

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 763 206**

51 Int. Cl.:

B01D 53/62 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.04.2011 PCT/US2011/034684**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.11.2011 WO11137398**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.04.2011 E 11775671 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2019 EP 2563495**

54 Título: **Método para captura de dióxido de carbono**

30 Prioridad:

03.06.2010 US 351216 P
15.02.2011 US 443061 P
30.04.2010 US 330108 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.05.2020

73 Titular/es:

EISENBERGER, PETER (100.0%)
170 Brooks Bend
Princeton, NJ 08540, US

72 Inventor/es:

EISENBERGER, PETER

74 Agente/Representante:

RIZZO , Sergio

ES 2 763 206 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

Método para captura de dióxido de carbono

Antecedentes

5 La presente invención hace referencia a métodos para retirar gas de efecto invernadero de una atmósfera y, en particular, a métodos para retirar dióxido de carbono de una atmósfera.

Solicitud estadounidense con número de serie 12/124,864

Como se explicó en la solicitud estadounidense número de serie 12/124,864,

10 a. mucha atención está enfocada actualmente en intentar lograr tres objetivos relacionados con la energía y relacionados con energía algo en conflicto. 1) proporcionar energía asequible para desarrollo económico; 2) lograr seguridad energética; y 3) evitar el cambio climático destructivo provocado por el calentamiento global. Sin embargo, no hay una forma viable de evitar el uso de combustibles fósiles durante el resto de este siglo si es que vamos a contar con la energía necesaria para la prosperidad económica y evitar el déficit de energía que podría provocar conflicto.

15 b. Es mayormente indiscutible que un aumento en la cantidad de los denominados gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (el metano y el vapor de agua son los otros principales gases de efecto invernadero) aumentará la temperatura del planeta.

c. Es evidente que no existe una solución que reduzca solamente el aporte humano a las emisiones de dióxido de carbono que pueda eliminar el riesgo de cambio climático. Con la extracción de aire y la capacidad de aumentar o disminuir la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, en principio, se pueden compensar otros gases de efecto invernadero, como el metano, que puedan cambiar su concentración y provocar cambio climático.

20 US 2009/120288 describe un método y aparato para retirar un contaminante, tal como dióxido de carbono, de una corriente de gas, tal como el aire ambiente. El contaminante se retira de la corriente de gas mediante un absorbente que puede regenerarse usando un cambio de humedad, un cambio térmico, o una combinación de estos. El absorbente puede comprender un sustrato con iones positivos incorporados y iones negativos individualmente móviles, en donde los iones positivos están suficientemente separados para evitar las interacciones entre los iones negativos. Cuando se usa un cambio térmico, se puede conservar el calor al emplear un intercambiador de calor para transferir calor desde el absorbente regenerado a una cantidad de absorbente que se carga con el contaminante antes de la regeneración.

30 US 2008/104958 describe centrales energéticas y un proceso para disminuir las emisiones de CO₂ que, en general, incluye extraer una parte del gas de combustión rico en CO₂ recirculado a mitad de camino a través de la vía de compresión de una turbina de gas y retirar el CO₂ en una unidad de separación. La parte restante del gas de combustión rico en CO₂ (es decir, la parte del gas de combustión recirculado que no se suministró a la unidad de separación) se mezcla con aire fresco proveniente de un compresor-expansor adicional y luego regresa nuevamente a la vía de compresión. Como resultado, la recirculación de gas de combustión aumenta la concentración de CO₂ dentro del fluido de trabajo, lo que provoca un aumento adicional en la presión parcial de CO₂. A medida que aumenta la concentración y presión parcial de CO₂, se observa una menor penalización energética para retirar el CO₂. Además, se suministra un menor volumen en la unidad de separación de CO₂ durante la operación. Por consiguiente, es posible reducir el tamaño del equipo de separación, así como la energía necesaria para el proceso de separación.

