recipiente de recuperación de calor, en donde dicho condensador está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_{Hex} con dicho vapor recuperado y producir gas residual recuperado en la primera salida O_{Hex} , y líquido condensado (generalmente agua de proceso) recuperado en la segunda salida $O_{Hex'}$. Dicho condensador es preferiblemente un intercambiador de calor directo o indirecto.

En una variante, la instalación comprende además un segundo recipiente de recuperación de calor aguas abajo del primer recipiente de recuperación de calor y aguas arriba de la unidad de tratamiento térmico.

20

En una realización particular, la primera unidad o unidad de tratamiento térmico es un reactor apto para la digestión termófila. En esta variante, la segunda unidad o unidad de postratamiento es preferiblemente un reactor apto para la digestión mesófila.

25

En una realización particular, la unidad de enfriamiento al vacío comprende dos unidades de enfriamiento al vacío instaladas en serie. En otras palabras, la unidad de enfriamiento al vacío es una unidad de enfriamiento al vacío de dos etapas. En esta realización, el material carbonoso tratado se dirige desde la unidad de tratamiento térmico a una primera unidad de enfriamiento, luego el material carbonoso enfriado de la primera unidad de enfriamiento se enfría aún más en una segunda unidad de enfriamiento y se dirige hacia la unidad de postratamiento.

30

En esta realización, la instalación comprende, por tanto:

- una unidad de tratamiento térmico para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C, que tiene una primera entrada I_1 y una primera salida O_1 , en donde dicha unidad de tratamiento térmico está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_1 con material carbonoso y producir un material carbonoso tratado térmicamente, recuperado en la primera salida O_1 ,

35

- una primera unidad de enfriamiento al vacío que tiene una primera entrada I_{2a} y una primera salida O_{2a} y, opcionalmente, una segunda salida $O_{2a'}$, en donde dicha primera entrada I_{2a} está en conexión fluida con la primera salida O_1 de la unidad de tratamiento térmico, en donde dicha unidad de enfriamiento al vacío está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_{2a} con dicho material carbonoso tratado térmicamente y producir material carbonoso enfriado intermedio recuperado en la primera salida O_{2a} y, opcionalmente, vapor recuperado en la segunda salida $O_{2a'}$,

40

45

- una segunda unidad de enfriamiento al vacío que tiene una primera entrada I_{2b} y una primera salida O_{2b} y, opcionalmente, una segunda salida $O_{2b'}$, en donde dicha primera entrada

I_{2b} está en conexión fluida con la primera salida O_{2a} de la primera unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicha segunda unidad de enfriamiento al vacío está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_{2b} con dicho material carbonoso enfriado intermedio y producir material carbonoso enfriado recuperado en la primera salida O_{2b} y, opcionalmente,

- 5 vapor recuperado en la segunda salida $O_{2b'}$, y
- una unidad de postratamiento, que tiene una primera entrada I_3 y una primera salida O_3 , en donde dicha primera entrada I_{pt} está en conexión fluida con la primera salida O_{2b} de la segunda unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicha unidad de postratamiento está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_3 con dicho material carbonoso
- 10 enfriado y producir material carbonoso postratado recuperado en la primera salida O_3 .

En esta realización, el vapor recuperado que se produce en la primera y segunda unidad de enfriamiento se condensa en uno o varios condensadores. Dicho condensador puede ser un intercambiador de calor Hex directo o indirecto (más concretamente un intercambiador de calor agua/vapor Hex).

- 15 Un “intercambiador de calor” es conocido en el arte: es un sistema utilizado para transferir calor entre dos o más fluidos (al menos un fluido frío y un fluido caliente), que puede usarse tanto en procesos de enfriamiento como de calentamiento. Los fluidos pueden estar separados por una pared sólida para evitar que se mezclen (intercambiador de calor indirecto) o pueden estar en contacto directo (intercambiador de calor directo). En la invención, se
- 20 utilizan intercambiadores de calor para enfriar el vapor recuperado. El fluido frío suele ser agua de proceso, mientras que el fluido caliente es vapor.

