

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 753 027**

51 Int. Cl.:

C12P 5/02 (2006.01)

C12M 1/16 (2006.01)

C12N 11/14 (2006.01)

C12M 1/107 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2013 PCT/FI2013/050503**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.11.2013 WO13167806**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2013 E 13788252 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2019 EP 2847339**

54 Título: **Medios y métodos para la producción de metano**

30 Prioridad:

08.05.2012 FI 20125496

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

07.04.2020

73 Titular/es:

**Q POWER OY (100.0%)
Rajapurontie 16
21630 Lielahiti TL, FI**

72 Inventor/es:

**ALITALO, ANNI y
AURA, ERKKI**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 753 027 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Medios y métodos para la producción de metano

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un proceso de fermentación en estado sólido para producir metano, y a un biorreactor y soporte sólido para su uso en dicho proceso.

Antecedentes de la invención

10 El metano (CH₄) es un hidrocarburo de alcano simple y el componente principal del gas natural. Es un combustible atractivo, que se adapta bien a la infraestructura existente. Por ejemplo, se puede usar directamente para calentar hogares y edificios comerciales al alimentar la red de gas existente, que en muchos países tiene uno o dos años de capacidad de almacenamiento de gas. El metano también puede usarse en la generación de energía eléctrica o como combustible de transporte en vehículos a gas.

15 El metano se puede producir haciendo reaccionar dióxido de carbono e hidrógeno en una reacción Sabatier: CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O. La reacción se puede catalizar de dos maneras alternativas: inorgánicamente, usando catalizadores metálicos a temperaturas de varios cientos de grados Celsius, o microbiológicamente a algunas decenas de grados Celsius.

Debido a la temperatura de funcionamiento muy alta requerida y a la naturaleza explosiva del hidrógeno, la producción de metano en catalizadores inorgánicos es una tarea difícil. Además, el control de temperatura requerido consume energía, reduciendo así la eficiencia neta del sistema. Estos inconvenientes pueden evitarse mediante el uso de biorreactores de fermentación de metano catalizados microbiológicamente.

20 Los factores ambientales generales que afectan la actividad microbiana en cualquier biorreactor incluyen el contenido de agua, la temperatura, el pH, la presión parcial de oxígeno disuelto y otros gases, las condiciones nutricionales y el grado de homogeneidad. Tradicionalmente, los procesos de fermentación se llevan a cabo en líquido o en partículas sólidas húmedas. La agitación mecánica o agitación es la forma más común de mejorar la transferencia de gases y otras sustancias en el biorreactor. La fermentación líquida junto con la agitación proporciona biorreactores que son fáciles de controlar. Sin embargo, tales biorreactores son caros y la agitación consume grandes cantidades de energía. Si la biorreacción usa sustratos gaseosos y/o produce productos finales gaseosos, asegurar una transferencia de gas eficiente a bajo coste se vuelve extremadamente difícil. Además, la formación de aguas residuales en fermentadores líquidos puede convertirse en un problema particular, especialmente si la biorreacción produce agua.

30 Los procesos de fermentación en estado sólido ofrecen varias ventajas sobre los procesos de fermentación líquida. Por ejemplo, el agua, que es un prerequisite para el crecimiento microbiano, existe principalmente como adsorbida o unida capilarmente a las partículas sólidas húmedas en los biorreactores de estado sólido. Por lo tanto, la fase de agua en los espacios entre las partículas es discontinua y la mayor parte del espacio entre partículas se llena con la fase gaseosa. Esto hace que sea relativamente fácil alimentar materiales de partida gaseosos al biorreactor aplicando presión. Además, cualesquiera productos finales gaseosos pueden salir del sistema por diferencias de presión. No se necesita agitación en los biorreactores de estado sólido y, por lo tanto, la instrumentación puede ser mucho más simple que en los biorreactores líquidos. Además, se puede lograr un crecimiento microbiano notablemente denso en las partículas sólidas húmedas, dando como resultado una alta eficiencia de fermentación. El enfoque de estado sólido es particularmente adecuado para procesos de fermentación a gran escala y biorreactores en casos en los que los precios unitarios de los productos finales son bajos y, por lo tanto, el objetivo es construir biorreactores de bajo coste con bajos costes de mantenimiento.