Sumario de la presente invención

40 La presente invención proporciona conceptos de método nuevos y útiles adicionales para retirar dióxido de carbono de una masa de aire cargado con dióxido de carbono al dirigir el aire cargado con CO₂ a través de una estructura absorbente que se une a (capta) CO₂, y retirar CO₂ de la estructura absorbente (y, así, regenerar de manera eficaz la estructura absorbente) al usar calor del proceso, preferiblemente en forma de vapor, para calentar la estructura absorbente. En la presente solicitud, la estructura absorbente comprende preferiblemente una amina que se une a CO₂, y que es transportada por un sustrato, que puede estar en forma de partículas sólidas o puede ser una estructura absorbente monolítica. Independientemente de si el sustrato es un lecho de material particulado o una forma monolítica, el absorbente preferiblemente se absorberá en las superficies del sustrato. Además, en la presente solicitud, la referencia a una «masa» (o «flujo» o «corriente») de «aire cargado de CO₂ (o aire cargado de dióxido de carbono)» se refiere a aire en una ubicación particular con una concentración de CO₂ similar a la concentración de CO₂ en la atmósfera en dicha ubicación particular, y a la temperatura en dicha ubicación.

50 Anteriormente se creía que cuando el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a través de un sustrato que se recubre con (o tiene incorporado en este) un absorbente que absorbe o se une a dióxido de carbono, para retirar el dióxido de carbono del aire. El calor de proceso convertido en la forma de corriente u otro medio (p. ej., gas) se dirige al absorbente, para separar el dióxido de carbono del absorbente (para que el dióxido de carbono pueda extraerse y aislarse), y para regenerar el absorbente (para que el absorbente pueda continuar utilizándose para retirar el dióxido

de carbono del aire).

En uno de sus aspectos básicos, la presente solicitud proporciona estructuras y técnicas adicionales para separar el dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono, y utilizar el calor del proceso para separar el dióxido de carbono de un absorbente y regenerar el absorbente.

- 5 Además, en otro de sus aspectos, la presente solicitud proporciona algunas estructuras y técnicas adicionales que se pueden utilizar para captar el dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono, y utilizar el calor del proceso para separar el dióxido de carbono de un absorbente y regenerar el absorbente, y que permite además llevar a cabo la separación y regeneración del dióxido de carbono directamente en línea con una fuente de gases de combustión que de otro modo emanarían directamente de dicha fuente y dirigirían el aire cargado de dióxido de carbono hacia la atmósfera.

10 Además, la presente descripción proporciona una fuente de CO₂ relativamente de bajo costo y relativamente pura para usos beneficiosos como el suministro de granjas de algas para producción de biocombustibles, donde los costos de captura representan el costo total del suministro de CO₂.

- 15 Estas y otras características de la presente invención se describen en, o son evidentes a partir de, la siguiente descripción detallada, y los dibujos adjuntos. La presente invención proporciona un método para retirar y concentrar el dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono como se indica en la reivindicación 1. Se presentan características opcionales de la invención en las reivindicaciones 2 a 10.

Breve descripción de las figuras y exposiciones

- 20 Las Figuras 1-9 ilustran el sistema y conceptos de método descritos en una solicitud estadounidense anterior de este mismo inventor, número de serie estadounidense 12/124,864; Específicamente,

a. La Figura 1 es un diagrama de bloques generalizado de un sistema para retirar el dióxido de carbono de una atmósfera de acuerdo con un ejemplo de forma de realización de la invención del número de serie estadounidense 12/124,864;

- 25 b. La Figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema para retirar el dióxido de carbono de una atmósfera de acuerdo con un ejemplo de forma de realización de la invención del número de serie 12/124,864;

c. La Figura 3 es un diagrama de bloques de un sistema de extracción de aire de acuerdo con un ejemplo de forma de realización de la invención del número de serie 12/124,864;

d. La Figura 4 es un mapa que ilustra un termostato global de acuerdo con un ejemplo de forma de realización de la invención del número de serie 12/124,864;

- 30 e. La Figura 5 es un diagrama de bloques de un sistema para retirar el dióxido de carbono de una atmósfera de acuerdo con un ejemplo de forma de realización de la invención del número de serie 12/124,864;

f. La Figura 6 es una ilustración esquemática de una versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio, de acuerdo con la invención de número de serie 12/124,864;

- 35 g. La Figura 7 es una ilustración esquemática de otra versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio, de acuerdo con la invención de número de serie 12/124,864;

h. La Figura 8 es una ilustración esquemática de aun otra versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio, de acuerdo con la invención de número de serie 12/124,864; y

i. La Figura 9 es una ilustración esquemática de aun otra versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio, de acuerdo con la invención de número de serie 12/124,864.

