

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 041**

51 Int. Cl.:

C12M 1/107 (2006.01)

C12M 1/12 (2006.01)

C12M 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.06.2014 PCT/EP2014/063719**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.12.2014 WO14207211**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.06.2014 E 14744287 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019 EP 3013937**

54 Título: **Procedimiento para la biometanización de H₂ y CO₂**

30 Prioridad:

28.06.2013 DE 102013010826

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

12.02.2020

73 Titular/es:

**BRUNNER, MATTHIAS (100.0%)
Tilsiterstrasse 8
66121 Saarbruecken, DE**

72 Inventor/es:

BRUNNER, MATTHIAS

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 742 041 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

Procedimiento para la biometanización de H₂ y CO₂

5 Según el concepto "*power to gas*", puede almacenarse energía generando metano almacenable. Primero, a partir de picos no utilizados de energía generada de forma regenerativa se genera hidrógeno por electrólisis a. A partir de hidrógeno (H₂) junto con el dióxido de carbono (CO₂) puede fabricarse metano almacenable (CH₄). La formación de metano se puede equilibrar según la siguiente ecuación: $4 \text{ H}_2 + \text{ CO}_2 \rightleftharpoons \text{ CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ (la llamada reacción de Sabatier). Esta reacción puede llevarse a cabo química o biológicamente. La reacción química se fuerza a
10 temperaturas superiores a 180°C y altas presiones y es posible gracias a catalizadores relativamente sofisticados.

La transformación biológica se lleva a cabo por microorganismos especiales. En ecosistemas acuosos naturales, anaeróbicos, como pantanos, sedimentos de agua o suelos inundados, consorcios de varios grupos de organismos forman metano a partir de material orgánico, como residuos de plantas y animales, a través de una cadena de
15 degradación. Existen consorcios mesófilos y termófilos. Su temperatura óptima se sitúa en 30-40°C y 50-60°C respectivamente. Las bacterias metanogénicas forman a este respecto el último eslabón de esta cadena de degradación, que degrada los sustratos orgánicos en metano y dióxido de carbono a través de muchas etapas intermedias, como ácidos orgánicos, alcoholes e hidrógeno. Las bacterias metanogénicas pertenecen a las arqueobacterias (*Archaea*). Viven sólo en condiciones libres de oxígeno, tienen necesidades de nutrientes muy
20 específicas, crecen muy lentamente y tienen un espectro de sustratos muy limitado. Algunas bacterias metanogénicas utilizan ácido acético o ácido fórmico para formar metano. Otras bacterias metanogénicas forman metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono según la ecuación anterior.

Las plantas técnicas conocidas para la formación de metano biogénico no son adecuadas para la transformación de sustratos gaseosos. Estas plantas, como las plantas de biogás, las torres de digestión o las plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, han sido optimizadas exclusivamente para biometanizar sustratos hidrolizables u
25 orgánicos disueltos a través de las cadenas de degradación anteriormente mencionadas. El hidrógeno también se forma como producto intermedio. Requiere una presión parcial de hidrógeno muy baja, inferior a 10⁻⁴ bar, para poder degradar aún más los productos orgánicos intermedios resultantes a este respecto. Las bacterias metanogénicas que consumen hidrógeno mantienen la baja presión parcial de hidrógeno necesaria. Si se añadiera hidrógeno a este
30 procedimiento, toda la cadena de degradación podría dañarse y paralizarse.

Si se va a fabricar metano con la ayuda de las bacterias que consumen hidrógeno anteriormente descritas, a diferencia de lo que ocurre en la cadena de degradación anterior, debe imperar una presión parcial de hidrógeno lo
35 más alta posible para suministrar a las bacterias su sustrato gaseoso. Los grupos de organismos situados aguas arriba de las bacterias metanogénicas en la cadena de degradación ya no desempeñan ningún papel. Por lo tanto, se debe ofrecer más gas del que las bacterias son capaces de transformar para lograr una velocidad de conversión máxima.

Para fines de investigación, los cultivos puros de organismos de este tipo se abastecen con sus sustratos directamente a través de la fase gaseosa a escala de laboratorio (tubos de ensayo, frascos, etc.). Los organismos prácticamente absorben los gases metabolizados por ellos de la fase gaseosa a través de un gradiente y liberan el
40 metano formado en la fase gaseosa. Tales cultivos puros no se utilizan a escala industrial porque, como seres estrictamente anaeróbicos, meras trazas de oxígeno ya los matan. Hasta ahora, tampoco ha habido ningún motivo para hacerlo. A escala industrial, los organismos tienen que ser gaseados de otras maneras.

En este contexto y en el marco de los nuevos conceptos de almacenamiento de energía (*power to gas*), se han propuesto procedimientos para utilizar bacterias metanogénicas para la reacción de hidrógeno y dióxido de carbono con el objetivo de aumentar la superficie de intercambio de gases, reactores de lecho fijo con una gran fase
50 gaseosa. Los organismos adecuados crecen a este respecto como biopelículas en los materiales portadores, se lavan con un medio nutritivo y se abastecen desde la fase gaseosa. La desventaja de estos procedimientos es que estas superficies deben ser cubiertas primero por los organismos. Sin embargo, las bacterias metanogénicas crecen muy lentamente y tienen tiempos de generación de varios días incluso en condiciones óptimas. También es cuestionable cómo las bacterias metanogénicas deben formar una biopelícula. En la práctica, la fase de puesta en
55 marcha de reactores de este tipo es muy larga, insegura y apenas controlable. Si más tarde las biopelículas resultan demasiado gruesas, los organismos situados internamente sólo pueden ser abastecidos de manera no óptima, y se generan "zonas muertas". Esto dificulta el control de la concentración de biomasa por volumen de reactor. Tras un daño de los organismos por un fallo, estos reactores sólo podrían volver a ponerse en funcionamiento muy lentamente. No se conoce un uso de estos procedimientos en la práctica.

60 Por la solicitud de patente estadounidense US 2009/(130734 A1), se conoce un procedimiento para la conversión de dióxido de carbono en metano en el que se fabrica un cultivo de arqueobacterias metanogénicas hidrogenotróficas en un biorreactor, se alimenta un gas de partida de un proceso industrial al biorreactor; comprendiendo el gas de partida CO₂ y entre un 0,02% y un 6,7% de oxígeno (mol/volumen del gas de partida) y transformando las
65 arqueobacterias metanogénicas hidrogenotróficas el gas de partida para generar metano de forma continua.

La publicación coreana KR 2009 0008987 A describe un procedimiento para la fabricación de metano biológico a partir de hidrógeno y dióxido de carbono para reducir masivamente dióxido de carbono a temperatura ambiente y presión normal mediante el uso de residuos orgánicos.

5 Otro procedimiento para la fabricación de gas metano a partir de un material de partida que contiene CO₂ se conoce por la solicitud de patente europea EP 1 574 581 A2. En ella, se describe un procedimiento y un dispositivo para la fabricación de gas metano, convirtiéndose una materia de partida que contiene CO₂ en una corriente de gas rica en energía de una manera respetuosa con el medio ambiente.

10 La solicitud de patente estadounidense US 2013/005010 A1 describe un biorreactor que presenta un reactor principal y un reactor de crecimiento. Este documento también describe un procedimiento en el que las bacterias acetogénicas entran en contacto con gas de síntesis en una sección de fermentador de crecimiento de un recipiente de reactor que se forma continuamente con una sección de fermentador principal de un recipiente de reactor.

15 El artículo especializado "Potential of wastewater treating anaerobic granules for biomethanation of synthesis gas" de Guiot *et al.*, publicado en Environmetnal Science Technology, vol. 45, 3 de febrero de 2011, páginas 2006-2011, describe un procedimiento para la conversión de gas de síntesis en biogás (principalmente metano) por fermentación anaeróbica. Para ello, se introduce lodo granular como un inóculo de reactor en un reactor de gas de 30 litros y se abastece con CO para estudiar la producción de metano y otros metabolitos a diferentes diluciones de gas y velocidades de alimentación y recirculación. A una presión parcial de CO de 0,6 atm, combinada con una
20 relación de recirculación de gas de 20:1, se determinó una eficiencia máxima de conversión de CO del 75%, la cual era limitada con respecto a la transferencia de masa gas-líquido.

25 La solicitud de patente japonesa JPH 06169783 A desvela la generación de energía y de una sustancia útil con una función multipropósito y compleja mediante alimentación continua de hidrógeno y de gas de dióxido de carbono que se requiere por bacterias formadoras de metano que asimilan hidrógeno a partir de fuentes endógenas y exógenas.

30 En resumen, se puede afirmar que la generación y alimentación de SNG (Gas Natural Sustituto) a la red de gas natural representa una posibilidad prometedora de almacenar energía de fuentes renovables utilizando la infraestructura de gas natural existente y de aprovecharla con altos grados de eficacia. Sin embargo, sigue siendo necesario optimizar la fabricación de gas metano.

35 Es objetivo de la presente invención, por lo tanto, proporcionar agentes y procedimientos efectivos y económicos con los cuales se pueda fabricar metano utilizando microorganismos metanogénicos.

Este objetivo se resuelve mediante la presente invención, en particular el objetivo se resuelve mediante los aspectos siguientes de la presente invención, como dispositivos, procedimientos o usos y formas de realización de los mismos, así como mediante los objetos de las reivindicaciones. Las ilustraciones ilustran la presente invención.

40 En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un dispositivo para producir metano mediante microorganismos metanogénicos por conversión de H₂ y CO₂, que presenta:

- al menos un reactor;
- 45 - un medio acuoso que se proporciona en el al menos un reactor, encontrándose los microorganismos metanogénicos en el medio acuoso;
- un dispositivo de alimentación que está diseñado para la introducción de H₂ y CO₂ en el al menos un reactor, formando el H₂ y el CO₂ una mezcla gaseosa en el mismo;
- 50 - un dispositivo de aumento de la reacción que está diseñado para aumentar la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa; y
- un equipo de recirculación que está diseñado para la recirculación de al menos una parte del gas acumulado en el reactor, siendo la tasa de recirculación del gas acumulado en el reactor mayor que la tasa de alimentación del gas sustrato en el reactor.
- 55

60 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere al uso de un dispositivo de acuerdo con la invención para la fabricación de metano mediante microorganismos metanogénicos por reacción de H₂ y CO₂.

65 En un tercer aspecto, la invención se refiere a procedimientos para la fabricación de metano en un dispositivo de reactor de acuerdo con la invención por medio de microorganismos metanogénicos que se encuentran en el dispositivo de reactor en un medio acuoso por reacción de H₂ y CO₂ como una mezcla de gas de reacción, aumentando durante la reacción la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa está por medio de un dispositivo de aumento de la reacción y retroalimentándose al menos una parte del gas que se acumula en el reactor al dispositivo de reactor mediante un

dispositivo recirculación, siendo la tasa de recirculación del gas que se acumula en el reactor mayor que la tasa de alimentación de la mezcla de reacción en el reactor.

5 La presente invención se refiere, por tanto, a dispositivos, procedimientos o usos y realizaciones de los mismos que se describen con más detalle a continuación. Formas de realización preferentes que se describen, por ejemplo, para los dispositivos, también se aplican *mutatis mutandis* a los procedimientos o usos, y viceversa, es decir, ejemplos de realización que se describen, por ejemplo, para procedimientos o usos, también se aplican *mutatis mutandis* a los dispositivos.

10 Se puede producir metano (CH₄) química y microbiológicamente a partir de hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂). La reacción química tiene lugar catalizada a más de 180°C y a alta presión. En consecuencia, las exigencias a este respecto en cuanto a materiales y equipos son elevadas. El H₂ y el CO₂ se metabolizan microbiológicamente en ecosistemas acuáticos por bacterias metanogénicas en condiciones fisiológicas produciendo CH₄. Estos organismos también pueden utilizarse con fines técnicos. Las plantas de biometanización conocidas (plantas de biogás, etc.) solo son adecuadas para la degradación de compuestos de carbono orgánico sólidos o disueltos. El agregado de H₂ interfería en esta degradación. No se conocen plantas técnicas para la reacción microbiana de H₂ y CO₂. El suministro de H₂ limita el metabolismo de las bacterias. Los reactores sumergibles son conocidos a escala de laboratorio, al igual que los filtros anaeróbicos con superficies cubiertas de bacterias. Sin embargo, las bacterias metanogénicas colonizan dichas superficies muy lentamente.

20 El inventor ha hallado ahora que es posible un modo efectivo y económico de producir gas metano en reactores, preferentemente reactores sólidos, en contra de la visión imperante en el estado de la técnica, siempre que los microorganismos metanogénicos entren en contacto de manera ideal con los sustratos de hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂). Para ello, el inventor sugiere aumentar de manera apropiada, en el caso ideal maximizar, la superficie de contacto entre el medio acuoso del reactor en el que se encuentran los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa del sustrato gaseoso (mezcla gaseosa). Por ejemplo, y preferentemente, la superficie de contacto entre el medio acuoso en el reactor del dispositivo de acuerdo con la invención y la mezcla gaseosa que contiene dióxido de carbono e hidrógeno se aumenta mediante un dispositivo de aumento de la reacción.