45 También hay algunas desventajas asociadas con la fermentación en estado sólido. Por ejemplo, debido a las diferentes condiciones ambientales físicas y químicas, el crecimiento microbiano y su eficacia pueden distribuirse de manera desigual sobre las partículas sólidas. Dado que los biorreactores de estado sólido no pueden homogeneizarse mediante agitación, la disponibilidad de nutrientes a los microorganismos puede ser desigual y puede ser difícil proporcionar un control del pH. Además, la aireación o transferencia de sustancias gaseosas entre diferentes partes del biorreactor puede ser limitada. Esto puede deberse, por ejemplo, a un bloqueo del espacio entre partículas al condensar agua o al agua producida en la biorreacción. Por otro lado, en los casos en que la biorreacción no produce agua, las partículas sólidas pueden desecarse debido a la gravedad o los flujos de gas, disminuyendo así la capacidad de fermentación de los microorganismos.

50 Ha habido intentos de producir metano en biorreactores de estado sólido. Por ejemplo, Jee y col. informaron en Biotechnology Letters (1988, Vol 10: 243-248) que la producción eficiente de CH₄ a partir de H₂ y CO₂ podría lograrse fijando células de metanógeno en un soporte sólido como la cerámica porosa. Sin embargo, en la operación a largo plazo, la acumulación de células de metanógeno en el soporte obstaculizó el flujo homogéneo de los sustratos gaseosos a través de los poros del soporte y esto causó una disminución gradual de la metanización de H₂ y CO₂. Bugante y col. describieron en Journal of Fermentation and Bioengineering (1989, Vol. 67, 419-421) un biorreactor

para la producción de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, utilizando un soporte granular de cristobalita o arcilla cocida.

5 La presente invención tiene como objetivo evitar las desventajas de los biorreactores de estado sólido convencionales, especialmente cuando la biorreacción implica materiales de partida y/o productos de reacción gaseosos, y se desean bajos costes de construcción y mantenimiento.

Breve descripción de la invención

10 Un aspecto de la presente invención se refiere a un biorreactor como se describe en la reivindicación 1, que comprende un sistema de distribución de CO₂, un sistema de distribución de H₂, un sistema de recogida de agua y un sistema de recogida de CH₄, en el que el biorreactor se carga con un soporte sólido poroso en el que al menos el 10% del volumen de poro tiene un tamaño que da como resultado una succión de agua de aproximadamente 0,01 a aproximadamente 1,0 bar en comparación con agua libre, y en el que el soporte sólido se inocula con metanógenos, y el biorreactor comprende una fase sólida, una fase líquida y una fase gaseosa, en donde el volumen de la fase gaseosa es del 20% al 80% del volumen del biorreactor. El soporte sólido tiene las características mencionadas en la reivindicación 1 y no está inactivo en términos de su capacidad catiónica.

15 Otro aspecto de la invención se refiere al proceso para generar metano por fermentación en estado sólido, que comprende los pasos de a) proporcionar un biorreactor de acuerdo con cualquier realización de la presente invención, b) alimentar CO₂ y H₂ en el reactor, c) bioconvertir anaeróbicamente dicho CO₂ y H₂ en metano y agua, y d) recolectar metano del biorreactor.

20 Todavía otro aspecto de la invención se refiere al uso de un soporte sólido que comprende (i) partículas que tienen un diámetro de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 20% de las partículas; (ii) un material de estructura esponjosa que tiene un tamaño de poro de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 10% de sus poros; o (iii) un material de estructura filamentosa, en el que el diámetro de los espacios entre filamentos es de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 10% de sus espacios entre filamentos; o una mezcla de los mismos, para generar metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno en un proceso de fermentación en estado sólido. El soporte sólido no está inactivo en términos de su capacidad de intercambio catiónico. Realizaciones específicas de la invención se exponen en las reivindicaciones dependientes. Otros aspectos, detalles, realizaciones y ventajas de la presente invención serán evidentes a partir de los siguientes dibujos, descripción detallada y ejemplos.

Breve descripción de los dibujos

30 A continuación, la invención se describirá con mayor detalle por medio de realizaciones preferidas con referencia a los dibujos adjuntos, en los que

la Figura 1 muestra una representación esquemática de un biorreactor de metano ejemplar.