El vapor producido en la segunda unidad de enfriamiento puede recuperarse y dirigirse a un segundo recipiente de recuperación de calor en donde el vapor se pone en contacto con material carbonoso (preferiblemente materia orgánica fresca), produciendo así un primer

25 material carbonoso precalentado, en donde dicho primer material carbonoso precalentado es enviado posteriormente a la segunda unidad de recuperación de calor, en donde el primer material carbonoso precalentado se pone en contacto con el vapor recuperado de la primera unidad de enfriamiento.

De manera ventajosa, el vapor producido en la primera unidad de enfriamiento se recupera y se envía a un recipiente de recuperación de calor en donde el vapor se pone en contacto con material carbonoso (preferiblemente materia orgánica fresca).

30

En una realización particular, una instalación según la invención comprende:

- Una primera unidad con una o múltiples subunidades (reactor) en donde se realiza un tratamiento térmico como el tratamiento biológico termófilo de lodos/materia orgánica
- 35 entre 50 y 90° C, preferiblemente entre 50 y 75° C. Esta unidad se puede segmentar en múltiples subunidades (reactores) en serie o funcionar como un tanque (reactor).
- Una unidad de enfriamiento al vacío aguas abajo de la primera unidad térmica,
 - Una segunda unidad en una o múltiples subunidades para el postratamiento aguas abajo de la unidad de enfriamiento al vacío.

40 Una instalación según la invención también puede incluir:

- Un tanque de retención que contenga (lodos primarios, mixtos o biológicos frescos/materia orgánica o cualquier materia carbónica a tratar) delante del primer reactor. Como alternativa, la materia orgánica fácilmente degradable (material carbonoso) se puede enviar directamente a la unidad de postratamiento mientras que el lodo se procesa primero en el primer reactor.
- 45

- Un intercambiador de calor tanto en la primera unidad como en la segunda unidad (o únicamente en la primera unidad de tratamiento térmico) para mantener la temperatura del material carbonoso en el punto de referencia requerido.

5

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La presente invención se ilustra con más detalle en las siguientes figuras en las que:

10 La Figura 1 ilustra un pretratamiento de hidrólisis implementado aguas arriba de un digestor mesófilo de lodos de aguas residuales del estado de la técnica;

La Figura 2 ilustra el proceso de digestión anaeróbica por fases de temperatura (TPAD) de lodos de aguas residuales del estado de la técnica;

La Figura 3 ilustra una instalación para realizar un proceso de digestión anaeróbica por fases de temperatura (TPAD) de lodos de aguas residuales según la invención;

15 La Figura 4 representa una instalación para implementar un proceso de tratamiento de lodos de aguas residuales según la invención;

La Figura 5 representa una instalación para implementar un proceso de tratamiento de lodos de aguas residuales según una realización de la invención;

20 La Figura 6 representa una instalación para implementar un proceso de tratamiento de lodos de aguas residuales según una realización de la invención;

La Figura 7 representa una instalación para implementar un proceso de tratamiento de lodos de aguas residuales según una realización de la invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

25

Según la invención, el proceso se realiza en una instalación que comprende un primer reactor 1 en donde se realiza un tratamiento térmico para tratar lodos municipales, materia orgánica o cualquier material carbonoso procedente de un depósito de retención 1a. A continuación, la materia orgánica caliente se enfría en una unidad de enfriamiento al vacío 2 aguas abajo del reactor térmico 1 antes de entrar en un segundo reactor 3 en donde la materia orgánica enfriada puede tratarse mediante un postratamiento como la digestión anaeróbica.

30

En otras palabras, la instalación de la Figura 3 que comprende:

- al menos una unidad de tratamiento térmico (1) para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C,
- 35 ○ al menos una unidad de enfriamiento al vacío (2) aguas abajo de la unidad de tratamiento térmico para enfriar el material carbonoso, y
- al menos una unidad de postratamiento (3), aguas abajo de la unidad de enfriamiento al vacío (2), para el postratamiento del material carbonoso enfriado.