30 Para el aumento de la superficie de contacto, en el estado de la técnica se proponía dejar crecer microorganismos metanogénicos en forma de una biopelícula sobre y en un lecho compacto, por ejemplo, introducido en un reactor como cuerpo de relleno, y luego enjuagarlos con H₂ y CO₂, mientras una película líquida se deslizaba o goteaba sobre los microorganismos contenidos en la biopelícula (DE 10 2011 051 836). Con esta realización se pretendía evitar la columna de líquido hidrostática que se desarrolla en un reactor, ya que se suponía que impedía la introducción de los gases sustrato H₂ y CO₂ o conducía a que en particular el CO₂ se disolviera en el medio acuoso del reactor y, por lo tanto, no estuviera disponible como gas sustrato para los microorganismos metanogénicos. Sin embargo, no se reconoció que una biopelícula de microorganismos metanogénicos pudiera desarrollarse en absoluto, por no hablar del tiempo que tardaría en desarrollarse tal biopelícula, de modo que un dispositivo correspondiente para producir metano utilizando microorganismos metanogénicos pudiera funcionar de manera económica y efectiva. Típicamente los microorganismos metanogénicos tienen un tiempo de generación de 3-5 días, incluso en condiciones ideales. Además, ni en la fase de crecimiento ni más tarde durante un posible período de inactividad del reactor debe haber ninguna entrada de oxígeno, ya que los microorganismos metanogénicos son estrictamente anaeróbicos y morirían inmediatamente. Un tiempo de inactividad del dispositivo no sería infrecuente, ya que en el proyecto *power to gas*, por ejemplo, se da la situación de que solo en horas punta se utiliza electricidad para disociar electrolíticamente agua en hidrógeno y oxígeno (O₂) con el fin de convertir el hidrógeno resultante junto con el dióxido de carbono en metano por medio de microorganismos metanogénicos. Esto significa que un dispositivo de este tipo, incluido el dispositivo de acuerdo con la invención, puede tener largos tiempos de inactividad, por ejemplo, si la electricidad no se convierte en gas (en este caso, metano) debido a una gran demanda. Sin embargo, el dispositivo descrito en el documento DE 10 2011 051 836 no sería adecuado para casos de este tipo, ya que la biopelícula no duraría si no estuviera continuamente enjuagada con un medio acuoso. Además, está expuesta sin protección a una entrada de oxígeno y los microorganismos metanogénicos morirían inmediatamente.

55 El dispositivo de acuerdo con la invención no presenta estas desventajas. Ciertamente el núcleo de la invención también se basa, entre otras cosas, en aumentar la superficie de contacto entre los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa que contiene dióxido de carbono e hidrógeno, pero preferentemente no por medio de la formación de biopelícula y/o por crecimiento de los microorganismos metanogénicos en un lecho compacto, sustrato o matriz.

60 El dispositivo de acuerdo con la invención presenta, por tanto, preferentemente un dispositivo de aumento de la reacción para aumentar la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa que contiene hidrógeno y dióxido de carbono, dispositivo que aumenta la superficie de contacto no mediante inmovilización de microorganismos metanogénicos en la superficie del cuerpo de relleno ni/o por goteo sobre el cuerpo de relleno con los microorganismos metanogénicos inmovilizados sobre el mismo ni/o por introducción de gas sustrato mediante los microorganismos metanogénicos inmovilizados en la superficie de cuerpos

de relleno.

En los diferentes ejemplos de realización del dispositivo para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos, el dispositivo de aumento de la reacción actúa sobre el medio acuoso que presenta los microorganismos metanogénicos de tal manera que su superficie que está en contacto con el gas sustrato se agranda. El dispositivo de aumento de la reacción puede ser un cuerpo con una relación muy elevada de superficie de volumen, por ejemplo, un cuerpo con estructura tipo panel de abeja o estructura perforada, siendo accesible esta superficie desde fuera tanto para el medio acuoso como para el gas sustrato. La ampliación de la superficie de reacción mediante el dispositivo de aumento de la reacción puede llevarse a cabo, por ejemplo, aplicando energía mediante agentes mecánicamente dinámicos como boquillas, agitadores y similares, mediante agentes mecánicamente estáticos como tamices o matrices de infiltración, o también mediante una mezcla de estos dos agentes. El dispositivo de aumento de la reacción puede estar diseñado para inducir una mezcla o agitación turbulenta del medio acuoso con el gas sustrato. Al mismo tiempo o adicionalmente, el dispositivo de aumento de la reacción puede estar diseñado para distribuir uno de los fluidos, es decir, el medio acuoso o el gas sustrato, dentro del en cada caso otro fluido en forma de partículas discretas (por ejemplo, partículas gaseosas o partículas líquidas), de modo que la superficie de contacto entre los dos fluidos aumente drásticamente y constituya una primera aproximación a la suma de las superficies del fluido convertidas en partículas. Como ejemplos de ello sean citadas en este caso, la introducción del gas sustrato en el medio acuoso por medio de una boquilla propulsora de inyección, formando el gas sustrato finas burbujas de gas (consideradas en este caso como partículas de gas) y pudiéndose distribuir en el medio acuoso, o la atomización o dispersión del medio acuoso (en partículas líquidas demasiado pequeñas) en un volumen que contiene el gas sustrato.

Además, es una forma de realización preferente de la presente invención que los microorganismos metanogénicos no sean inmovilizados en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención. Esto se consigue, por ejemplo, introduciendo permanentemente energía mecánica o neumática en el reactor, por ejemplo, a través del flujo o de la formación de burbujas de gas. De esta manera, los microorganismos metanogénicos no pueden formar una biopelícula. También debe preverse que no se ofrezca a los microorganismos metanogénicos ninguna posibilidad específica de formar una biopelícula, por ejemplo, introduciendo estructuras superficiales en forma de matriz o estructuras superficiales apropiadas para la formación de biopelículas.

Dado que el dispositivo de acuerdo con la invención es adecuado para alojar microorganismos, en particular microorganismos metanogénicos, con cuya ayuda se genera metano, el dispositivo de acuerdo con la invención en ocasiones también se designa como "biorreactor" en el presente documento.

El reactor del dispositivo de acuerdo con la invención, en una forma de realización preferente de la invención, está diseñado como reactor estacionario o no estacionario. El reactor es preferentemente un reactor sólido.

Los reactores sólidos (en inglés, *Solid State Fermentation-Bioreactors*; SFB) son reactores que se utilizan para el cultivo de microorganismos y para la fabricación industrial, por ejemplo, de enzimas, medicamentos y productos alimenticios. En el presente caso, para la fabricación de metano. Los reactores sólidos se dividen en reactores estacionarios y transitorios. Los reactores estacionarios incluyen, entre otros, placas de Petri, matraces Fernbach, incubadoras de madera, el biorreactor de cuba cubierta y los biorreactores de columna SSF (en inglés, *Solid State Fermentation*, fermentación sólida). Los reactores transitorios incluyen el tambor rotativo SFB, el SFB agitado y el tambor horizontal SFB.

El reactor de un dispositivo de acuerdo con la invención puede estar diseñado como reactor de tanque agitado continuo e ideal (CSTR), reactor de tanque agitado discontinuo e ideal (STR), reactor tubular, como reactor de bucle, como reactores conectados en serie o como cascada de reactores (reactor de cascada o cascada de reactores de tanque agitado).

En cada reactor, se encuentran las tres fases: sólida (biomasa), líquida (medio nutritivo) y gaseosa. En el reactor de acuerdo con la invención, se mantiene su distribución homogénea mediante diferentes medidas como, por ejemplo, componentes mecánicos móviles (agitadores): por ejemplo, en el reactor de tanque agitado, circuito de bomba externo: el líquido se hace circular por una bomba, por ejemplo, reactor de chorro libre, inyección de gas: la fase gaseosa se inyecta en la fracción líquida, por ejemplo, reactor de transporte aéreo o reactor de columna de burbujas. Dado que el núcleo de la invención reside, entre otras cosas, en el hecho de que los microorganismos metanogénicos se llevan a hacer contacto de la manera más óptima posible con la mezcla gaseosa que contiene CO₂ y H₂, el aspecto del soplado de la mezcla gaseosa es de particular importancia para la invención. Por tanto, el reactor de transporte aéreo o reactor de columna de burbujas es una forma de realización preferente del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención.

Además de la simple columna de burbujas, los llamados reactores de bucle (columnas de burbujas con circulación interna y externa del líquido) también se utilizan en una forma de realización preferente de acuerdo con la invención. Consisten en una columna de burbujas en la que está introducido coaxialmente un tubo interior. El gas se sopla en el líquido a través de una boquilla o frita de tal manera que se forma una columna de burbujas en el tubo interior. El reactor de bucle se utiliza como reactor de retromezcla en casos de mezclas de reacción líquidas de alta viscosidad.

En este caso, la masa de reacción se retromezcla en un sistema de reactor tubular mediante recirculación parcial en forma de bucle.

5 Los reactores de bucle pueden subdividirse de la siguiente manera, siendo todas las subdivisiones formas de realización preferentes de la presente invención: reactor de bucle y chorro y reactor de bucle de flujo de descendente.

10 Un reactor de bucle y chorro se caracteriza por una distribución homogénea de gas y líquido. En un reactor de bucle y chorro, el líquido se alimenta en un chorro propulsor en el fondo del reactor de tal manera que este pueda capturar y dividir el gas. Ejemplos de reactores de bucle y chorro son el reactor de bucle Mammot o reactor de bucle y chorro. Un reactor de bucle de flujo descendente se caracteriza por unos tiempos de permanencia del gas muy largos, que pueden ajustarse con bajas alturas de construcción. Se utiliza para la reacción de pequeñas cantidades de gas específicas.

15 Si los reactores de bucle están provistos de tubos de conducción, se obtienen los siguientes tipos de reactores: reactor de bucle de hélice (un reactor en el que se alimenta energía por medio de un órgano agitador que transporta axialmente hacia abajo y que está provisto de un tubo de conducción), reactor de bucle y chorro (un reactor de chorro libre con un tubo de conducción), reactor de bucle Mammot (un reactor de transporte aéreo o un reactor de columna de burbujas con un tubo de conducción).

20 En una forma de realización preferente, el reactor del dispositivo de acuerdo con la invención está diseñado como reactor sumergible. En un reactor sumergible de acuerdo con la invención, la superficie de intercambio gas-líquido se mantiene mediante dispersión de la fase de gas en el líquido. Se introduce energía constantemente: ya sea neumáticamente, por ejemplo, mediante gasificación; mecánicamente, por ejemplo, mediante órganos agitadores o por convección forzada del líquido, por ejemplo, bomba de líquido en un circuito externo.

30 La forma de realización como reactor sumergible contrasta con la enseñanza del documento DE 10 2011 051 836, que se manifiesta en contra de los reactores sumergibles y da preferencia a los reactores de biopelícula. Sin embargo, se ignoró a este respecto que, contrariamente al funcionamiento habitual de los biorreactores, es posible lavar permanentemente las bacterias con la mezcla gaseosa que contiene H₂ y CO₂ en el medio acuoso, e incluso saturarlas con la mezcla gaseosa. Esto se consigue, por ejemplo, mediante la alimentación permanente de la mezcla gaseosa al medio acuoso a gran escala mediante la aplicación de energía mecánica o neumática. Los microorganismos metanogénicos se encuentran a este respecto siempre en movimiento y están rodeados permanentemente por la mezcla gaseosa, de modo que tienen siempre suficiente oportunidad de absorber CO₂ y H₂ y convertirlos en CH₄. Normalmente, en los biorreactores no se quieren flujos ni una mezcla fuerte de gas y medio acuoso para no perturbar la fermentación y, por lo tanto, influir posiblemente de manera negativa en el rendimiento. Sin embargo, el inventor ha descubierto que los microorganismos metanogénicos deben entrar en contacto intenso y permanente con la mezcla gaseosa que contiene H₂ y CO₂, ofreciéndose la mezcla gaseosa a los microorganismos metanogénicos de tal manera que la superficie de contacto entre los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa se incremente lo más posible, de modo que los microorganismos metanogénicos tengan condiciones óptimas para la absorción de CO₂ y H₂. Esto se consigue, por ejemplo, mezclando la mezcla gaseosa con tanta intensidad con el medio acuoso del reactor, por ejemplo, mediante una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección o un compresor, que se produzca la formación de espuma.

45 Por tanto, en una forma de realización preferente, el dispositivo de aumento de la reacción del dispositivo de acuerdo con la invención está diseñado de tal manera que dispersa la mezcla gaseosa en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención. La dispersión es tal que, al introducir la mezcla gaseosa en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención, se produce la formación de espuma.

50 El reactor del dispositivo de acuerdo con la invención está diseñado como reactor tubular en una forma de realización preferente. Análogamente a los fotobiorreactores tubulares, un reactor tubular de acuerdo con la invención está compuesto de uno o varios tubos. A este respecto, los tubos se montan en alineación horizontal o vertical, por ejemplo, adyacentemente.

55 Como ya se ha mencionado, el dispositivo de aumento de la reacción está realizado de tal modo que aumenta la superficie de contacto entre el medio acuoso en el que se encuentran los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa. Esto se consigue mediante la entrada de energía, por ejemplo, energía mecánica o energía neumática. El dispositivo de aumento de la reacción puede estar diseñado a este respecto de tal modo que disperse la mezcla gaseosa en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención. La dispersión es tal que, al introducir la mezcla gaseosa en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención, se produce la formación de espuma.

65 En otra forma de realización preferente del dispositivo de acuerdo con la invención, el dispositivo que aumenta la reacción presenta al menos un lecho percolador, una torre de pulverización, un mezclador tubular o una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección, o un compresor. En particular, mediante un mezclador tubular, una bomba o un compresor, se introduce mezcla gaseosa en el medio acuoso de tal manera que la mezcla gaseosa

se dispersa en el medio acuoso e idealmente se forma espuma, aumentando así la superficie de contacto de tal modo que los microorganismos metanogénicos pueden absorber CO₂ y H₂ de forma eficaz y/o en la mayor cantidad posible. En el caso de la presente invención, es preferente un mezclador tubular y/o una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección.