Descripción detallada de la invención

35 La presente invención se refiere a un proceso de fermentación en estado sólido (SSF) y a un biorreactor, en el que el dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂) se convierten en metano (CH₄) y agua por metanógenos que han crecido sobre un soporte sólido poroso.

40 Como se usa en la presente memoria, el término "metanógeno" se refiere a un microorganismo anaeróbico que pertenece al dominio *Archaea* y que es capaz de producir metano como subproducto metabólico. Los metanógenos también pueden denominarse microorganismos metanogénicos. Ejemplos no limitantes de metanógenos adecuados para su uso en la presente invención incluyen especies que pertenecen al género *Methanobacterium* como *M. formicicum*, *M. defluvii*, *M. oryzae*, *M. palustre*, *M. subterraneum*, y *M. thermoflexum*. Aquí, los metanógenos se pueden usar en cualquier mezcla o combinación deseada, o como un cultivo puro de una sola especie metanogénica.

45 Los metanógenos se pueden obtener a partir de colecciones de cultivo o aislarse, por ejemplo, de pantanos, como turberas o turberas de esfagno, u otros humedales. La elección del metanógeno en el presente proceso puede depender de varios factores que incluyen, pero no se limitan a ellos, los requisitos de nutrientes, temperatura y pH de un metanógeno dado, tal como lo entiende fácilmente una persona experta. En algunas realizaciones, puede ser ventajoso utilizar metanógenos derivados de la naturaleza nórdica debido a sus requisitos de temperatura favorables. En otras palabras, tales metanógenos funcionan bien en temperaturas más bajas y, por lo tanto, se necesita menos energía para calentar la biorreacción.

50 El biorreactor según la presente invención comprende tres fases principales, es decir, una fase sólida que comprende el soporte sólido poroso, una fase líquida que comprende agua producida en el proceso de fermentación y una fase gaseosa que comprende CO₂, H₂ y CH₄. El volumen de la fase gaseosa debe ser del 20% a 80% del volumen del biorreactor para lograr una interfaz líquido-sólido lo suficientemente grande. Además, cuanto mayor es la fase gaseosa, mayor es el tiempo de reacción y, por lo tanto, más eficiente es el biorreactor. Es importante que la fase sólida se distribuya uniformemente en la fase gaseosa dispersante por todo el biorreactor.

La conductividad capilar y el volumen suficiente de gas de soporte entre sólidos definen las características de flujo de gas y líquido a través del soporte sólido. Se requiere una conductividad capilar adecuada para garantizar que la transferencia de gas y líquido se pueda mantener en los niveles deseados para la duración del proceso de fermentación. Además, la humedad en el biorreactor debe ser lo suficientemente alta como para permitir que los metanógenos crezcan en el soporte sólido. Por otro lado, un contenido de humedad demasiado alto sería perjudicial para al menos algunos tipos de metanógenos, además de bloquear la transferencia de gas al llenar el espacio de soporte entre sólidos.

El soporte sólido adecuado para su uso en la presente invención debe ser poroso para obtener condiciones de fermentación suficientes como se describe en la presente memoria. El agua se une a los poros del soporte sólido por fuerzas capilares resultantes de la adsorción y la tensión superficial. La intensidad de la unión puede expresarse mediante unidades de presión, tales como bares. Un tamaño de poro dado corresponde a una cierta intensidad de unión. Suponiendo que los poros son tubos cilíndricos, el radio de los poros más grandes llenos de agua se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$r = 2\gamma / h\rho g,$$

en donde r es el radio del poro (m);

γ es la tensión superficial del agua, es decir, 0,073 N/m;

h es la succión de agua expresada como la altura de la columna de agua (m) (el valor absoluto del potencial capilar del agua);

ρ es la densidad del agua, es decir, 1000 kg/m³;

g es la aceleración gravitacional, es decir, 9,81 m/s².

Esta ecuación a menudo se presenta de forma simplificada:

$$D = 0,3/h,$$

en donde D es el diámetro del poro (cm); y

h es la succión de agua expresada como la altura de la columna de agua (cm) (el valor absoluto del potencial capilar del agua).

El soporte sólido adecuado para su uso en la presente invención debería ser tal que al menos el 10% de los volúmenes de poro tengan diámetros de poro que den como resultado una succión de agua de aproximadamente 0,01 a aproximadamente 1,0 bar en comparación con agua libre.