- 40 Las Figuras 10a y 10b-1, 2 ilustran de manera esquemática dos versiones de una estructura y técnica para retirar dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono, y regenerar el absorbente que absorbe o se une al dióxido de carbono, de acuerdo con los principios de la presente invención; Figura 10a, donde el tiempo de absorción es significativamente superior al tiempo de regeneración; y Figuras 10b-1, 2-1, 2, donde el tiempo de absorción es aproximadamente igual al tiempo de regeneración;

- 45 Las Figuras 10c y 10d son vistas superiores y laterales de una forma de estructura elevadora para uso en el método de las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2, en una de sus posiciones operativas;

Las Figuras 10e y 10f son vistas superiores y laterales de la estructura elevadora de las Figuras 10c y 10d, en otra de sus posiciones operativas;

La Figura 10g muestra de manera esquemática detalles de la estructura que se puede usar para quitar el CO₂ captado

y regenerar el absorbente, de acuerdo con los principios de la presente invención;

La Figura 10h es una ilustración ampliada esquemática de los principios básicos de la estructura elevadora de la forma de realización de las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2;

5 Las Figuras 11a y 11b ilustran de manera esquemática otras dos versiones de una estructura y técnica para retirar dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono, y regenerar el absorbente que absorbe o se une al dióxido de carbono, de acuerdo con los principios de la presente invención;

La Figura 12 es una ilustración esquemática de una estructura de soporte absorbente monolítica de un tipo producido por Corning bajo la marca registrada Celcor®, que se puede usar como un sustrato absorbente, de acuerdo con los principios de la presente invención.

10 Las Figuras 13(a)-(c) son diagramas esquemáticos de un sustrato poroso adecuado, que muestran el absorbente de amina apoyado en los poros de cada sustrato;

La Figura 14 muestra un esquema de un ejemplo del aparato de retiro de CO₂ experimental;

La Figura 15 ilustra un perfil de desorción de CO₂ típico, en este caso para el absorbente de clase 1, PEI, en un sustrato de sílice poroso particulado;

15 **Descripción detallada**

Descripción de antecedentes del sistema y conceptos de método de solicitud con número de serie 12/124,864

Inicialmente, se cree útil describir el método y sistema de la solicitud estadounidense número de serie 12/124,864, para proporcionar antecedentes para las formas adicionales la presente invención desarrolla de manera adicional dichos principios. Las Figuras 1-9 ilustran el sistema y método de la solicitud estadounidense número de serie 20 12/124,864. La Figura 1 es un diagrama de bloques generalizado de un sistema, indicado generalmente con el número de referencia 1, para retirar dióxido de carbono de una atmósfera. El sistema 1 incluye un sistema de extracción de aire 40 y un sistema de recolección 50 que aísla el dióxido de carbono retirado a una ubicación para al menos uno de aislamiento, almacenamiento y generación de un combustible de carbono renovable o la generación de un producto no combustible, tales como materiales fertilizadores y de construcción (o para usarse en invernaderos o para potenciar la velocidad de producción microbiana de biocombustibles). El sistema de extracción de aire 40 incorpora preferiblemente cualquier método de extracción de CO₂ conocido o descubierto posteriormente, que incluye los métodos que utilizan un medio (también denominado un absorbente) para absorber y/o unirse a (adsorber) CO₂ desde al aire atmosférico, que ingresa en 2001, al exponer el medio a interacción química, eléctrica y/o física con el CO₂ en el aire captado. El medio puede ser una sustancia líquida, gaseosa o sólida, o una combinación de sustancias líquidas, gaseosas y sólidas, donde en el caso de los sólidos, la sustancia es preferiblemente porosa. El medio es preferiblemente reciclable para que después de captar el CO₂ con el medio y después de separarse del medio para aislamiento, el medio pueda reutilizarse para absorción/unión de CO₂ adicional. Tal como se muestra en la Figura 1, la separación del CO₂ del medio, y el aislamiento del CO₂, que ingresa mediante 2002, realizada mediante el sistema de aislamiento 50, se puede realizar de manera más eficaz mediante la adición de calor, mediante la línea 2000, al sistema de extracción de aire 40. El calor es calor de proceso generado, p. ej., mediante un generador de energía solar, tal como un recolector solar, que se describirá de manera más detallada más adelante. En otras formas de realización, el calor de proceso puede proporcionarse mediante otros tipos de fuentes de energía, tales como, p. ej., combustible fósil, fuentes de energía geotérmicas, nucleares, de biomasa y otras fuentes de energía renovable. La expresión «calor de proceso», como se utiliza en la presente, hace referencia al calor de menor temperatura que permanece después de haber utilizado el calor de mayor temperatura para generar electricidad. En sentido más general, la expresión «calor de proceso» hace referencia a cualquier calor de baja temperatura que permanece después de un proceso primario o que es agregado por el propio proceso, tal como, p. ej., reacciones de carbonatación exotérmicas en las cuales el dióxido de carbono se almacena como un mineral o, de hecho, cuando se une al medio y es captado. Además, el «calor de proceso» puede proporcionarse a partir del uso de fuentes de energía para producir productos distintos de la generación de energía o eléctrica. Por ejemplo, el procesamiento primario, tal como el procesamiento químico, la producción de cemento, acero o aluminio, la producción de productos energéticos como el carbón hasta productos energéticos líquidos, refinamiento, puede utilizar el calor para impulsar el procesamiento primario, y el calor no utilizado restante después del procesamiento primario o generado durante el procesamiento primario sería el calor de proceso de dicho procesamiento, y se puede usar en el método de la presente invención.