“Microorganismos metanogénicos” en el sentido de la invención son aquellos microorganismos que pueden producir metano (CH₄) a partir de dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂), es decir, que son formadores de metano o microorganismos formadores de metano. Por lo tanto, los microorganismos metanogénicos también pueden designarse en el presente documento como microorganismos formadores de metano. Un ejemplo de tales microorganismos metanogénicos son las bacterias metanogénicas, las llamadas metanobacterias. Las metanobacterias pertenecen al reino de la *Archaea* y, en el mismo, a la cepa *Euryarchaeota*. Los microorganismos metanogénicos pertenecen a las clases *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanocellales*, *Methanosarcinales* y *Methanopyrales*. En el contexto de la presente invención está previsto que los microorganismos metanogénicos puedan proceder de todas las clases mencionadas, pero no tienen por qué. Por lo tanto, es preferente que los microorganismos metanogénicos sean una mezcla de diferentes microorganismos de la cepa *Euryarchaeota*.

“Medio acuoso” comprende líquidos acuosos, preferentemente aquellos en los que pueden desarrollarse microorganismos metanogénicos. El experto conoce tales medios. Pueden contener, por ejemplo, vitaminas, oligoelementos y/o metales pesados que requieren tales microorganismos metanogénicos. Preferentemente, el medio acuoso no es un líquido iónico. Un líquido iónico consiste en orgánicos cuyos iones, mediante deslocalización de carga y efectos estéricos impiden la formación de una red cristalina estable. Incluso una pequeña cantidad de energía térmica es suficiente, por tanto, para superar la energía de la red y romper la estructura cristalina sólida. Se trata, por tanto, de sales que son líquidas a temperaturas inferiores a 100 °C sin que la sal a este respecto esté disuelta en un disolvente como el agua.

En una forma de realización preferente, el dispositivo de acuerdo con la invención también presenta un dispositivo de descarga que está diseñado para descargar un gas de al menos un reactor. El gas puede contener H₂, CO₂ y/o CH₄, preferentemente el gas contiene CH₄. La cantidad de CH₄ en el gas puede ser de al menos un 50%, 60%, 70%, 80% o más, por ejemplo, un 85% o 90% o más. El inventor ha descubierto que, al aumentar la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa, como se explica detalladamente en el presente documento, el rendimiento de metano puede aumentar considerablemente.

En otra forma de realización preferente, el dispositivo de acuerdo con la invención también presenta un dispositivo de recirculación que está diseñado para retroalimentar al menos una parte del gas al dispositivo de alimentación. El dispositivo de recirculación presenta preferentemente una bomba o un compresor.

En otra forma de realización preferente, el dispositivo de acuerdo con la invención también presenta un dispositivo de circulación diseñado para hacer circular el medio acuoso a través del al menos un reactor. El dispositivo de circulación presenta preferentemente al menos una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección.

En otra forma de realización preferente del dispositivo de acuerdo con la invención, el dispositivo de alimentación presenta un dispositivo para enriquecer dióxido de carbono de una mezcla de gas.

Es preferente, además, que el dispositivo de alimentación del dispositivo de acuerdo con la invención presente, además, un equipo para la disociación electrolítica de agua.

Es también preferente que el dispositivo de alimentación del dispositivo de acuerdo con la invención esté diseñado de tal manera que, al introducirse H₂ y CO₂ en el al menos un reactor, la mezcla gaseosa forme un flujo turbulento.

Además, es preferente que el dispositivo de alimentación del dispositivo de acuerdo con la invención esté diseñado, además, de tal manera que, durante el funcionamiento, el volumen de H₂ y CO₂ introducido por hora exceda la capacidad en volumen del al menos un reactor en al menos el factor 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500 o más.

Preferentemente, la presión en el reactor del dispositivo de acuerdo con la invención es mayor o igual a 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 bar o más.

Preferentemente, los microorganismos metanogénicos se encuentran en forma de colonias macroscópicas (gránulos) en el medio acuoso del reactor del dispositivo de acuerdo con la invención. Como gránulos se designan macrocolonias de microorganismos metanogénicos de 1-5 mm de tamaño, como las que pueden desarrollarse en reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, IC, etc.) para el pretratamiento anaeróbico de aguas residuales industriales. Estos gránulos pueden obtenerse en una planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales industriales (por ejemplo, en una fábrica de papel o en la industria alimentaria). Los gránulos se describen, por ejemplo, en Guiot *et al.* (2011). Se supone que los microorganismos metanogénicos anaeróbicos, probablemente una población mixta de diferentes microorganismos metanogénicos, se encuentran en el interior de un gránulo,

mientras que los microorganismos aeróbicos se encuentran más bien en la superficie y en las capas subyacentes. Los organismos aeróbicos, por decirlo así, protegen a los organismos anaeróbicos contra el paso de oxígeno. En el caso de la inoculación de un dispositivo de acuerdo con la invención, en particular del reactor, después de la expulsión de oxígeno, por ejemplo, mediante nitrógeno o por medio de una fuente de carbono, que es metabolizada por organismos aeróbicos existentes consumiendo oxígeno, los microorganismos metanogénicos comienzan a convertir en metano el dióxido de carbono y el hidrógeno alimentados. El inventor ahora ha establecido que tales gránulos son muy ventajosos por las razones anteriormente mencionadas, ya que no son necesarias medidas especiales al trabajar con gránulos e inocular el reactor del dispositivo de acuerdo con la invención para crear o mantener condiciones anaeróbicas. Además, el inventor ha hallado que los gránulos contienen tal cantidad suficiente de microorganismos metanogénicos que la producción de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno en el reactor del dispositivo según la invención comienza dentro de un tiempo muy corto. Además, el inventor ha hallado que un reactor inoculado con gránulos de un dispositivo de acuerdo con la invención puede reiniciarse y/o ponerse en funcionamiento sin más fácilmente para la fabricación de metano incluso después de un período prolongado de inactividad. Por las razones mencionadas, los gránulos son una fuente preferente de microorganismos metanogénicos que se utilizan en el marco de la presente invención. Si los gránulos que se utilizan de acuerdo con la invención contienen microorganismos metanogénicos pueden comprobarse fácilmente, por ejemplo, con la prueba de bacterias metanogénicas VIT® Methanogenic de Vermicon. Alternativamente, los gránulos pueden gasificarse con dióxido de carbono e hidrógeno en un medio acuoso adecuado, por ejemplo, en un dispositivo de acuerdo con la invención miniaturizado, en particular en un reactor, y probarse para la fabricación de metano.

Por tanto, la presente invención se refiere, en otro aspecto, al uso de gránulos que contienen microorganismos metanogénicos para inocular un dispositivo de acuerdo con la invención.

Como ya se ha mencionado, la presente invención se refiere a un procedimiento para la fabricación de metano en un dispositivo de reactor mediante microorganismos metanogénicos que se encuentran en un medio acuoso en el dispositivo de reactor por reacción de H_2 y CO_2 como mezcla de gas de reacción, caracterizado porque, durante la reacción, se aumenta la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa mediante un dispositivo de aumento de la reacción.

En el procedimiento, uso o dispositivo de acuerdo con la invención, se utiliza preferentemente una mezcla de microorganismos metanogénicos de la cepa *Euryarchaeota*. La mezcla se obtiene utilizando preferentemente gránulos que contengan microorganismos metanogénicos, que no se caracterizan más detalladamente.

Los microorganismos metanogénicos se añaden preferentemente al medio acuoso en forma de colonias macroscópicas (gránulos).

Puede ser ventajoso para los procedimientos, pero también para los dispositivos y aplicaciones de las presentes invenciones, si la relación molar de H_2 y CO_2 en la mezcla gaseosa es menor o igual a aproximadamente 4 : 1. Sin embargo, también se pueden utilizar relaciones molares superiores a 4:1. Esto puede tener como consecuencia un aumento del pH dentro del reactor debido a la relativa falta de CO_2 . Sin embargo, el valor de pH puede ajustarse a un valor deseado alimentando sustancias apropiadas como, por ejemplo, sistemas tampón o ácidos.

La presente invención también se refiere a los siguientes aspectos A1 a A6:

A1. Procedimiento para la biometanización de H_2 y CO_2 mediante bacterias metanogénicas en un medio apropiado para estas (temperatura, pH, Redox, nutrientes...) en un biorreactor sumergible, caracterizado porque

1.1. la reacción tiene lugar a presiones superiores a 0,1 o 1 bar,

1.2. las bacterias implicadas se añaden al reactor en forma de colonias macroscópicas, llamadas "gránulos", como pueden desarrollarse en reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, IC, etc.) o se añaden en forma de lodos pastosos procedentes de torres de digestión, plantas de biogás, etc.,

1.3. el H_2 y el CO_2 se alimentan al reactor en una proporción igual o inferior a aproximadamente a 4:1, pero también superior a 4:1,

1.4. el reactor se mezcla con una recirculación de gas,

1.5. la reacción se efectúa en varias partes de reactor conectadas en serie o en varios reactores en una cascada.

A2. Biorreactor sumergible según el aspecto A1, caracterizado porque está provisto de

2.1. un volumen de líquido (1), y

2.2. un volumen de gas (2).

A3. Volumen de líquido (1) según el aspecto 2.1, caracterizado porque este está dividido

3.1. en una parte (A) mayor gasificada y flujo ascendente; y

3.2. en una parte (B) menor, no gasificada y con flujo descendente.

Alternativamente, el volumen de líquido (1) según el aspecto 2.1 se caracteriza porque este está dividido

3.1 en una o más partes (A) gasificadas o

3.2 en una o más partes (A) gasificadas y una o más partes (B) no gasificadas.

A4. La recirculación interna de gas según el aspecto 1.4. se caracteriza porque

4.1 gas de la parte de volumen (2) portadora de gas según el punto 2.2. se introduce en la parte (A) de flujo ascendente según el punto 3.1. con agentes adecuados,

4.2. la cantidad de gas recirculado por período es superior a la cantidad de gas alimentada al reactor durante el mismo período.

Alternativamente, la recirculación interna de gas según el aspecto 1.4. se caracteriza porque

4.1 gas de la parte de volumen (2) portadora de gas según el aspecto 2.2. se introduce en la(s) parte(s) gaseada(s) (A) según el aspecto 3 con agentes adecuados.

A5. La cascada según el aspecto 1.5, caracterizada porque

5.1. la recirculación de gas según el punto 1.4 se lleva a cabo por separado para cada reactor o parte de reactor o conjuntamente para varias unidades de este tipo,

5.2. estas o subgrupos de ellas se encuentran juntas en un espacio acuático (C) y se templan por este de manera conjunta.

A6. El biorreactor sumergible según el aspecto 1, caracterizado por que este dispone de dispositivos adecuados para la desespumación, tales como dosificador de antiespumante (6), destructor de espuma (7) o trampas de espuma (7).

Por lo que respecta a las referencias, se remite a las referencias utilizadas en las figuras 7 a 10, que se describen a continuación en la leyenda de la figura 10.

Ejemplos e ilustraciones no limitantes

La invención se explica con más detalle por medio de las ilustraciones adjuntas (figuras) y ejemplos de realización.

La figura 1: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando un reactor tubular

la figura 2: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando un reactor de tanque agitado

la figura 3: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando un reactor sumergible

la figura 4: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando una torre de pulverización

la figura 5: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando un reactor de lecho percolador

la figura 6: diagrama de flujo de un dispositivo ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos utilizando un reactor propulsor de inyección

la figura 7: diagrama de flujo de un reactor sumergible para la reacción de sustratos gaseosos. Por ejemplo, se introducen bacterias metanogénicas como gránulos compactos en un biorreactor sumergible y se gasean bajo condiciones fisiológicas con H₂ y CO₂ a presión. Se provoca una transición efectiva de fase de los sustratos

gaseosos a la fase líquida (1) por una recirculación interna (4) de gases desde la cámara de gas del reactor (2). Varios reactores (R_n) o partes de reactor con diferentes condiciones funcionan en serie como cascada. Ventajas del procedimiento: bajas temperaturas, alta densidad de organismos, cortos tiempos de arranque, funcionamiento flexible, control sencillo.

5

la figura 8: diagrama de flujo de una cascada de reactores R_1 a R_n con recirculación de gas común

la figura 9: diagrama de flujo de una cascada de reactores R_1 a R_n con recirculación de gas separada

10

la figura 10: disposición de varios reactores (R_1 a R_n) en un cuerpo de agua común (C), sección transversal

Lista de referencias para las figuras 1 a:

15

100 Dispositivo para la fabricación de metano mediante un reactor tubular

102 Conducto de entrada

104 Primera válvula

20

106 Boquilla

108 Reactor (diseñado como reactor tubular)

110 Dispositivo de separación de gas

25

112 Segunda válvula

114 Primera salida

30

116 Medio acuoso

118 Primer ramal de retorno

120 Bomba

35

122 Segundo ramal de retorno

124 Elemento mezclador

40

126 Dispositivo de alimentación

128 Superficie del líquido

45

200 Dispositivo para la fabricación de metano con un reactor de tanque agitado

202 Reactor (diseñado como reactor de tanque agitado)

204 Agitador

50

300 Dispositivo para la fabricación de metano mediante un reactor sumergible

302 Reactor (diseñado como reactor sumergible)

55

400 Dispositivo para la fabricación de metano con una torre de pulverización

402 Reactor (diseñado como torre de pulverización)

404 Dispositivo de dispersión

60

500 Dispositivo para la fabricación de metano con un reactor de lecho percolador

502 Reactor (diseñado como reactor de lecho percolador)

504 Matriz

65

600 Dispositivo para la fabricación de metano con un reactor de lecho percolador

602 Reactor (diseñado como reactor propulsor de inyección)

Lista de referencias para las figuras 7 a 10:

- 5 (A) Parte de reactor gasificado con flujo ascendente
- (B) Parte de reactor gasificado con flujo descendente
- 10 (C) Cuerpo de agua por medio del cual pueden templarse varios reactores
- (1) Fracción volumétrica del reactor predominantemente llena de agua.
- (2) Fracción volumétrica del reactor predominantemente llena de gas.
- 15 (3) Alimentación de gas
- (4) Recirculación de gas
- 20 (5) Acceso para alimentación de nutrientes y bacterias, ajuste del pH, muestreo, etc.
- (6) Dosificación del antiespumante
- (7) Dispositivo antiespumante, trampa de espuma
- 25 (8) Eliminación de productos sólidos, líquidos y disueltos de (1)
- (9) Eliminación de productos gaseosos de (2)
- 30 (10) Bomba de recirculación de gas
- (11) Órgano de bloqueo
- 35 (12) Válvula de mantenimiento de presión