En algunas realizaciones, el soporte sólido puede comprender o estar en forma de partículas que tienen un diámetro de 0,1 mm a 10 mm. Se puede usar cualquier tamaño de partícula dentro de este intervalo, o cualquier combinación de los mismos, en el presente proceso y el biorreactor. Los ejemplos no limitantes de diámetros promedio adecuados de los poros se encuentran dentro del intervalo de aproximadamente 10 nm a aproximadamente 100 nm, y los materiales en partículas adecuados incluyen, pero no se limitan a ellos, mezclas de materiales que comprenden vermiculita, vermiculitas modificadas, materiales similares a la vermiculita o vermiculitas sintéticas; resinas sintéticas de intercambio catiónico; varios tipos de turba; otros materiales orgánicos; y mezclas de los mismos siempre que tengan o proporcionen las características físicas y químicas requeridas aquí descritas. Es particularmente importante que el soporte sólido proporcione una fase gaseosa, cuyo volumen es de 20% a 80% del volumen del biorreactor, y que se distribuye uniformemente por todo el biorreactor. En algunas otras realizaciones, el soporte sólido puede comprender o estar en forma de una estructura esponjosa que tiene una distribución de tamaño de poro dentro del intervalo de aproximadamente 0,1 mm a aproximadamente 10 mm para al menos el 10% de sus volúmenes de poro. Ejemplos no limitantes de materiales esponjosos adecuados incluyen materiales esponjosos sintéticos, tales como polímeros plásticos espumados, así como esponjas naturales.

En algunas otras realizaciones más, el soporte sólido se puede proporcionar como una estructura filamentosa. En tales casos, los espacios entre filamentos pueden considerarse como los poros del soporte sólido filamentoso, y su distribución de diámetro debe estar dentro del intervalo de aproximadamente 0,1 mm a aproximadamente 10 mm para al menos el 10% de los espacios entre filamentos.

Un ejemplo no limitante de un material filamentoso adecuado incluye lana de acero. Como la lana de acero no tiene ninguna propiedad de intercambio catiónico, se puede proporcionar en una mezcla con partículas que tienen suficientes propiedades de intercambio catiónico. Alternativamente o además, la lana de acero puede recubrirse o aplicarse con un material orgánico, como la poliacrilamida, para lograr suficientes propiedades de intercambio catiónico.

El soporte sólido poroso también puede ser cualquier mezcla de partículas, materiales esponjosos y filamentos, siempre que cumpla con los requisitos físicos establecidos en la presente memoria.

5 La porosidad del soporte sólido no solo afecta las condiciones de humedad en el biorreactor, sino que también proporciona una gran superficie de unión para los metanógenos y los protege del lavado con chorro de agua. Además, la porosidad aumenta el área superficial específica del soporte sólido. En algunas realizaciones, el área superficial específica del soporte sólido es de al menos 5 m²/g.

10 El área superficial específica alta, a su vez, da como resultado una alta capacidad de intercambio iónico del soporte sólido poroso. Para ser adecuado para su uso en el presente proceso de fermentación, el soporte sólido debe tener una alta capacidad de intercambio catiónico, típicamente superior a 0,1 mmol/g. Como la mayoría de las sustancias nutrientes son catiónicas, las propiedades de intercambio catiónico del soporte sólido son más importantes que las propiedades de intercambio aniónico. Sin embargo, en algunas realizaciones, el soporte sólido también puede poseer propiedades de intercambio aniónico. En algunas realizaciones adicionales, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de intercambio aniónico pueden incluso ser casi iguales entre sí.

15 Además, un área superficial específica alta junto con una alta capacidad de intercambio catiónico da como resultado la formación de una biopelícula. Esto, a su vez, aumenta la eficiencia del proceso de fermentación debido al alto contenido de metanógeno.

20 Las propiedades del soporte sólido mencionadas anteriormente proporcionan suficientes propiedades de amortiguación en el proceso de fermentación. Cuando el soporte sólido, debido a su capacidad de intercambio catiónico, es capaz de intercambiar iones de hidrógeno y/o hidroxilo con una fase líquida, no debería haber necesidad de un control adicional del pH.