40 Más concretamente, la instalación de la Figura 3 comprende:

- una unidad de tratamiento térmico (1) para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C, que tiene una primera entrada I₁ y una primera salida O₁, en donde dicha unidad de tratamiento térmico está configurada para ser alimentada en la primera entrada I₁ con material carbonoso y producir un material carbonoso tratado térmicamente (TL2), recuperado en la primera salida O₁,
- 45

- una unidad de enfriamiento al vacío (2) que tiene una primera entrada I_2 y una primera salida O_2 y, opcionalmente, una segunda salida O_2' , en donde dicha primera entrada I_2 está en conexión fluida con la primera salida O_1 de la unidad de tratamiento térmico, en donde dicha unidad de enfriamiento al vacío (2) está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_2 con dicho material carbonoso tratado térmicamente (TL2) y producir material carbonoso enfriado (TL3) recuperado en la primera salida O_2 y, opcionalmente, vapor recuperado (SL1) en la segunda salida O_2' ,
- una unidad de postratamiento (3), que tiene una primera entrada I_3 y una primera salida O_3 , en donde dicha primera entrada I_3 está en conexión fluida con la primera salida O_2 de la unidad de enfriamiento al vacío (2), en donde dicha unidad de postratamiento (3) está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_3 con dicho material carbonoso enfriado (TL3) y producir material carbonoso postratado recuperado en la primera salida O_3 .

En una variante preferida de la primera realización, el vapor producido en la etapa de enfriamiento es preferiblemente puesto en contacto por una línea de corriente SL1 con el lodo crudo en un reactor 4 ubicado aguas arriba del reactor 1 de la primera unidad (véase Figura 3). El contacto se puede realizar utilizando una torre de contacto directo a contracorriente o cualquier otro medio de forma que se tenga una pérdida de carga limitada del vapor mientras se mantiene un contacto máximo entre el lodo crudo y el vapor para maximizar la condensación. Como alternativa, el vapor producido del paso de enfriamiento al vacío (2) producido en la unidad 2 puede ser devuelto (SL2) al reactor 1 para precalentar este último (inyección directa en el reactor 1).

El biogás producido en los reactores 1, 3 de la primera y segunda unidad puede ser enviado respectivamente por una línea de biogás BL3, BL4 a una unidad de recuperación de biogás 5, normalmente una unidad CHP (calor y energía combinados). El calor puede recuperarse de la unidad de recuperación de biogás 5 y enviarse al reactor 1 por una línea de calor HL.

Como otra alternativa, se puede usar un intercambiador de calor HEx en el vapor producido para calentar el lodo crudo (primario, mixto o biológico) (menos preferido).

Si no resulta económico inyectar todo el caudal de vapor en el reactor 1 de la primera unidad, o del tanque de retención 1a, o del intercambiador de calor, parte del vapor se puede condensar en un condensador mientras que el resto se envía a precalentamiento del lodo entrante (véase Figura 4).

La instalación de la figura 4 comprende, además:

- un recipiente de recuperación de calor (4), que tiene una primera entrada I_4 , una primera salida O_4 y una segunda salida O_4' , en donde dicha primera entrada I_4 está en conexión fluida con la segunda salida O_2' de la unidad de enfriamiento al vacío (2), en donde dicho recipiente de recuperación de calor (4) está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_4 con dicho vapor recuperado (SL1), en donde dicho vapor recuperado (SL1) se pone en contacto posteriormente con material carbonoso (o materia orgánica fresca) (TL1) en el recipiente (4), para producir material carbonoso precalentado (TL1') recuperado en la primera salida O_4 , y además recuperar vapor SL3 recuperado en la segunda salida O_4' . De manera ventajosa, dicha salida O_4 de dicho recipiente de recuperación de calor (4) está en conexión fluida con la entrada I_1 . Alternativamente, dicha unidad de tratamiento térmico (1) comprende una segunda entrada I_1' , y dicha salida O_4 de dicho recipiente de recuperación de calor (4) está en conexión fluida con la entrada I_1' , en donde dicha unidad de tratamiento térmico (1) está configurada para ser alimentada con dicho material carbonoso precalentado.(TL1').