Descripción de ejemplos de realización concretos de la invención

La figura 1 muestra una forma de realización ejemplar de un dispositivo 100 para la fabricación de metano mediante microorganismos metanogénicos por reacción de hidrógeno y dióxido de carbono. El dispositivo 100 ejemplar presenta un reactor 108. Un conducto de entrada 102 se acopla por medio de una primera válvula 104, por ejemplo, una primera válvula de mantenimiento de presión 104, a una primera entrada de una boquilla 106, por ejemplo, una boquilla propulsora de inyección. La boquilla 106 se acopla al reactor 108 a través de un correspondiente conducto. El reactor 108 se acopla en uno de sus extremos a una entrada de un dispositivo de separación de gas 110 por medio de un conducto. El dispositivo de separación de gas 110 puede llenarse con un líquido como, por ejemplo, agua, y presenta tres salidas. En una primera salida 114, puede descargarse una fase gaseosa a través de una segunda válvula 112, por ejemplo, una segunda válvula de mantenimiento de presión, que presenta al menos el producto final de la conversión microbiana, el gas metano, o que se compone esencialmente del mismo. Una parte de la misma fase gaseosa puede descargarse opcionalmente del dispositivo de separación de gas a través de una segunda salida y alimentarse a la boquilla 106 a través de un primer ramal de recirculación 118. La fase gaseosa se puede alimentar a la boquilla 106 a este respecto por medio de un conducto separado o se puede alimentar al conducto por medio del cual está acoplada la primera válvula 104 a la boquilla 106. El primer ramal de retorno 118 es un dispositivo opcional, en particular para reactores tubulares suficientemente largos, que no es esencial para la función de la invención presentada en este caso, pero que puede ser adecuado para optimizar su funcionamiento. Una fase líquida puede descargarse en una tercera salida del dispositivo de separación de gas 110 y alimentarse a la boquilla 106 por medio de un segundo ramal de recirculación 122 en la que está prevista una bomba 120.

En la forma de realización mostrada en la figura 1, el reactor 108 es un reactor tubular. Por un reactor tubular puede entenderse en este caso un recipiente con forma tubular en el que están contenidos los microorganismos metanogénicos y en el que tiene lugar una reacción de conversión microbiana en la que se produce metano a partir de H₂ y CO₂. El H₂ y CO₂ forman conjuntamente el gas del sustrato - el producto inicial de la reacción de conversión microbiana. Estos dos gases pueden alimentarse por separado por medio de conductos separados o ya en forma de mezcla de gases por medio de un conducto a la boquilla 106. El último caso se ha realizado en la forma de realización mostrada en la figura 1. El reactor 108 puede estar diseñado de tal manera que su interior pueda mantenerse a una determinada temperatura que procure un desarrollo óptimo de la reacción. En el presente caso de generación de metano por medio de microorganismos metanogénicos, por ejemplo, la temperatura puede situarse en un intervalo de entre aproximadamente 30°C hasta aproximadamente 80°C, por ejemplo, en un intervalo de entre

aproximadamente 40°C hasta aproximadamente 70°C, por ejemplo, entre aproximadamente 40°C hasta aproximadamente 50°C. El reactor 108 contiene un medio acuoso 116, encontrándose los microorganismos metanogénicos en el medio acuoso 116. El medio acuoso 116 puede ser una mezcla de gas/líquido, por ejemplo, una mezcla espumosa de gas/agua. El gas sustrato, que presenta H₂ y CO₂, se alimenta al reactor 108 por medio de la boquilla 106 a través de un dispositivo de alimentación 126. El dispositivo de alimentación 126 puede ser un sistema de tubos correspondientemente diseñado que esté diseñado para introducir un fluido en el reactor 108. En el marco de esta descripción, un fluido puede ser un gas, un líquido o una mezcla de ellos, por ejemplo, un líquido finamente atomizado que también esté mezclado con un gas. Por supuesto, también pueden introducirse en el reactor 108 otras sustancias como, por ejemplo, aditivos que promuevan la reacción de conversión microbiana como, por ejemplo, metales pesados en pequeñas cantidades, que son requeridos en parte por los microorganismos metanogénicos.

Por medio del primer ramal de recirculación 118, puede alimentarse la fase gaseosa del dispositivo de separación de gas 110 a la boquilla 106 y, por lo tanto, reutilizarse. La fase gaseosa descargada a través del primer ramal de recirculación 118 puede estar constituida principalmente por componentes del gas sustrato que no se han convertido en metano en el reactor 108. Estos, por así decirlo, "residuos" no convertidos, pueden reciclarse de esta manera y están disponibles de nuevo para la reacción microbiana. El primer ramal de recirculación 118 puede omitirse en los reactores tubulares 108 muy largos, ya que es muy probable que el gas sustrato introducido en la entrada de tal reactor tubular 108 se haya convertido al final del reactor tubular 108. En otras palabras, se puede suponer que, con creciente longitud del reactor tubular 108, disminuye la proporción de gas sustrato no convertido al final de tal reactor.

La boquilla 106 dispuesta entre la primera válvula 104 y el reactor 108 sirve para introducir al menos el gas sustrato en el reactor 108 de tal forma que en el mismo tenga lugar simultáneamente una circulación o penetración del medio líquido 116 con el gas sustrato introducido de esta forma. Por medio de la boquilla 106 se puede aumentar la energía cinética del gas sustrato antes de que se introduzca en el reactor 108. De esta forma puede conseguirse que el gas sustrato introducido, por decirlo así, se sople en el medio acuoso que presenta los microorganismos metanogénicos, por medio de lo cual tiene lugar una intensa circulación del medio acuoso 116. En otras palabras, introduciendo el gas sustrato en el reactor 108 a través de la boquilla 106, es posible crear numerosas burbujas de gas que penetran en la fase acuosa 116 (en lo sucesivo designado como caso dinámico). Esto permite que la superficie de reacción entre el gas sustrato y el medio acuoso 116 aumente drásticamente en comparación con el caso (en lo sucesivo designado como caso estático) en el que el gas sustrato se introduce en un reactor tubular 108 sin que tenga lugar la circulación anteriormente descrita de la fase acuosa 116.

El chorro propulsor puede formarse por la boquilla 106 con la ayuda de la fase líquida que se descarga del dispositivo de separación de gas 110. La boquilla 106 puede ser, por ejemplo, una bomba de inyección en la que, dependiendo de la forma de realización del dispositivo, por ejemplo, se pueda utilizar el medio gaseoso descargado o la fase líquida del dispositivo de separación de gas 110. La fase líquida descargada a través del segundo ramal de recirculación 122 es el medio acuoso 116 del reactor 108. El dispositivo de separación de gas 110 puede verse funcionalmente como un dispositivo de amortiguación o de segregación. En el reactor 108, debido a las turbulentas operaciones de mezcla, el medio acuoso 116 puede presentarse como una mezcla espumosa de gas/agua. En otras palabras, el líquido que contiene los microorganismos metanogénicos está intensamente enriquecido con la fase gaseosa -metano y residuos del gas sustrato. En este estado, el medio acuoso 116 se transfiere al dispositivo de separación de gas 110 y en el mismo la fase gaseosa se separa de la fase líquida, pudiendo el medio acuoso 116 seguir siendo espumoso. Este proceso de separación de gases puede tener lugar de forma natural elevando la fase gaseosa (residuos no convertidos del gas sustrato y metano) de la mezcla 116 de líquido y gas. Como puede verse en la figura 1, el líquido esencialmente purificado de la fase gaseosa junto con los microorganismos metanogénicos puede entonces extraerse del dispositivo de separación de gas 110 en la tercera salida, y alimentarse a la boquilla 106 por medio de la bomba 120 a través del segundo ramal de recirculación 122 y utilizarse para formar el chorro propulsor que entra en el reactor 108. De esta manera, se puede realizar un circuito cerrado del medio acuoso 116.

El gas que puede descargarse en la segunda salida del dispositivo de separación de gas 110 y que puede alimentarse a la boquilla 106 por medio del primer ramal de recirculación opcional 118, en el caso óptimo presenta esencialmente solo metano, posiblemente pequeños residuos del gas sustrato no convertido. La tasa de recirculación de la fase gaseosa del dispositivo de separación de gas 110 puede adaptarse a la longitud del reactor 108 y, como ya se ha mencionado, puede reducirse a aproximadamente cero en reactores suficientemente largos 108 en los que la fase gaseosa recirculada del dispositivo de separación de gas 110 se compone esencialmente de metano. El procedimiento de fabricación presentado en este caso se desarrolla de manera muy eficiente, es decir, que mediante la intensa mezcla del medio acuoso 116 en el reactor 108 con el gas sustrato, se pueden alcanzar tasas de conversión, por ejemplo, de más del 90%, por ejemplo, de más del 95%, por ejemplo, de prácticamente el 100%. En caso de presentarse el primer ramal de recirculación 118, la tasa de recirculación de la fase gaseosa desde el dispositivo de separación de gas 110 puede ser siempre mayor que la tasa de alimentación del gas sustrato al reactor 108 a través del conducto de entrada 102, por ejemplo, en factores del orden de aproximadamente 1 a, por ejemplo, 100 a, por ejemplo, 200, a, por ejemplo, 500, a, por ejemplo, 1000 o más. En los reactores tubulares 108 muy largos, como se ha mencionado anteriormente, casi todo el gas sustrato se convierte en metano. En este caso, también puede proporcionarse un ramal de recirculación 118 correspondientemente diseñado a pesar de una

proporción insignificante del residuo de gas sustrato en el gas recirculado. Independientemente de la tasa de conversión dentro del reactor 108, con ayuda de una alta tasa de recirculación de gas por medio del primer ramal de recirculación 118, que, por lo tanto, se corresponde funcionalmente con un ramal de recirculación, puede incrementarse el contenido de gas en la mezcla de gas/agua en el interior del reactor 108 y, por tanto, el grado de la turbulencia. Mediante la recirculación de gas, se puede aumentar el mezclado de la mezcla de gas/agua dentro del reactor 108, es decir, por ejemplo, el tiempo de contacto y el área de contacto entre estas dos fases.

La mezcla de gases que se encuentra por encima de la superficie líquida 128 en el dispositivo de separación de gas 110 presenta el gas producto durante el funcionamiento del dispositivo 100 y, en función de la eficiencia de conversión, residuos pequeños hasta insignificantes de gas sustrato no convertido. Esta mezcla de gases puede descargarse total o parcialmente del dispositivo 100 en la primera salida 114 y, opcionalmente, recirculada parcialmente en el reactor 108 por medio del primer ramal de recirculación 118. En otras palabras, una fase gaseosa de la misma composición se descarga en la primera salida 112 y en la segunda salida (perteneciente al primer ramal de recirculación opcional 118).

En general, en una determinada relación de H_2/CO_2 en el reactor 108 o en el dispositivo de separación de gas 110, existe un equilibrio: una concentración de CO_2 en el gas se corresponde con una concentración de CO_2 en el medio acuoso 116. Una vez que se ha convertido todo el CO_2 , aumenta el valor de pH en el medio acuoso 116, lo que puede ser no deseado. Debido a ello, la alimentación de gas sustrato en el conducto de entrada 102 puede ajustarse de tal manera que siempre quede una cantidad residual de CO_2 en la fase gaseosa que se descarga en la primera salida 114 y, por lo tanto, también en la segunda salida, por ejemplo, de aproximadamente un 1% hasta aproximadamente un 2%. Una conversión completa de H_2 , por otro lado, no conduce a un cambio en el valor del pH. Para estabilizar el valor del pH, puede ser ventajoso, por tanto, alimentar el gas del sustrato en una relación de aproximadamente 4:1 (H_2 a CO_2) o menos al dispositivo 100 a través del conducto de entrada 102.

La introducción del gas sustrato en el reactor 108 por medio de la boquilla 106, que conduce a la mezcla del medio acuoso 116 con el gas sustrato, asegura que un número mucho mayor de organismos metanogénicos entren en contacto con el gas sustrato por unidad de tiempo en el caso dinámico y, por tanto, que un número mayor de organismos metanogénicos pueda producir metano por unidad de tiempo que en el caso estático. En el caso estático, la reacción o superficie de contacto entre un medio acuoso 116 que se encuentra en el reactor y el gas sustrato se corresponde aproximadamente con la superficie del medio. En el caso dinámico, por el contrario, es decir, de acuerdo con la enseñanza de acuerdo con la invención presentada en esta descripción, esta área es considerablemente mayor, ya que a la superficie ya rugosa y, por tanto, mayor, del medio acuoso 116 en el reactor 108 (indicada por la línea ondulada dentro del reactor 108) debe añadirse la suma de las superficies de las burbujas de gas que atraviesan el medio acuoso 116, pudiendo presentar tendencialmente al principio del reactor tubular 108, las burbujas de gas exclusivamente gas sustrato, pudiendo presentar idealmente hacia su final las burbujas de gas casi exclusivamente el producto final metano y, entre medias, pudiendo presentar el gas que forma las burbujas cualquier proporción de gas sustrato y metano.