25 Los soportes sólidos no adecuados para su uso en la presente invención incluyen materiales que están inactivos en términos de su capacidad de intercambio catiónico. Ejemplos más específicos de tales materiales incluyen materiales a base de sílice, materiales a base de madera, la mayoría de los plásticos (a menos que sean parejas con grupos activos) y la mayoría de los materiales de piedra, como el feldespato y el cuarzo. Es digno de mención que aunque la vermiculita existe en formas que tienen una capacidad suficiente de intercambio catiónico, no es un material de soporte sólido adecuado para usarse solo en el presente biorreactor. Esto se debe a que no es posible lograr un volumen de fase gaseosa suficiente con vermiculita única. La compactación espontánea a través del efecto de humectación y secado reduciría el volumen de la fase gaseosa por debajo del 20% del volumen del biorreactor, incluso si en algunos casos específicos fuera posible lograr un volumen de fase gaseosa inicial de poco más del 20% del volumen del biorreactor. Por lo tanto, si se va a emplear vermiculita en el presente biorreactor, debe proporcionarse en una mezcla con otros materiales no planos, como la perlita, para cumplir con el requisito de que el volumen de la fase gaseosa debe ser de 20% a 80% del volumen del biorreactor.

35 El presente proceso se puede llevar a cabo en un biorreactor que es, por ejemplo, un tanque o recipiente de vidrio, acero inoxidable o plástico. El material del biorreactor no debe ser tóxico para los metanógenos utilizados en el proceso. El tamaño y la forma del biorreactor pueden variar dentro de un intervalo conocido por una persona experta en la técnica dependiendo de diferentes parámetros, tales como la elección del material de soporte sólido. Preferiblemente, el tamaño es adecuado para la producción de metano a escala industrial. El biorreactor debe ser de bajo coste, fácil de operar y confiable.

40 En la Figura 1 se ilustra un biorreactor ejemplar. El extremo superior del recipiente biorreactor 10 está provisto de un sistema de distribución de CO₂ 20 y un sistema de distribución de hidrógeno 30 mientras que el extremo inferior del recipiente 10 está provisto de un sistema de recogida de agua 40 y un sistema de recogida de CH₄ 50. La parte inferior del recipiente del biorreactor está cubierta con una capa de piedra caliza triturada 60, mientras que el resto del recipiente se carga con un material de soporte sólido poroso 70 descrito en la presente memoria. El recipiente del biorreactor está rodeado por una circulación de agua de calentamiento 80.

45 El biorreactor puede estar provisto de varios sensores para monitorizar los parámetros deseados tales como la temperatura, el pH y la humedad en el reactor. Tales sensores están fácilmente disponibles en la técnica. El biorreactor también puede estar provisto de un analizador de gases para monitorizar el funcionamiento del biorreactor y el rendimiento de la producción de metano.

50 Se puede obtener el control de temperatura del presente proceso, p. ej., conectando un sistema cerrado de circulación de agua al biorreactor. Tal sistema puede proporcionar calentamiento o enfriamiento del proceso dependiendo de las necesidades de un determinado metanógeno. El calor se transfiere entre el sistema de circulación de agua y el biorreactor por conductividad. Otros medios y métodos para ajustar la temperatura del presente proceso son bien conocidos en la técnica.

55 El dióxido de carbono utilizado como material de partida en el presente proceso de fermentación se puede capturar de cualquier fuente adecuada, incluidas, pero sin limitarse a ellas, la combustión de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas en plantas de energía e instalaciones industriales donde el dióxido de carbono se produce como subproducto de diversas actividades no relacionadas con la energía.

5 El hidrógeno utilizado como el otro material de partida en el presente proceso se puede obtener de varias fuentes. Otra forma no limitante de obtener hidrógeno de alta pureza es a través de la electrólisis del agua en sus componentes, oxígeno e hidrógeno. La energía requerida para el proceso de reformado y electrólisis se puede obtener, por ejemplo, de fuentes de energía renovables como la energía solar, del agua o eólica. Los medios y métodos para producir hidrógeno son bien conocidos en la técnica.

En una realización, el biorreactor está provisto de una célula de hidrógeno, tal como una célula de electrólisis de óxido sólido (SOEC). Dichas células están disponibles comercialmente o se pueden construir como se conoce en la técnica.