- De manera ventajosa, la instalación de la Figura 4 comprende además un condensador Hex que tiene una primera entrada I_{Hex} , una primera salida O_{Hex} y una segunda salida $O_{Hex'}$ (no se muestra), en donde dicha primera entrada I_{Hex} está en conexión fluida con la segunda salida O_4 del recipiente de recuperación de calor (4), en donde dicho condensador Hex está configurado para ser alimentado en la primera entrada I_{Hex} con dicho vapor recuperado SL3 y producir gas residual recuperado en la primera salida O_{Hex} , y líquido condensado (generalmente agua de proceso) recuperado en la segunda salida $O_{Hex'}$. Dicho condensador es preferiblemente un intercambiador de calor directo o indirecto.
- 5 Esta reinyección de baja presión y vapor recuperado a temperatura permite que se caliente el material carbonoso (según el paso 1, puede ser lodo primario, mixto o biológico), desde una temperatura de 10 a 20° C hasta una temperatura de 20 a 45° C (normalmente entre 30° C y 40° C, por ejemplo, entre 30° C y 35° C), lo que conduce a un ahorro de energía global en el proceso.
- 10 El vapor recuperado del paso (2) está a una presión entre 0,055 a 0,480 bar (presión absoluta), es decir, 5 500 a 48 000 Pa). Gracias a una bomba de vacío (es decir, una bomba de vacío de membrana) ubicada aguas abajo de la unidad de enfriamiento (enfriador instantáneo), dicho vapor instantáneo recuperado puede ponerse en contacto con el material carbonoso (que puede ser un lodo primario/mixto/biológico). Debido al bajo contenido en sólidos de dichos lodos (entre 3 y 25 % en masa, en particular entre 3 y 8 % en masa), dicho contacto es posible sin ningún otro dispositivo intermedio.
- 15
- 20

Como se ilustra en la Figura 4, en una variante de realización, el proceso comprende los pasos de:

- 25 (1a) poner en contacto el lodo de aguas residuales o la materia orgánica o cualquier material carbonoso emitido desde el tanque de almacenamiento 1a en un recipiente de recuperación de calor 4 con el vapor recuperado SL1 de un paso de enfriamiento (2) aguas abajo del reactor 1 de la primera unidad en donde se realiza un tratamiento térmico o bien se realiza un tratamiento biológico termófilo de lodo/materia orgánica/material carbonoso entre 50 y 90° C, preferiblemente entre 50° C y 75° C, o bien un tratamiento mecánico de lodo/materia orgánica (material carbonoso);
- 30 (1) someter el lodo/materia orgánica/material carbonoso precalentado en el paso anterior a un tratamiento térmico, por ejemplo, un tratamiento biológico termófilo entre 50-90° C en el reactor 1 de la primera unidad;
- 35 (2) enfriar el lodo o la materia orgánica o el material carbonoso resultante aguas abajo de la primera unidad de 50-90° C a 35-42° C en una unidad de enfriamiento al vacío 2 que opera al vacío (bomba de vacío VP) (que normalmente opera de 0,05 a 0,1 bar (presión absoluta), es decir, de 5000 a 10 000 Pa), preferiblemente de 0,055 a 0,17 bar, produciendo así material carbonoso enfriado;
- 40 (3) realizar un postratamiento del lodo/materia orgánica/material carbonoso enfriado en un reactor 3 de la segunda unidad.

- El vapor recuperado (SL1) de la unidad de enfriamiento 2 se envía a un recipiente de recuperación de calor 4. Como resultado, el vapor recuperado (SL1) se condensa al menos parcialmente en el recipiente 4. El gas residual (SL2) se envía a una bomba de vacío para ser evacuado de la instalación o tratado posteriormente.
- 45

Dicha realización se ilustra en las Figuras 4 y 5.

Si en el recipiente de recuperación de calor 4, el contacto entre el material carbonoso (más específicamente lodo fresco) y el vapor recuperado es directo, se puede realizar entonces un

paso de reducción de la espuma, como por ejemplo una reducción mecánica de la espuma como la recirculación del lodo en el recipiente o una reducción química de la espuma como la inyección de un producto antiespumante.

5 En otra realización (no se muestra), una primera parte del vapor recuperado SL1 se devuelve ventajosamente al reactor 1 de la unidad de tratamiento térmico para precalentar este último (inyección directa en el reactor 1) y una segunda parte (SL2) se envía al recipiente de recuperación de calor 4 para calentar el lodo fresco (véase Figura 4).