Para aumentar aún más la superficie de contacto entre el gas sustrato y el medio acuoso 116, el reactor 108 también puede presentar opcionalmente al menos un elemento mezclador 124. El al menos un elemento mezclador 124 puede ser al menos un elemento que sea apropiado para mezclar el gas sustrato que se encuentra en el reactor 108 con el medio acuoso 116. El al menos un elemento mezclador 124 puede ser, por ejemplo, un elemento mecánicamente dinámico y puede estar diseñado, por ejemplo, como una rueda de agua giratoria, un mezclador de chorro guía, un agitador de turbina, un agitador de hélice o, por ejemplo, un mezclador tubular, no debiendo considerarse en modo alguno esta como una enumeración cerrada de posibles elementos mezcladores. Sin embargo, el al menos un elemento mezclador 124 también puede ser un elemento mecánicamente estático, por ejemplo, un tamiz atomizador que convierta burbujas de gas sustrato grandes en burbujas de gas sustrato más pequeñas. El al menos un elemento mezclador 124 también puede presentar al menos un elemento mecánicamente dinámico y otro mecánicamente estático.

Además, como se ilustra en la figura 1, el dispositivo 100 ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos presenta al menos dos válvulas, concretamente, la primera válvula 104 y la segunda válvula 112. En el dispositivo 100 pueden verse claramente otros elementos técnicos de fluido, como otras válvulas, caudalímetros y compresores, según sea necesario. Por medio de la primera válvula 104 y la segunda válvula 112, la parte del dispositivo 100 ejemplar entre el conducto de entrada 102 que alimenta el gas sustrato y la primera salida 114 que descarga la fase gaseosa que presenta gas metano del dispositivo de separación de gas 110 puede exponerse a un gradiente de presión que permita la carga del reactor 108 y provoque un flujo de fluido desde el reactor 108 al dispositivo de separación de gas 110. El nivel de presión inferior (es decir, la presión en la segunda válvula 112) del gradiente de presión puede situarse a presión ambiente (presión atmosférica). Sin embargo, si es necesario, el nivel de presión más bajo también puede estar a una presión más alta que la presión ambiente, por ejemplo, de unos 50 mbar, por ejemplo, 100 mbar, por ejemplo, 200 mbar, por ejemplo, 500 mbar o más por encima de la presión ambiente. Esto puede resultar ventajoso, ya que de esta manera se previene eficazmente que entre oxígeno en el dispositivo 100, lo que generalmente puede tener un efecto negativo en la duración de la vida y/o en el número de microorganismos metanogénicos. La primera válvula 104 también puede utilizarse para controlar la cantidad de gas sustrato alimentado al reactor 108 por unidad de tiempo y su

proporción en la mezcla. Esto último también se puede ajustar proporcionando alimentaciones separadas para H₂ y CO₂ y dos correspondientes primeras válvulas.

La conversión efectiva del gas sustrato por medio de los microorganismos metanogénicos en el gas producto metano se basa, entre otras cosas, en una mezcla altamente turbulenta de gas/agua/bacterias dentro del reactor tubular 108 con una velocidad de flujo suficiente del medio acuoso 116, que puede situarse, por ejemplo, en el rango de aproximadamente 3 m/s a aproximadamente 10 m/s cuando se utilizan mezcladores tubulares estáticos, por ejemplo, en el rango de aproximadamente 3 m/s a aproximadamente 5 m/s. Cuando se utilizan mezcladores tubulares dinámicos con un accionamiento de motor independiente, no se especifica la velocidad del flujo.

El aumento de la tasa de reacción dentro del reactor 108 puede lograrse mediante un mezclado altamente turbulento del medio acuoso 116 con el gas sustrato. Preferentemente, el volumen de gas introducido en el reactor 108 por hora puede ser superior a la capacidad en volumen del propio reactor tubular 108. La relación entre el volumen de gas introducido en el reactor 108 por hora y la capacidad en volumen del mismo puede ser, por ejemplo, de aproximadamente de 5:1 o más, por ejemplo, de aproximadamente 10:1, por ejemplo, de aproximadamente 25:1, por ejemplo, de 50:1 o más. Estos valores se refieren a la introducción de gas en el dispositivo de alimentación 102.

Sobre la base de estas cifras, se hará en este caso un pequeño cálculo aproximado para demostrar el potencial rendimiento del concepto presentado en el presente documento. Partiendo de una relación entre el volumen de gas introducido en el reactor 108 por hora y su capacidad en volumen de 5:1, se puede formar 1 m³ de metano por hora por metro cúbico de volumen de reactor con una conversión casi completa del gas sustrato realizable de acuerdo con la enseñanza de esta descripción. 1 m³ de metano tiene un contenido energético de aprox. 10 kWh. Del desarrollo de 1 m³ de metano por hora a 1 m³ de volumen de reactor con conversión completa de los gases sustrato en metano, se sigue que un correspondiente reactor presenta una potencia de aproximadamente 10 kW por metro cúbico. Por lo tanto, un reactor más grande de 100 m³ tendría una potencia de 1 MW. Si la relación de caudal de gas se aumenta a 25:1 por hora, se podría realizar una planta de reactor con una potencia de 1 MW con un volumen de reactor de solo 20 m³ si los gases sustrato se convirtieran completamente en metano. No obstante, debe subrayarse en este caso que se trata de un cálculo ejemplar que pretende ilustrar de manera cuantitativamente aproximada un posible escenario de funcionamiento del dispositivo para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos y que no limita en modo alguno el margen de rendimiento del concepto que se presenta en el presente documento.

El mezclado altamente turbulento del medio acuoso 116 con el gas sustrato dentro del reactor 116 - independientemente de los agentes con que se haya realizado - proporciona un aumento significativo de la superficie de contacto entre el medio acuoso 116 con los microorganismos metanogénicos y el gas sustrato, lo que a su vez proporciona una tasa de reacción significativamente mayor dentro del reactor 108 en comparación con el caso estático mencionado anteriormente. En vista del intenso mezclado del medio acuoso 116, se puede hablar en el presente caso de un funcionamiento más bien atípico del reactor tubular 108 del dispositivo 100 ejemplar para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos, ya que reactores tubulares similares utilizados en química suelen presentar un mezclado axial insignificante durante el funcionamiento. Sin embargo, en el procedimiento de fabricación de metano presentado en el presente documento, utilizando como ejemplo el dispositivo 100 de la figura 1, es este mezclado, entre otras cosas, lo que garantiza una mayor tasa de reacción dentro del reactor y, por lo tanto, un rendimiento de metano significativamente mayor en comparación con las condiciones de fabricación convencionales. En este contexto, la boquilla 106 de la figura 1 puede verse desde el punto de vista funcional como un dispositivo de aumento de la reacción, ya que el chorro propulsor que genera en el reactor 108 provoca una circulación del medio acuoso 116 y, por tanto, el aumento de la tasa de reacción puede lograrse mediante el mencionado aumento de la superficie de contacto. El elemento mezclador 124 opcional proporcionado en el reactor 108 también contribuye a la circulación del medio acuoso 116 dentro del reactor tubular 108 y, por tanto, también puede asociarse funcionalmente al dispositivo de aumento de la reacción.

La forma de realización ejemplar del dispositivo 100 para la fabricación de metano que se muestra en la figura 1 y que se ha descrito hasta ahora representa una posibilidad de cómo puede tener lugar una conversión altamente eficiente del sustrato gas a metano de acuerdo con la enseñanza presentada en el presente documento. A continuación, se describen otras formas de realización ejemplares sobre la base del dispositivo de la figura 1. A este respecto, partiendo de la figura 1, los elementos funcionalmente idénticos están provistos de las mismas referencias y no se vuelven a describir con mayor detalle.

En la figura 2 se muestra otra forma de realización ejemplar de un dispositivo 200 para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos. A diferencia de la forma de realización mostrada en la figura 1, el dispositivo 200 se basa en un reactor de tanque agitado 202 (en inglés: STR, *stirred tank reactor* o CSTR, *continuous stirred tank reactor*) en el que se encuentra el medio acuoso 116, perteneciendo el reactor de tanque agitado 202 a la categoría de reactores sumergibles. El reactor de tanque agitado 202 presenta un agitador 204 que actúa funcionalmente como elemento mezclador. En el agitador 204, por ejemplo, en la superficie de sus palas del rotor, se pueden prever aberturas de las que puede escapar gas. Al igual que en el dispositivo 100 mostrado en la figura 1, el gas sustrato también se alimenta en este caso al reactor a través del conducto de entrada 102. El gas sustrato puede entonces, como se muestra en la figura 2, descargarse del propio agitador 204, por ejemplo, de sus

5 palas de rotor, durante su rotación (movimiento de agitación) o alternativamente ser introducido en el medio acuoso 116 por medio de un dispositivo de introducción independiente del agitador 204. Tal dispositivo de introducción puede estar dispuesto, por ejemplo, en el fondo del reactor de tanque agitado 202 e introducir el gas sustrato en el medio acuoso 116 a través de un número de aberturas. En ambos casos, se consigue una mezcla óptima del gas sustrato con el medio acuoso 116. El mezclado óptimo del gas sustrato con el medio acuoso 116 puede lograrse mediante la rotación del agitador 204 o la interacción del agitador 204 con el dispositivo de introducción dispuesto debajo (no mostrado en la figura 2), como se ilustra mediante las burbujas de gas que se elevan en el medio acuoso 116 representadas claramente en la figura 2. Puede ser deseable una intensa formación de burbujas de gas, ya que así se puede ampliar significativamente la superficie de reacción entre el gas sustrato introducido en el reactor de tanque agitado 202 y el medio acuoso 116. Desde el punto de vista de este aspecto, la formación de muchas pequeñas burbujas de gas puede ser mejor que la formación de menos burbujas de gas más grandes. Además, puede ser ventajosa una alta recirculación de gas que pueda causar un tiempo de contacto y una superficie de contacto aumentados entre el medio acuoso y el gas del sustrato. Los microorganismos metanogénicos en el medio acuoso 116 -adicionalmente a la alimentación en la capa límite entre el medio acuoso 116 y la fase gaseosa situada por encima del mismo dentro del reactor de tanque agitado 202- pueden alimentarse con los gases producto H_2 y CO_2 a través de la superficie de cada burbuja de gas, de tal modo que, en una primera aproximación, se puede utilizar todo el volumen del medio líquido 116 para formar metano. Para favorecer la formación de pequeñas burbujas de gas, el agitador 204 puede presentar correspondientes elementos como tamices u otras estructuras de malla fina sobre su superficie.

20 Mediante el primer ramal de recirculación 118, la fase gaseosa, que puede contener gas sustrato no convertido y que se acumula por encima de la superficie del medio acuoso 116 en el interior del reactor de tanque agitado 202, puede descargarse y añadirse a través de un compresor 206 al gas sustrato alimentado al conducto de entrada 102, garantizando así un mezclado aumentado, más turbulento, de las fases en el interior del reactor de tanque agitado 202.

25 En la figura 3 se representa otra forma de realización ejemplar de un dispositivo 300 para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos. El dispositivo 300 se basa en un reactor sumergible 302. La boquilla 106 está dispuesta en el fondo del reactor sumergible 302, por ejemplo, una boquilla propulsora de inyección mediante la cual se puede generar un chorro propulsor e inyectarse desde el fondo del reactor sumergible 302 en el medio acuoso 116. Con la boquilla 106, por un lado, se puede lograr una convección forzada del medio acuoso 116 con aporte de energía y, por otro lado, el medio acuoso 116 puede mezclarse turbulentamente con el gas sustrato. Desde un punto de vista funcional, la boquilla 106 se corresponde con el dispositivo de aumento de la reacción, pudiendo estar previsto, evidentemente, en el reactor sumergible 302 adicionalmente al menos un elemento mezclador 124, como se ha descrito anteriormente en relación con el dispositivo mostrado en la figura 1. La boquilla 106 se abastece con fluidos de la misma manera que en el caso del dispositivo 100 mostrado en la figura 1, concretamente, con el gas sustrato, con el medio acuoso 116 a través del segundo ramal de recirculación 122 y, opcionalmente, con la fase gaseosa desde el interior del reactor sumergible 302.

40 Otra forma de realización ejemplar de un dispositivo 400 para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos se representa en la figura 4, en la que se utiliza una torre de pulverización 402 como reactor. El gas sustrato se introduce en el interior de la torre de pulverización 402 por medio de la primera válvula 104. Por medio del segundo ramal de recirculación 122, el medio acuoso 116 se transporta hacia arriba a un dispositivo de dispersión 404, por ejemplo, una boquilla de atomización. En este ejemplo de realización, el medio acuoso 116 se atomiza en gotas 406 muy finas y se pulveriza en el techo de la torre de pulverización 402 en este. El dispositivo de dispersión 404 es, por tanto, desde el punto de vista funcional, un dispositivo que aumenta la reacción. Cuanto más finas sean las gotas 406 generadas por el dispositivo de dispersión 404, mayor será la superficie de contacto entre el medio acuoso 116 y el gas sustrato y mayor será la tasa de reacción de la conversión. Contrariamente a la ilustración de la figura 4, el gas sustrato también puede introducirse a través del conducto de entrada 102 por debajo de la superficie del medio acuoso 116 en la torre de pulverización 402, por ejemplo, a través de una abertura de salida o de una correspondiente disposición de aberturas de salida dispuestas muy cerca unas de otras, de tal modo que el gas sustrato pueda pasar primero a través del medio acuoso 116 presente en la torre de pulverización 402 como columna de líquido, y la producción de gas metano también pueda tener lugar ya en esta columna de líquido. En general, los dispositivos de aumento de la reacción presentados en esta solicitud pueden combinarse entre sí de cualquier manera conveniente para maximizar la superficie de contacto entre el gas sustrato y el medio acuoso 116 y, por tanto, los microorganismos metanogénicos, con el fin de maximizar la tasa de reacción de la producción de metano.