10 Los sistemas de distribución para dióxido de carbono e hidrógeno se pueden separar o combinar, según se desee. Sin embargo, puede ser ventajoso mezclar estos gases antes de alimentarlos al biorreactor para evitar cualquier peligro de explosión de hidrógeno.

El proceso de fermentación se lleva a cabo en condiciones convencionales utilizadas para el cultivo de metanógenos, es decir, se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas. El oxígeno se puede purgar del reactor barriendo o purgando con un gas no oxigenado como nitrógeno, dióxido de carbono, hidrógeno o cualquier otro gas que soporte el ambiente anaeróbico.

15 Muchos metanógenos requieren nutrientes adicionales como nitrógeno, níquel y/o cobalto para su crecimiento. Estas sustancias se pueden suministrar durante el proceso de fermentación o, preferiblemente, proporcionarse unidas a un soporte sólido que tenga capacidad de intercambio catiónico como se describió anteriormente, dando como resultado un proceso autosostenido a este respecto. Se puede administrar nitrógeno, p. ej., en forma de urea o carbonato de amonio. En algunas realizaciones, la ceniza de madera se puede usar para proporcionar nutrientes adicionales a los metanógenos. La concentración específica en estos elementos depende del microorganismo utilizado.

20 En algunas realizaciones, la eficiencia del proceso de fermentación se puede aumentar mediante la adición de bicarbonato de sodio.

25 Se puede configurar un biorreactor funcional y un proceso de fermentación de metano de acuerdo con las realizaciones presentes, en un corto período de tiempo, tal como un par de días. Después de que el proceso de fermentación esté en funcionamiento, el biorreactor continuará produciendo metano y agua durante varios meses o años. En algunas realizaciones, la eficiencia de la biorreacción puede exceder varios vatios por litro y/o la pureza del metano producido puede ser tan alta como al menos 95%. Cuanto más eficiente es el biorreactor por volumen, más pequeño puede ser su tamaño. El metano recogido del biorreactor se puede usar para cualquier propósito deseado, incluyendo, pero sin limitarse a ello, la producción de proteínas como se describe en la Patente Europea No. 1419234B. Si se desea, también se puede alimentar directamente a un generador de energía eléctrica a gas para transformarlo en energía eléctrica, canalizarlo a hogares para calefacción y cocina doméstica, utilizarlo como materia prima en la industria química, o se puede utilizar como combustible de transporte. Si se desea, el metano se puede licuar para permitir un tránsito fácil y rentable a los mercados, donde se regasifica antes de su uso. Será evidente para una persona experta en la técnica que, a medida que avanza la tecnología, el concepto inventivo puede implementarse de varias maneras.

30 La invención y sus realizaciones no se limitan a los ejemplos descritos a continuación, sino que pueden variar dentro del alcance de las reivindicaciones.

Ejemplo 1

35 Se construyó un biorreactor vertical de 4,4 litros ilustrado en la Figura 1 a partir de una tubería de alcantarillado de polipropileno que tiene un diámetro de 75 mm y una altura de 1000 mm. Se ajustó un tubo de entrada de nylon para suministro de CO₂ y H₂ en la parte superior de la tubería. La parte inferior de la tubería estaba provista de dos tubos de salida, uno para la recogida de gas y el otro para posibles procedimientos de mantenimiento, como el reciclaje de agua. La parte inferior de la tubería de alcantarillado se cubrió con una capa de piedra caliza triturada de 10 cm de espesor y el resto del biorreactor se llenó con un soporte sólido, vermiculita. Antes del llenado, se mezclaron 2 kg de vermiculita con 200 g de perlita, 26,3 g de ceniza de madera, 0,5 g de sulfato de cobalto hidratado (CoSO₄· 7H₂O) y 0,5 g de cloruro de níquel hidratado (NiCl₂· 6H₂O). El biorreactor se inoculó con una suspensión acuosa de 2 litros de metanógenos obtenida de un biorreactor anterior y se almacenó en una mezcla de CO₂ y H₂ bombeando a través de la entrada de la parte superior del biorreactor.

Se usó un sistema de circulación de agua para calentar el biorreactor. La temperatura del agua de calentamiento se ajustó al nivel deseado, típicamente 52,3 a 54,8 °C.