10 En la Figura 5, se ilustra un paso de enfriamiento al vacío con un número mínimo de subunidades/elementos. Este tipo de instalación puede presentar un tamaño mínimo con un paso mínimo de precalentamiento. El paso de enfriamiento se realiza en un solo paso, por lo que la temperatura del vapor será igual a la temperatura del lodo en el enfriador al vacío, que es la temperatura más baja alcanzable con este sistema.

15 El material carbonoso se dirige en la línea de tratamiento TL1 al recipiente de calor de recuperación 4 para ponerse en contacto con el vapor. El material carbonoso precalentado se puede mantener opcionalmente en un tanque de retención 1b. El material carbonoso se dirige hacia el reactor 1 de la primera unidad a través de la línea de tratamiento TL1" para ser tratado térmica o mecánicamente. Los productos no condensables pueden procesarse en otro u otros pasos de tratamiento, como una unidad de tratamiento de olores.

20 El material carbonoso caliente se dirige desde el reactor 1 de la primera unidad a través de TL2 a la unidad de enfriamiento al vacío 2. Posteriormente, la materia enfriada es enviada por TL3 al reactor 3 de la segunda unidad que puede ser un tanque de digestión anaeróbica 3. El vapor recuperado de la unidad de enfriamiento 2 es dirigido por SL1 al recipiente de la unidad de recuperación de calor 4 para realizar el precalentamiento del material carbonoso crudo.

25 El exceso de vapor en el recipiente 4 puede ser dirigido por SL3 a un condensador HEx y los productos no condensables pueden ser enviados por una línea no condensable a una recuperación de biogás o a un paso de tratamiento adicional. El condensador Hex puede ser un condensador directo o indirecto como un contactor.

30 En la Figura 6, la instalación ilustrada propone unidades de enfriamiento al vacío de dos subpasos con una máxima recuperación de calor en el caso de disponibilidad limitada de fluido refrigerante (como agua de proceso).

35 En consecuencia, la instalación proporciona dos unidades de enfriamiento 2a, 2b instaladas en serie.

40 La materia orgánica tratada en el primer reactor 1 se enfría en una primera unidad de enfriamiento 2a y posteriormente en una segunda unidad de enfriamiento 2b. El vapor producido en la segunda unidad de enfriamiento 2b se recupera y se envía (SL1b) a un recipiente de recuperación de calor 4b en donde el vapor se pone en contacto con materia orgánica fresca. La materia orgánica precalentada es luego enviada por TL1' a una segunda unidad de recuperación de calor 4a en donde la primera materia orgánica precalentada se pone en contacto con el vapor recuperado (SL1a) de la primera unidad de enfriamiento 2a. En consecuencia, la materia orgánica es precalentada primero por el vapor recuperado más frío y posteriormente por el vapor recuperado más caliente. Estos dos pasos de precalentamiento de la materia orgánica permiten mejorar las propiedades reológicas de la materia orgánica ya que la materia orgánica se diluye y se precalienta antes del segundo paso de precalentamiento.

50 Eso evita la necesidad de agua de enfriamiento para condensar el vapor producido en el segundo subpaso de enfriamiento al vacío, en donde el vapor es condensado en la materia orgánica. El condensador puede ser opcional ya que todo el vapor puede consumirse en el paso de precalentamiento, evitando la necesidad de agua y también de un condensador.