50 La figura 5 muestra otra forma de realización del dispositivo para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos en la que se utiliza un reactor de lecho percolador 502. El dispositivo 500 es similar en construcción al dispositivo mostrado en la figura 4. Adicionalmente, sin embargo, se proporciona una matriz 504 porosa o en forma de panal en la que el medio líquido 116 pulverizado desde arriba puede gotear hacia abajo. La superficie interna de la matriz 504, por ejemplo, el tamaño de los poros o panales en su interior, define a este respecto la superficie de reacción. La matriz 504 puede estar revestida de un material o estar compuesta de este, por ejemplo, vidrio, plástico, ceniza de lava, que garantice una humectación uniforme y completa de la matriz 504 y/o evite que el medio acuoso 116 se filtre a través de la matriz 504 demasiado rápido. En el dispositivo 500 para la

fabricación de metano mostrado en la figura 5, el dispositivo de aumento de la reacción está formado por la matriz 504 y el dispositivo de dispersión 404, ya que la interacción de estos dos dispositivos posibilita una superficie de reacción mucho mayor entre el medio acuoso 116 y el gas sustrato en comparación con el caso estático.

5 En la figura 6 se muestra otra forma de realización del dispositivo para la fabricación de metano por medio de microorganismos metanogénicos en la que se utiliza un reactor propulsor de inyección 602. En este sentido, el gas sustrato y el medio acuoso 116 se alimentan desde el exterior a la boquilla 106, por ejemplo, una boquilla propulsora de inyección, dispuesta en el techo o en la parte superior del reactor propulsor de inyección 602. La boquilla 106 también puede succionar la fase gaseosa directamente del interior del reactor propulsor de inyección 602, lo que se
10 corresponde con el primer ramal de recirculación opcional 118. El chorro propulsor generado por la boquilla 106 puede introducirse o inyectarse en el medio acuoso 116, dando lugar a su mezclado turbulento con el gas sustrato. Por ejemplo, el chorro propulsor puede introducirse en el medio acuoso 116 por medio de un tubo 604, pudiendo estar previstas aberturas finas a los lados del tubo 604 a través de las cuales ya puede introducirse en el medio acuoso 116 una parte del gas sustrato que fluye hacia abajo. Puede ser ventajoso si el extremo del tubo 604
15 alargado está dispuesto cerca del fondo del reactor propulsor de inyección 602, de tal modo que el chorro propulsor pase a través de una proporción relativamente grande del medio acuoso 116.

La figura 7 representa una forma de realización ejemplar de un dispositivo para fabricar metano (símbolo CH_4) por medio de microorganismos metanogénicos por reacción de hidrógeno (símbolo H_2) y dióxido de carbono (símbolo CO_2). El dispositivo es un reactor sumergible. De acuerdo con la invención, las macrocolonias metanogénicas, los llamados gránulos, se colocan con altas densidades en un biorreactor sumergible que está lleno mayoritariamente de líquido nutritivo. El abastecimiento de los organismos con su sustrato, una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono, tiene lugar a través de un gaseado intensivo del líquido nutritivo en el que se encuentran los organismos. Esto se consigue haciendo funcionar el reactor a una presión superior a la atmosférica (12) para aumentar la solubilidad del hidrógeno. Además, el reactor se mezcla por medio de una recirculación interna de gas (4). El reactor dispone a este respecto de una parte aguas arriba gasificada (A) y una parte aguas abajo no gasificada (B). El gas de la fase gaseosa situado por encima de la fase líquida se introduce a presión en la parte gasificada, generando así un flujo ascendente de una mezcla gas-líquido-gránulos. En la parte superior del reactor, el gas se libera a la fase gaseosa, de tal modo que una mezcla de medio nutriente-gránulos pueda fluir de regreso hacia abajo en la parte no gasificada (B). La cantidad de gas recirculado (4) por unidad de tiempo es a este respecto muy superior a la cantidad de mezcla gaseosa alimentada al reactor (3).

Varios reactores sumergibles (R_1 a R_n) de este tipo pueden funcionar consecutivamente en serie como cascada (véanse las figuras 8, 9 y 10). A este respecto, una cierta cantidad de gas fluye desde los reactores delanteros hacia los reactores situados en cada caso detrás de ellos. Si los reactores funcionan con presiones de gas diferentes, se establecen condiciones diferentes en los reactores y un flujo de tapón. De esta manera, el sustrato gaseoso puede convertirse en gran medida en metano. Este procedimiento puede contribuir a aprovechar picos no utilizables de producción de energía eléctrica para convertirla en una forma almacenable, el metano rico en energía. A este respecto, el procedimiento consume dióxido de carbono, que no necesita presentarse en forma pura. En comparación con procedimientos químicos, el método de biometanización de acuerdo con la invención tiene lugar en condiciones naturales. Las bacterias metanogénicas pueden sobrevivir sin nutrientes durante largos períodos de tiempo. De este modo, se puede reaccionar de forma flexible a la demanda.

En todas las formas de realización del dispositivo para la fabricación de metano mediante microorganismos metanogénicos representadas en el presente documento, el CO_2 puede obtenerse a partir de un gas de escape, por ejemplo, de una planta de incineración de residuos o de una central eléctrica, como una central eléctrica de carbón. Para este propósito, el dispositivo de acuerdo con la invención puede presentar un dispositivo de enriquecimiento que, por ejemplo, presente un recipiente de presión lleno de agua a través del cual pueda pasar gas de escape. Dado que el CO_2 es más soluble que el N_2 y el O_2 , el agua puede enriquecerse con CO_2 a presión. Los gases de escape se pueden extraer del dispositivo de enriquecimiento mediante reducción de la presión. Mediante una nueva reducción de la presión, el CO_2 puede finalmente disolverse del agua y alimentarse como gas sustrato a la boquilla 106 y utilizarse, por ejemplo, junto con el medio acuoso 116 recirculado, para formar el chorro propulsor. Los residuos de oxígeno pueden eliminarse química o biológicamente antes de la alimentación a la boquilla 106.

En comparación con procedimientos químicos por catálisis, el procedimiento de acuerdo con la invención también puede llevarse a cabo con gases no puros. Se suprimen etapas para purificar los gases. En comparación con otros métodos de biometanización, pueden ajustarse densidades de biomasa definidas específicamente y, si es necesario, producirse. Además, la recirculación interna del gas garantiza un buen suministro de gas a los organismos.

60 Ejemplo de realización 1

Se alimenta agua en el reactor con sales nutritivas para un medio de agua dulce según Widdel (1980), así como un por mil de oligoelementos según Imhoff-Stuckle *et al.* (1983). Se calienta el agua en el reactor a aprox. 60 - 70 °C, se sustituye la atmósfera con N_2 . Se cierra el reactor. Se deja enfriar el agua hasta aprox. 40°C a atmósfera N_2 y se añade N_2 a este respecto hasta una presión de aprox. 0,2 bar. Se añade un por mil de solución vitamínica según Balch *et al.* (1979). Se reduce NaS a $< -0,2$ V. Se añaden macrocolonias bacterianas activas y metanogénicas, los

llamados gránulos, de una planta anaeróbica de tratamiento de aguas residuales industriales (por ejemplo, una fábrica de papel o una industria alimentaria) en concentración suficiente (aprox. un 1% de materia seca). Se ajusta la temperatura de 35 hasta 38°C y el pH a aprox. 7. Se inicia mezclado del reactor. Se alimenta el reactor por unidad de tiempo con una cantidad definida de gases sustrato (H₂/CO₂) en una relación de aprox. 4:1 a una presión de 0,2 bar. Se mantiene una presión de 0,2 - 0,1 bar en el reactor. Se vacía la mezcla gaseosa resultante del reactor a una presión de > 0,2 - 0,1 bar.

Bibliografía

- 10 • Balch, W.E.; Fox, G.E. Magrum, L.J.; Woese, C.R. ; Wolfe, R.S. (1979): Methanogenesis: Reevaluation of a unique biological group. *Micobiol. Review* 43, 260 -296
- 15 • Bajohr *et al.*: Speicherung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie in der Ergasinfrastruktur, DVGW- Studie, 2011
- Brunner, M. (1987): “Anaerober mikrobieller Abbau von 3-Chlor-Benzoesäure zu Biogas” (1987), tesis doctoral para la obtención del grado de doctor de la Facultad de Matemáticas y Ciencias Naturales de la Universidad de Düsseldorf
- 20 • Brunner, M.; Schoberth, S.M.; Sahm, H. (1987): Anaerober mikrobieller Abbau von halogenierten Aromaten zu Biogas. *Chem.-Ing.-Tech.* 59 (1), 55-57
- Brunner, M. (1989): “Neue Erfahrungen mit der anaeroben Abwasserreinigung mittels UASB-Reaktoren in der Papierindustrie”, *Allgemeine Papierrundschau* 11/1989
- 25 • Brunner, M., Dietrich, P. (1988):” Konzepte zur anaeroben Abwasserreinigung in der Fruchtsaftindustrie”, *Confructra* 32 III/IV, 118 – 125
- Das Erdgasnetz als Systemintegrator zur Verstetigung von Wind- und Solarstrom, *energie - wasserpraxis*, 2010
- 30 • DVGW-Arbeitsblatt G 262 “Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung”, November 2004
- Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger, *Energietechnische Gesellschaft im VDE*, Frankfurt, 2009
- 35 • Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und Internationale Entwicklung, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010
- 40 • George A. Olah *et al.* (2008): *Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether* Loker Hydrocarbon Research Institute and Department of Chemistry, University of Southern California, 2008
- Guiot *et al.* (2011): Potential of wastewater-treating anaerobic granules for biomethanation of synthesis gas”, *Environmental Science & Technology* Vol. 45, 2006-2012
- 45 • Hartmut Wendt (1984): Neue konstruktive und prozesstechnische Konzepte für die Wasserstoffgewinnung durch Elektrolyse, *Chem. Ing. Tech* 56, 1984
- Immhof-Struckle, D. und Pfennig, N. (1983): Isolation and characterisation of a nicotinic acid-degrading sulfat-reducing bacterium, *desulfococcus niacini*. *Arch. Microbiol.* 136, 194-198
- 50 • Kopyscinski *et al.*: Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass - A technology review from 1950 to 2009, General Energy Research Department, Paul Scherrer Institut, Villingen, Suiza
- 55 • Klaus, T. *et al.* (2010): *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*, Umwelt Bundesamt, Dessau-Roßlau 2010
- Marcus Reppich: Vergleich verschiedener Aufbereitungsverfahren von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz, *Chem. Ing. Tech.* 81 N° 3, 2009
- 60 • Pehnt, Martin; Höpfner Ulrich: *Kurzgutachten Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energie-system mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive*, ifeu -Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH, por encargo del Ministerio Federal de Medioambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad de los Reactores (BMU), Heidelberg, Mai 2009; V. 1.1
- 65 • Power to Gas: Untersuchungen im Rahmen der DVGW-Innovationsoffensive zur Energiespeicherung, *energie I*

wasser-praxis, 2011

- Sahm, H. (1981): Biologie der Methanbildung, Chem.-Ing. Tech. 53 (11), 854-863
- 5 • Sahm, H. (1984): Anaerobic wastewater treatment. Ad. Biochem. Eng. Biotech. 29, 83-115
- Sahm, H.; Brunner, M.; Schoberth, S.M. (1986): Anaerobic degradation of halogenated aromatic compounds. Microbial Ecology 12, 147-153,
- 10 • Schoberth, S.M., Brunner, M., Sahm, H. (1984): "Anaerobic degradation of 3-chlorbenzoic acid to methane in a defined medium", IAWPRC Symposium on Forest Industry Waste Water, Tamper
- Schoberth, S.M., Brunner, M., Sahm, H. (1988): "Anaerober Abbau von Halogenaromaten", Gas-Wasser-Fach 129, (1), 32 – 34
- 15 • Sterner, M.(2009): Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche, Abschlussbericht, Fraunhofer IWES, 2009
- Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems, Limiting global warming by transforming energy systems, tesis doctoral, Universidad de Kassel, Fraunhofer IWES, 2009
- 20 • Sterner, M.; Specht, M. (2010): Erneuerbares Methan. Eine Lösung zur Integration und Speicherung erneuerbarer Energien und ein Weg zur regenerativen Vollversorgung, In Solarzeitalter 1/2010
- 25 • Sterner, M. (2011): Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung des Windgas-Angebotes, Fraunhofer IWES, Februar 2011
- Tom Smolinka *et al.* (2011): NOW Studie, Stand und Entwicklungspotential der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Kurzfassung des Abschlussberichts, 2011
- 30 • Vereijken, T., Brunner, M. (1989): "Neue Entwicklungen in der Brauereiabwasserbehandlung", Brauindustrie 6 /1989, 653 – 656
- 35 • Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG), A EE Agentur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz: "Swiss Renewable Power-to-Gas - Erneuerbares Gas aus Strom für die Schweiz", Bern, Juni 2012
- Widdel, F. (1980): Anaerober Abbau von Fettsäuren und Benzoesäure durch neu isolierte Sulfat-reduzierende Bakterien. Tesis doctoral, Universidad de Göttingen
- 40

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para la fabricación de metano mediante microorganismos metanogénicos por reacción de H₂ y CO₂, que presenta:
- 5
- al menos un reactor;
 - un medio acuoso que se proporciona en el al menos un reactor, encontrándose los microorganismos metanogénicos en el medio acuoso;
 - 10
 - un dispositivo de alimentación que está diseñado para la introducción de H₂ y CO₂ en el al menos un reactor, formando el H₂ y el CO₂ una mezcla gaseosa en el mismo;
 - 15
 - un dispositivo de aumento de la reacción que está diseñado para aumentar la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa;
 - 20
 - un equipo de recirculación que está diseñado para la recirculación de al menos una parte del gas acumulado en el reactor, siendo la tasa de recirculación del gas acumulado en el reactor mayor que la tasa de alimentación del gas sustrato en el reactor.
2. Dispositivo según la reivindicación 1, presentando, además:
- un equipo de descarga que está diseñado para la descarga de un gas del al menos un reactor.
3. Dispositivo según la reivindicación 1 o 2, presentando el gas metano y siendo preferentemente la proporción de metano presente en el gas de al menos el 50 %.
4. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 3, donde la tasa de recirculación del gas que se acumula en el reactor supera la tasa de alimentación del gas sustrato en el reactor en al menos el factor 100.
5. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 4, presentando el equipo de recirculación una bomba o un compresor.
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 5, que además presenta:
- un equipo de circulación que está diseñado para hacer circular el medio acuoso a través del al menos un reactor, presentando el equipo de circulación opcionalmente al menos una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección.
7. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 6, estando diseñado el dispositivo como un reactor estacionario o no estacionario, preferentemente un reactor sólido, u opcionalmente un reactor sumergible.
8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 7, estando diseñado el dispositivo como reactor de tanque agitado continuo e ideal (CSTR), reactor de tanque agitado discontinuo e ideal (STR), reactor tubular, reactor de bucle, como reactores conectados en serie o cascada de reactores; y
- presentado el dispositivo de aumento de la reacción preferentemente al menos un lecho percolador, una torre de pulverización, un mezclador tubular o una bomba, preferentemente una bomba propulsora de inyección.
9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 8, presentando el dispositivo de alimentación, además:
- un dispositivo para enriquecer dióxido de carbono de una mezcla de gas; y
- opcionalmente un equipo para la disociación electrolítica de agua;
- estando diseñado preferentemente el equipo de alimentación de tal modo que, al introducir H₂ y CO₂ en el al menos un reactor, la mezcla gaseosa forma un flujo turbulento.
10. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 9, estando dispuesto el equipo de alimentación de tal forma que, durante el funcionamiento, el volumen de H₂ y CO₂ introducido por hora supera la capacidad de al menos un reactor en al menos el factor 2; siendo la presión en el reactor opcionalmente superior o igual a 0,1 bar;
- encontrándose los microorganismos metanogénicos preferentemente en la forma de colonias macroscópicas (gránulos) en el medio acuoso; y

además, no estando inmovilizados opcionalmente los microorganismos metanogénicos en el medio acuoso.