50 Se transportaron hidrógeno y CO₂ mezclados en el tanque de recogida al biorreactor a través del tubo de entrada de nylon ajustado a la parte superior del biorreactor. La proporción y el modo de suministro de H₂ se ajustó al comienzo del proceso de fermentación en función de variables como la sequedad del biorreactor.

Los gases que salen del biorreactor (CH₄ y CO₂) se analizaron con un analizador de gases (Dräger GasVisi, X-am 7000).

Cuando la tasa de alimentación de H_2 varió entre 20,1 litros/día y 30,1 litros/día, la eficiencia promedio del biorreactor varió entre 0,7 vatios/litro y 1,01 vatios/litro, mientras que el rendimiento de metano varió entre 60,66% en volumen y 72,60% en volumen.

Ejemplo 2

- 5 Ensayos adicionales revelaron que aumentar el volumen de la fase gaseosa en el biorreactor a 20% a 80% aumentaba significativamente la eficiencia del biorreactor.

10 En un ensayo ejemplar, se construyó un biorreactor como se describe en el Ejemplo 1, con la excepción de que un cuarto de vermiculita se reemplazó con perlita. Esta modificación estructural dio como resultado un volumen de fase gaseosa de más del 20% del volumen del biorreactor. En consecuencia, la eficiencia promedio del biorreactor se incrementó cuatro veces a 4 vatios/litro.

REIVINDICACIONES

1. Un biorreactor que comprende un sistema de distribución de CO₂, un sistema de distribución de H₂, un sistema de recogida de agua y un sistema de recogida de CH₄, en el que
- 5 el biorreactor se carga con un soporte sólido poroso en el que al menos el 10% de los volúmenes de poros tienen un tamaño que da como resultado una succión de agua de aproximadamente 0,01 a aproximadamente 1,0 bar en comparación con agua libre,
- en el que dicho nivel de succión de agua para dicho al menos 10% de los volúmenes de poro se obtiene cargando el biorreactor con un soporte sólido que comprende
- 10 (i) partículas que tienen un diámetro de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 20% de las partículas; o
- (ii) un material esponjoso que tiene un tamaño de poro de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 10% de sus poros; o
- (iii) un material filamentoso, en el que el diámetro de los espacios entre filamentos es de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 10% de sus espacios entre filamentos; o
- (iv) cualquier mezcla de (i) a (iii);
- 15 con la condición de que el soporte sólido no esté inactivo en términos de su capacidad de intercambio catiónico;
- y en el que el soporte sólido se inocula con metanógenos; y
- el biorreactor comprende una fase sólida, una fase líquida y una fase gaseosa, en donde el volumen de la fase gaseosa es 20% a 80% del volumen del biorreactor.
- 20 2. El biorreactor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho soporte sólido tiene una capacidad de intercambio catiónico de al menos 0,1 mmol/g.
3. El biorreactor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho soporte sólido tiene un área superficial específica de al menos 5 m²/g.
4. El biorreactor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dichas partículas de soporte
- 25 sólido se seleccionan del grupo que consiste en mezclas de materiales que comprenden vermiculita, mezclas de materiales que comprenden vermiculita modificada, mezclas de materiales que comprenden material similar a la vermiculita, mezclas de materiales que comprenden vermiculitas sintéticas, resinas sintéticas de intercambio catiónico, varios tipos de turba y sus mezclas.
5. El biorreactor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dicho material esponjoso se
- 30 selecciona del grupo que consiste en materiales esponjosos sintéticos y esponjas naturales.
6. El biorreactor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dicho material filamentoso es lana de acero revestida o no revestida.
7. Un proceso para generar metano por fermentación en estado sólido, que comprende los pasos de
- a) proporcionar un biorreactor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6,
- 35 b) alimentar CO₂ y H₂ en el reactor
- c) bioconvertir anaeróbicamente dicho CO₂ y H₂ en metano y agua, y
- d) recoger metano del biorreactor.
8. Uso de un soporte sólido que comprende
- (i) partículas que tienen un diámetro de 0,1 mm a 10 mm para al menos 20% de las partículas;
- 40 (ii) un material de estructura esponjosa que tiene un tamaño de poro de 0,1 mm a 10 mm para al menos 10% de sus poros; o
- (iii) un material de estructura filamentosa, en el que el diámetro de los espacios entre filamentos es de 0,1 mm a 10 mm para al menos el 10% de sus espacios entre filamentos; o
- 45 una mezcla de los mismos para generar metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno en un proceso de fermentación en estado sólido,

con la condición de que el soporte sólido no esté inactivo en términos de su capacidad de intercambio catiónico.