- En ese ejemplo de instalación, el vapor recuperado (SL3a, SL3b) producido por las dos unidades de enfriamiento al vacío puede condensarse en el condensador HEx. En las figuras se representan dos condensadores HEx pero la condensación se puede realizar en un condensador. El condensador Hex puede ser un condensador directo o indirecto, como un contactor. Todas las materias no condensables pueden entonces ser tratadas en pasos de tratamiento posteriores, como la línea de tratamiento de olores, o evacuadas a la atmósfera o unidas al biogás producido en el postratamiento.
- 10 La instalación de la Figura 6 comprende:
- una unidad de tratamiento térmico para tratar térmicamente material carbonoso a una temperatura de entre 50-90° C, preferiblemente 50-75° C, que tiene una primera entrada I_1 y una primera salida O_1 , en donde dicha unidad de tratamiento térmico está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_1 con material carbonoso y producir un material carbonoso tratado térmicamente (TL2), recuperado en la primera salida O_1 ,
 - 15 • una primera unidad de enfriamiento al vacío (2a) que tiene una primera entrada I_{2a} y una primera salida O_{2a} y, opcionalmente, una segunda salida $O_{2a'}$, en donde dicha primera entrada I_{2a} está en conexión fluida con la primera salida O_{1t} de la unidad de tratamiento térmico, en donde dicha unidad de enfriamiento al vacío (2a) está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_{2a} con dicho material carbonoso tratado térmicamente (TL2) y producir material carbonoso enfriado intermedio (TL2') recuperado en la primera salida O_{2a} y, opcionalmente, vapor recuperado (SL1a) en la segunda salida $O_{2a'}$,
 - 20 • una segunda unidad de enfriamiento al vacío (2b) que tiene una primera entrada I_{2b} y una primera salida O_{2b} y, opcionalmente, una segunda salida $O_{2b'}$, en donde dicha primera entrada I_{2b} está en conexión fluida con la primera salida O_{2a} de la primera unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicha segunda unidad de enfriamiento al vacío (2b) está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_{2b} con dicho material carbonoso enfriado intermedio (TL2') y producir material carbonoso enfriado (TL3) recuperado en la primera salida O_{2b} y, opcionalmente, vapor recuperado (SL3b) en la segunda salida $O_{2b'}$, y
 - 25 • una unidad de postratamiento (3), que tiene una primera entrada I_3 y una primera salida O_3 , en donde dicha primera entrada I_3 está en conexión fluida con la primera salida O_{2b} de la segunda unidad de enfriamiento al vacío, en donde dicha unidad de postratamiento (3) está configurada para ser alimentada en la primera entrada I_3 con dicho material carbonoso enfriado y producir material carbonoso postratado recuperado en la primera salida O_3 .
- 30 En esta realización, el vapor recuperado que se produce en la primera y segunda unidad de enfriamiento (SL3a y SL3b) se condensa en uno o varios condensadores. Dicho condensador puede ser un intercambiador de calor Hex directo o indirecto (más concretamente un intercambiador de calor agua/vapor Hex).
- El vapor producido en la segunda unidad de enfriamiento (2b) puede recuperarse y dirigirse al recipiente de recuperación de calor (4b) en donde el vapor se pone en contacto con material carbonoso (preferiblemente materia orgánica fresca), produciendo así un primer material carbonoso precalentado, en donde dicho primer material carbonoso precalentado es enviado posteriormente a la segunda unidad de recuperación de calor (4a), en donde el primer material carbonoso precalentado se pone en contacto con el vapor recuperado (SL1a) de la primera
- 40 unidad de enfriamiento (2a).
- De manera ventajosa, el vapor producido en la primera unidad de enfriamiento (2a) se recupera y se envía a un recipiente de recuperación de calor (4) en donde el vapor se pone en contacto con material carbonoso (preferiblemente materia orgánica fresca).
- 45

El proceso permite una máxima recuperación de energía con un flujo muy viscoso de materia orgánica seca, muy concentrada en materia seca y/o una instalación en la que la disponibilidad de agua de enfriamiento es limitada.

- 5 En la Figura 7, la instalación ilustrada proporciona un equilibrio entre optimizar la recuperación de calor y minimizar el número de subunidades/elementos de dicha instalación. Esta instalación se puede considerar cuando el agua de enfriamiento está disponible y el flujo de materia orgánica es fácil de precalentar.
- 10 En consecuencia, la instalación proporciona también dos unidades de enfriamiento al vacío 2a, 2b instaladas en serie, pero la materia orgánica tratada que sale del reactor 1 es enfriada por la primera unidad de enfriamiento 2a y el vapor recuperado (SL1a) de esta unidad 2a se utiliza en un recipiente de recuperación de calor 4 para precalentar la materia orgánica antes del reactor 1.
- 15 La materia orgánica enfriada se enfría posteriormente por segunda vez en la unidad de enfriamiento 2b antes de ser dirigida TL3 hacia el segundo reactor 3 para el postratamiento. El exceso de vapor producido en la primera y segunda unidad de enfriamiento se condensa SL3a y SL3b en un condensador tipo intercambiador de calor agua/vapor HEx, que puede ser un intercambiador de calor directo o indirecto. El condensador Hex puede ser un condensador
- 20 directo o indirecto, como un contactor. Esta instalación proporciona un equilibrio óptimo entre costo y ganancia de energía, incluso si se necesita agua de enfriamiento.