- 5 11. Procedimiento para la fabricación de metano en un dispositivo de reactor por medio de microorganismos metanogénicos que se encuentran en el dispositivo de reactor en un medio acuoso, por reacción de H₂ y CO₂ como mezcla de gas de reacción, donde durante la reacción aumenta la superficie de contacto entre el medio acuoso con los microorganismos metanogénicos y la mezcla gaseosa por medio de un dispositivo de aumento de la reacción, caracterizado porque al menos una parte del gas que se acumula en el reactor se retroalimenta al dispositivo de reactor por medio de un equipo de recirculación, siendo la tasa de recirculación del gas que se acumula en el reactor superior a la tasa de alimentación de la mezcla de reacción en el reactor.
- 10
12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado porque los microorganismos metanogénicos son una mezcla de diferentes microorganismos de la cepa *Euryarchaeota* y porque los microorganismos metanogénicos se alimentan preferentemente al medio acuoso en forma de colonias macroscópicas (gránulos).
- 15
13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 12, caracterizado porque la relación molar de H₂ y CO₂ en la mezcla gaseosa es menor o igual a 4:1.
- 20
14. Uso de un dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 10, para la fabricación de metano mediante microorganismos metanogénicos por reacción de H₂ y CO₂.
- 25
15. Uso de gránulos que contienen microorganismos metanogénicos para inocular un dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 10.