9. El uso de acuerdo con la reivindicación 8, en el que dicho soporte sólido tiene una capacidad de intercambio catiónico de al menos 0,1 mmol/g.
- 5 10. El uso de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, en el que dicho soporte sólido tiene un área superficial específica de al menos 5 m²/g.
11. El uso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dichas partículas se seleccionan del grupo que consiste en mezclas de materiales que comprenden vermiculita, mezclas de materiales que comprenden vermiculitas modificadas, mezclas de materiales que comprenden materiales similares a vermiculita, mezclas de
- 10 materiales que comprenden vermiculitas sintéticas, resinas sintéticas de intercambio catiónico, diversos tipos de turba y mezclas de los mismos.
12. El uso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicho material esponjoso seleccionado del grupo que consiste en materiales esponjosos sintéticos y esponjas naturales.
- 15 13. El uso de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicho material filamentosos es lana de acero revestida o no revestida.

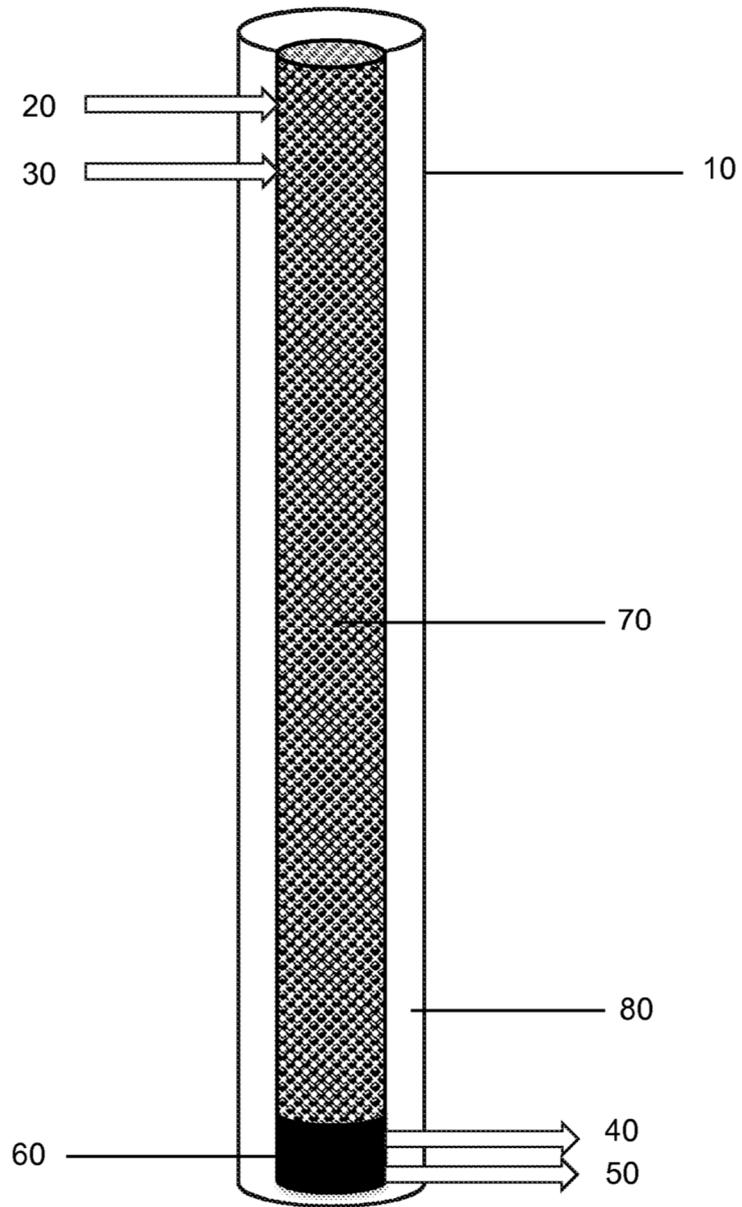


Figura 1