VENTAJAS DE LA INVENCION

- 25 El enfriamiento mediante un sistema de enfriamiento al vacío en comparación con un intercambiador de calor convencional que opera con agua de proceso tiene muchos efectos beneficiosos:
- La eficiencia de enfriamiento no depende de la temperatura del agua de proceso sino de la presión de vacío, que es mucho más fácil de controlar. El enfriamiento es casi instantáneo y no requiere un HRT (tiempo de retención hidráulica) significativo como en un HEx.
 - La variación de la viscosidad del lodo ya no es un problema.
 - En ausencia de un HEx, no hay necesidad de mantenimiento en las bombas y tuberías
- 30 de transferencia de lodos.
- 35

Los procesos TPAD/2PAD según la invención pueden implementarse en grandes instalaciones industriales, donde los problemas del tamaño del HEx no podrían manejarse con los procesos del estado de la técnica.

- 40 Cuando se opera en configuración por lotes (2PAD), el enfriamiento instantáneo permite una reducción significativa en la secuencia de extracción de lodos del reactor termófilo. En consecuencia, esto aumenta el tiempo del lote, lo que reduce el tamaño del reactor termófilo que calienta HEx y/o las bombas de alimentación (la alimentación puede ocurrir durante un período más largo).

- 45 El precalentamiento de lodos crudos con base en la inyección directa de vapor del gas residual producido por el instantáneo bajo presión de vacío en los lodos crudos tiene las siguientes ventajas sobre el pretratamiento convencional basado en intercambiadores de calor conocidos como TPAD/2PAD.

La recuperación de calor es independiente de la viscosidad del lodo.

- El gas residual generado por un sistema de enfriamiento al vacío puede ser problemático (problema de olor debido a la presencia de H_2S y NH_3). Por lo general, este problema se soluciona al inyectar este gas en el digestor una vez que se condensa. La reutilización de este gas residual sin condensarlo para precalentar el lodo crudo permite tratarlo según procesos estándar, a través de la unidad de tratamiento de olores de la planta 6. En la presente aplicación, el vapor a baja temperatura reduce la cantidad de olores y contaminantes (material orgánico vaporizado) en comparación con los sistemas instantáneos convencionales.
- 5
- En ausencia de un HEx, no hay necesidad de mantenimiento en las bombas y tuberías de transferencia de lodos.
- 10
- En el campo de la digestión anaeróbica de lodos, el enfriamiento al vacío suele estar relacionado con el enfriamiento de lodos a alta temperatura (alrededor de $165^{\circ}C$) que se tratan con un THP o con otros tratamientos térmicos, hasta una temperatura de alrededor de $100^{\circ}C$. La presión que sigue a tal instantáneo (en el campo del tratamiento de lodos) permanece más alta que la presión atmosférica (ΔP del instantáneo $>$ presión atmosférica).
- 15
- El enfriamiento al vacío secundario se puede utilizar para enfriar lodos desde una temperatura entre 100 y $110^{\circ}C$ hasta una temperatura de alrededor de $60^{\circ}C$. Dicho instantáneo secundario podría operar bajo vacío.
- 20
- El último paso de enfriamiento, para enfriar el lodo a una temperatura de $37-38^{\circ}C$ apropiada para la digestión anaerobia (paso mesófilo), se realiza al diluir el lodo con agua de proceso o al mezclarlo con lodo primario crudo producido por tanques de sedimentación primaria.
- El uso de enfriamiento al vacío para reducir la temperatura del lodo por debajo del umbral de $60^{\circ}C$ nunca se describió en el campo del tratamiento de lodos municipales.
- 25
- En los procesos del estado de la técnica, el gas no condensable generado durante los pasos de enfriamiento instantáneo que siguen al enfriamiento con vapor y la condensación a $37^{\circ}C-38^{\circ}C$, se alimenta al reactor mesófilo.