Fig. 1

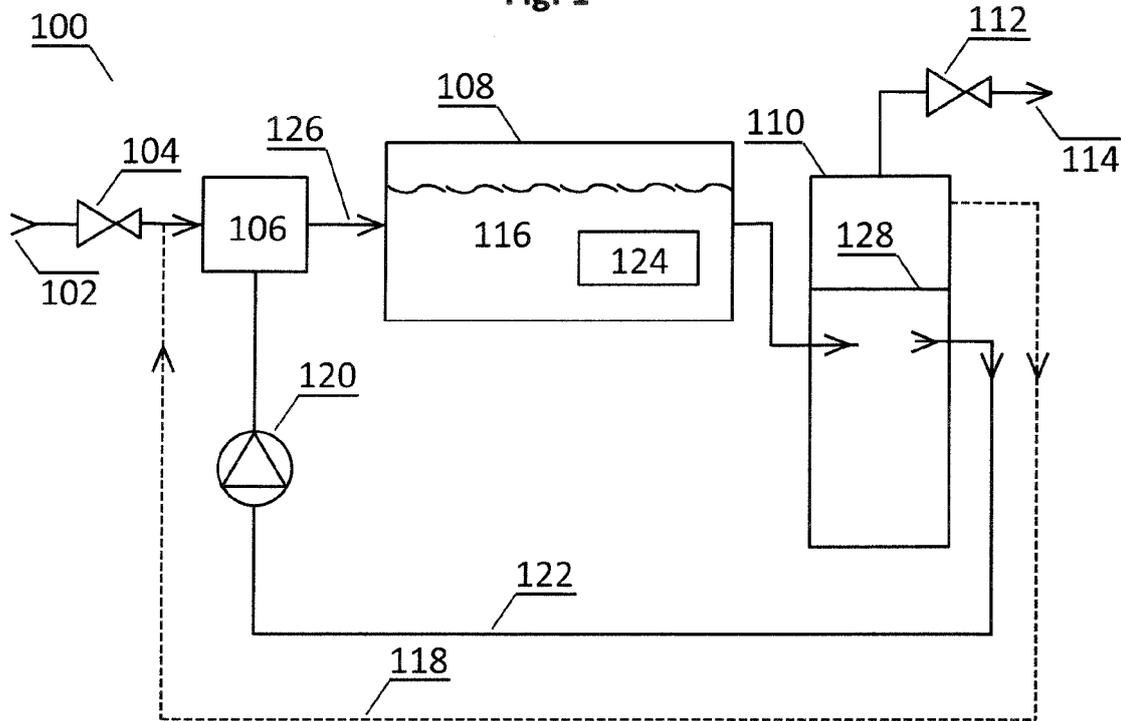


Fig. 2

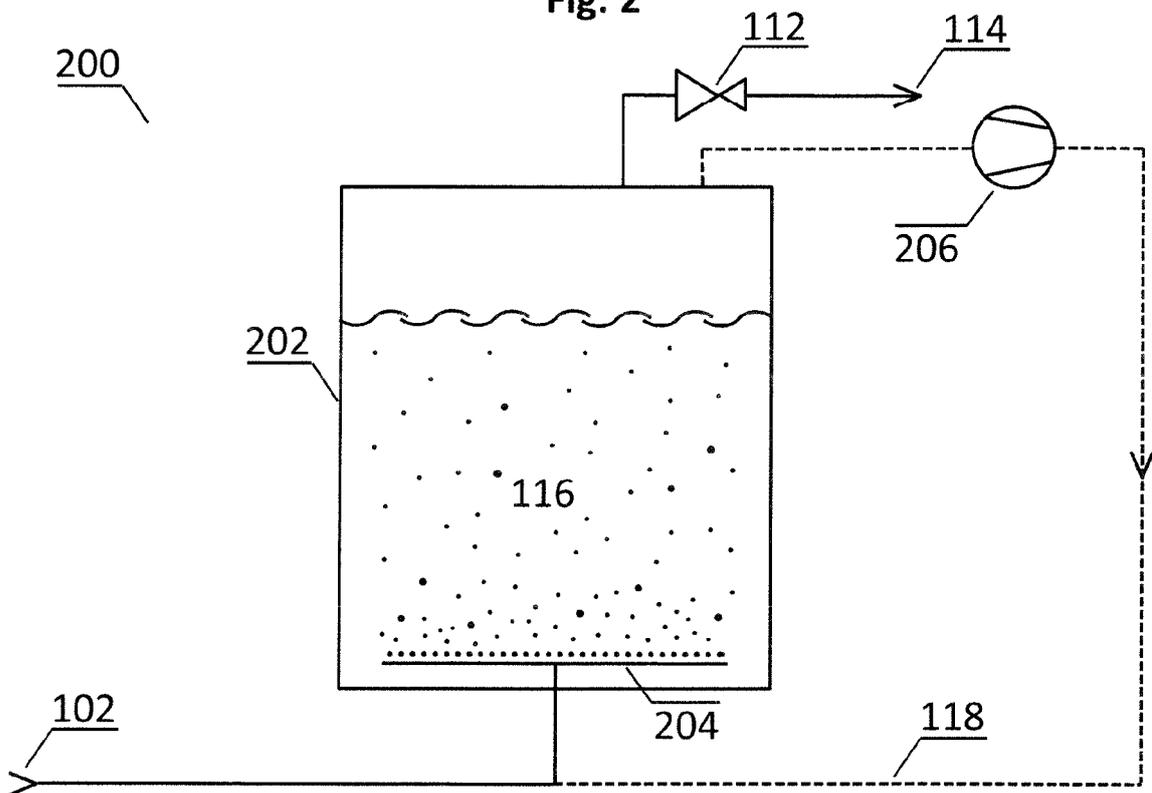


Fig. 3

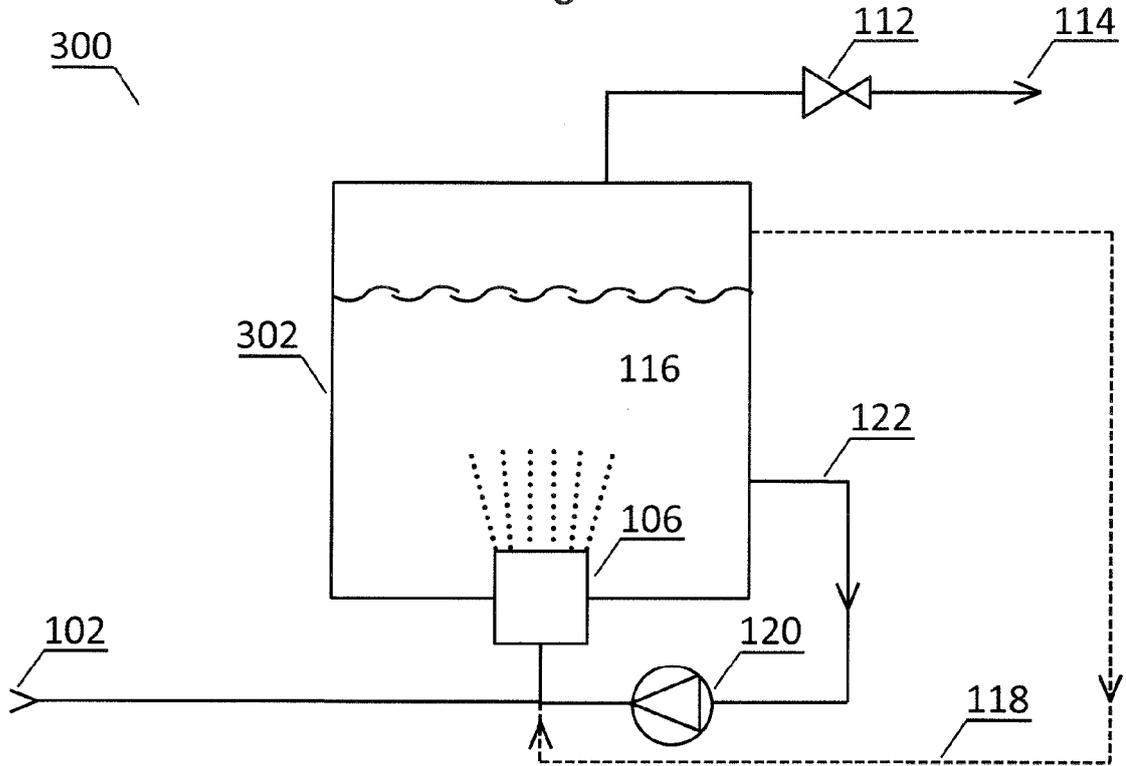


Fig. 4

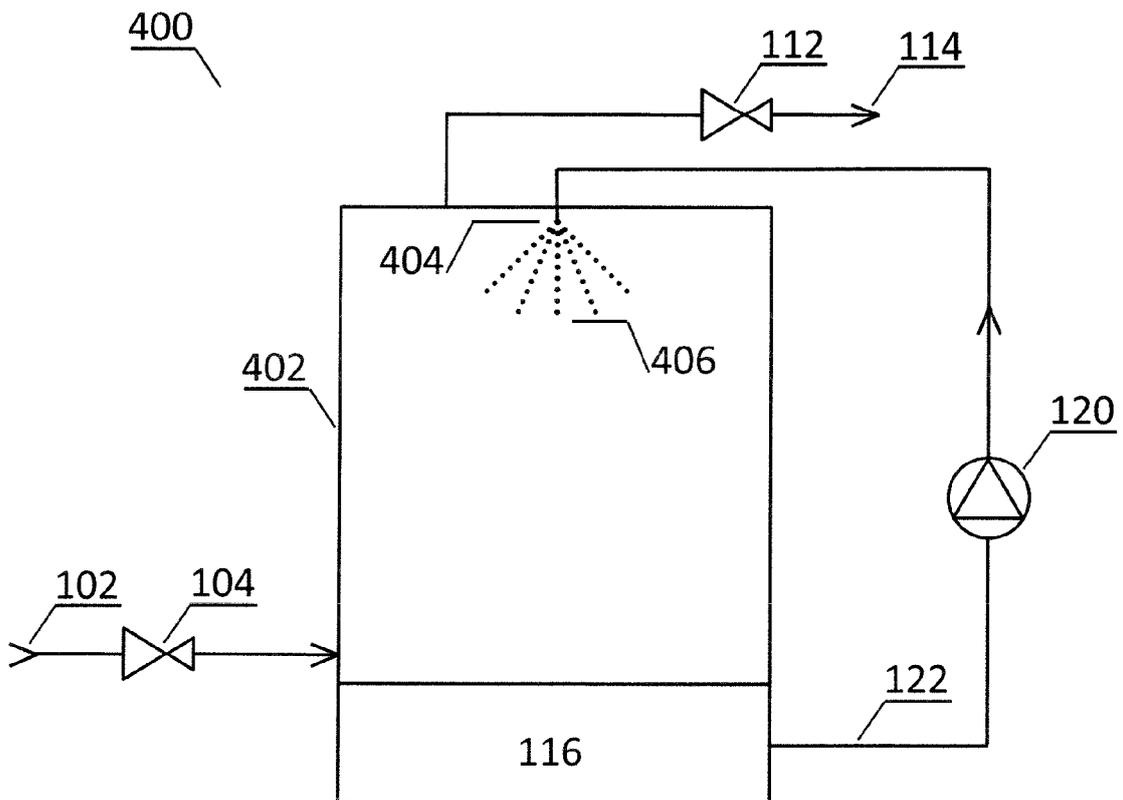


Fig. 5

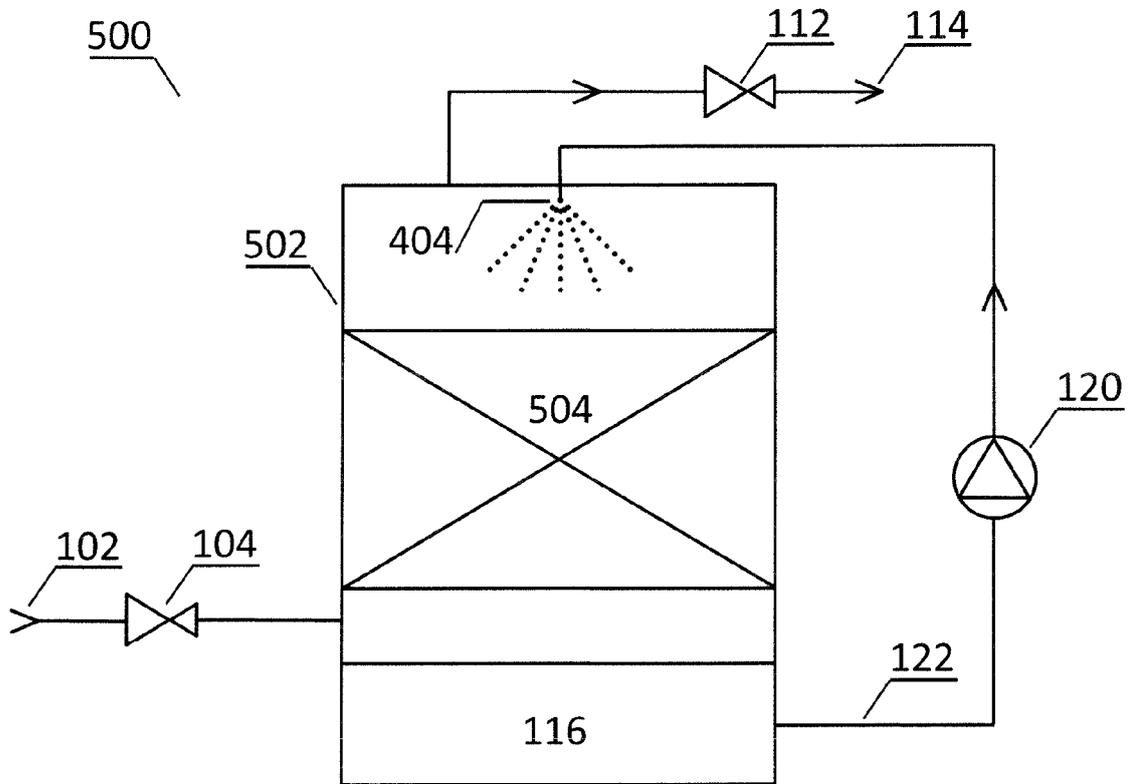


Fig. 6

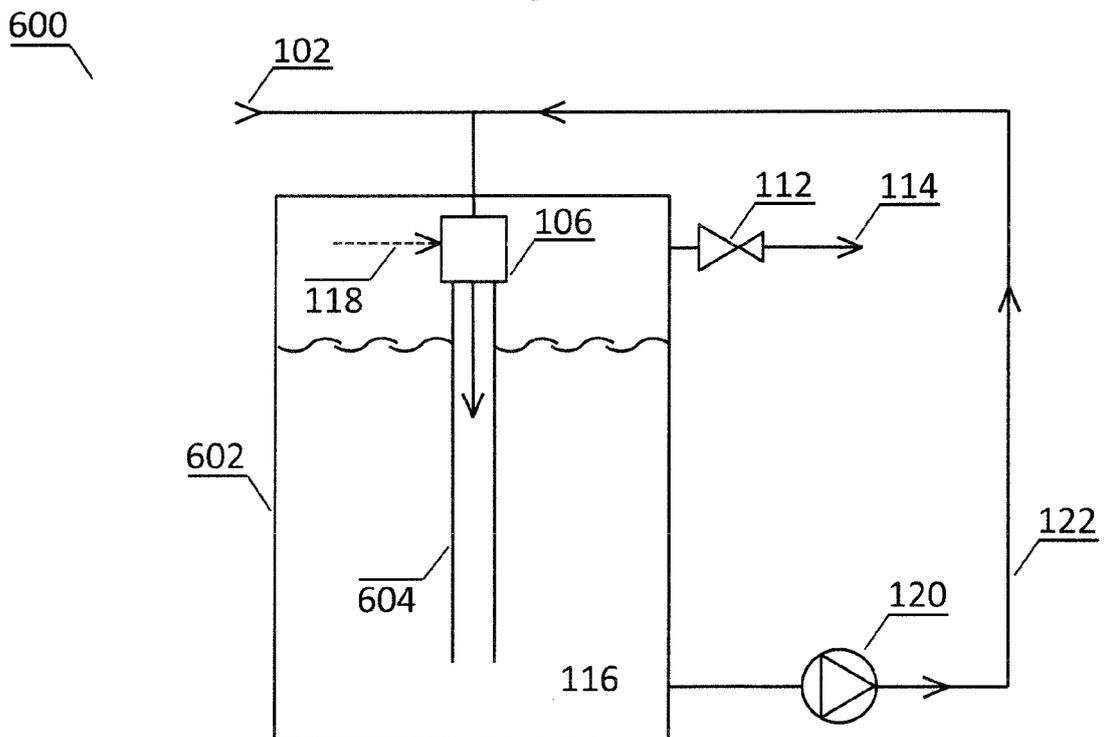


Fig. 7

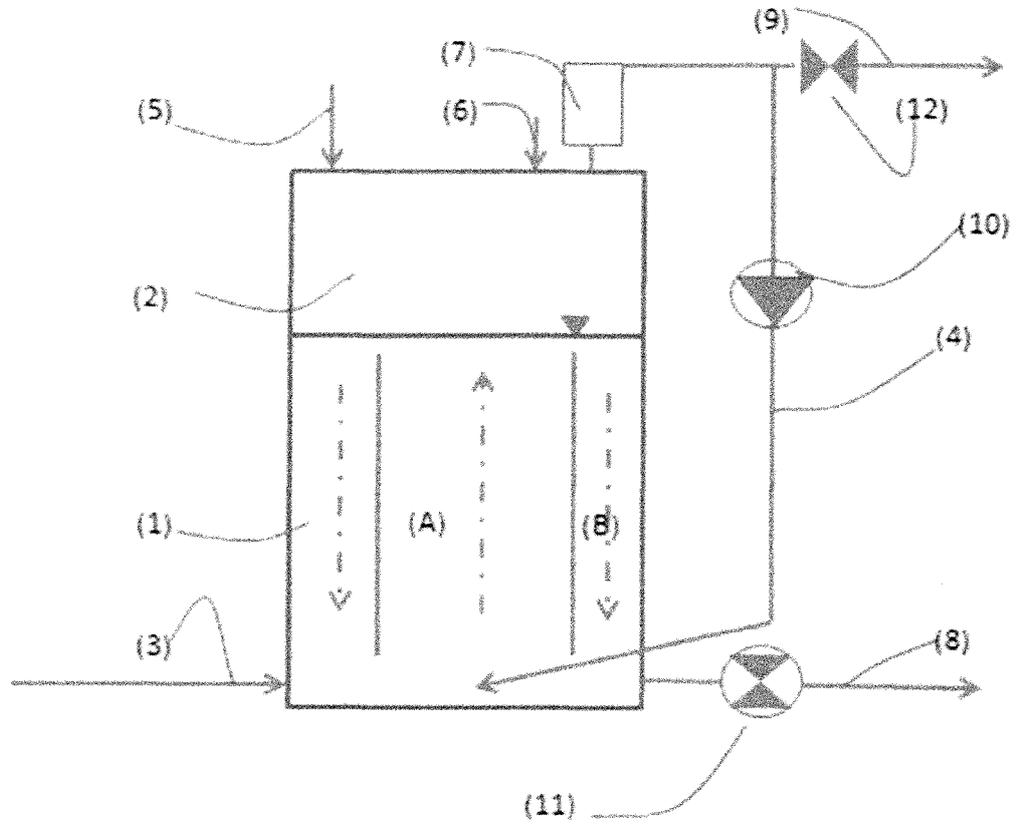


Fig. 8

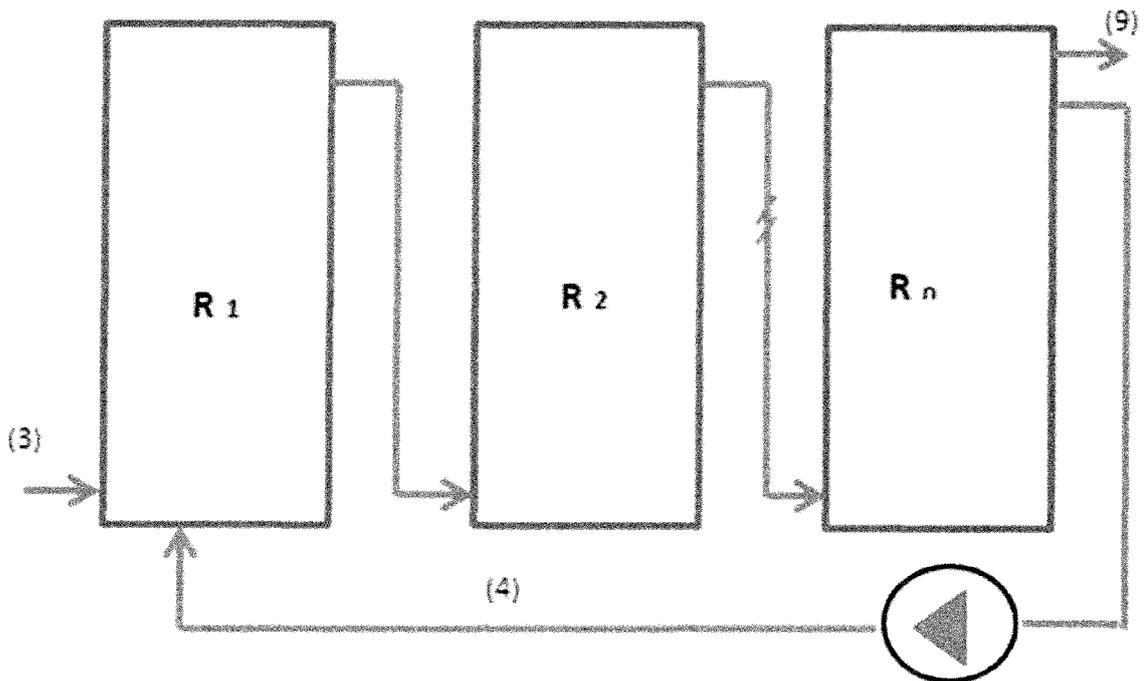


Fig. 9

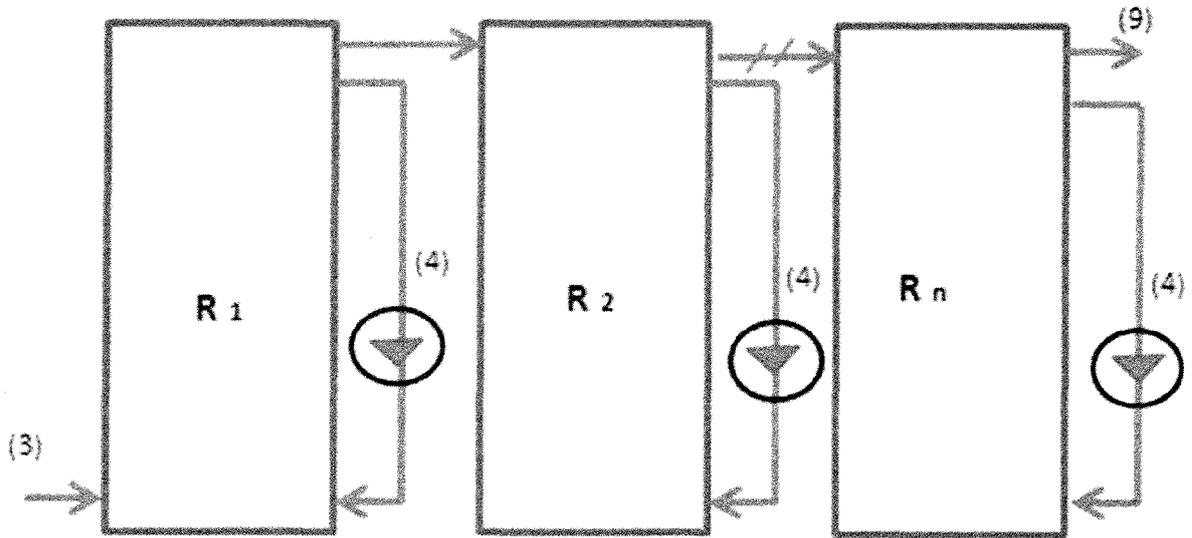


Fig. 10