50 Una forma particularmente preferida de proporcionar calor de proceso es mediante un proceso de cogeneración, en el cual un proceso primario (p. ej., para generar electricidad) proporciona una fuente de calor de proceso (ya sea directamente en forma de vapor, o en una forma que se pueda usar para calentar un cuerpo de líquido para producir vapor) y dicho calor de proceso se utiliza además de la manera descrita en la presente para retirar CO₂ de un sustrato y regenerar el absorbente transportado por el sustrato.

55 El concepto preferido de los solicitantes de extraer dióxido de carbono de la atmósfera y utilizar el calor de proceso para separar el dióxido de carbono del medio de recolección es una forma significativa de abordar el problema del calentamiento global, y se opone a la creencia popular en la técnica (y es ilógica para los expertos en la técnica). De

manera específica, el uso de calor de proceso para resolver el problema del calentamiento global al extraer el dióxido de carbono (CO₂) del aire ambiente de baja concentración es muy atractivo en comparación tanto con el enfoque convencional de extraer CO₂ de las fuentes de gas de combustión de alta concentración como con otros esquemas conocidos en la técnica para extraer CO₂ de la atmósfera ambiente. En el caso anterior, va directamente contra la creencia popular que una concentración 300 veces inferior del CO₂ en la atmósfera ambiente se esperaría que fuera 300 veces más costosa dado que se cree que los costos de separación tienen una escala generalmente inversa con la concentración. Por lo tanto, la mayor parte del esfuerzo ha estado dirigido a extraer CO₂ de las emisiones de gas de combustión de centrales eléctricas (p. ej., carbón limpio) y los expertos han reivindicado públicamente que el uso del aire ambiente a diferencia del gas de combustión no tiene sentido. Sin embargo, el gran tamaño infinito de la fuente de aire ambiente en comparación con la fuente de gas de combustión finita y las fuentes en general es una característica que permite que el enfoque de los solicitantes sea eficaz a pesar de la práctica y las creencias populares. En el caso del gas de combustión, las emisiones que contienen el CO₂ tienen una temperatura superior (65-70 grados centígrados) y, por lo tanto, la regeneración del medio de sorción utiliza calor de temperatura superior que es más costoso de lo necesario para el aire ambiente frío (aproximadamente 25-30 °C). Existen otros beneficios del enfoque de los solicitantes, que incluyen la capacidad de utilizar dispositivos de separación muy delgados que también proporcionen mejoras adicionales del proceso. Por lo tanto, podría ser menos costoso retirar el CO₂ al canalizar el calor de proceso a una instalación de termostato global que funciona según los principios de la invención de los solicitantes, en lugar de limpiar directamente sus emisiones de combustión. Además, el enfoque de los solicitantes produciría carbono negativo, lo que realmente reduce la cantidad de CO₂ en la atmósfera, mientras que limpiar el gas de combustión solamente evitaría el aumento del contenido de CO₂ en el aire.

El análisis adicional muestra que no se puede resolver el problema del calentamiento global de manera oportuna para reducir el gran riesgo que supone simplemente limpiando fuentes de combustibles fósiles fijas grandes como centrales eléctricas a carbón o, de hecho, mediante conservación o uso de recursos renovables. Sería necesario realmente poder, como en el caso de la presente invención, extraer CO₂ de la atmósfera, reduciendo así la concentración ambiental («carbono negativo») y reduciendo la amenaza de calentamiento global. Otros esquemas publicados para extraer CO₂ de la atmósfera ambiente han utilizado calor de temperatura superior, en general, y no específicamente calor de proceso y, por lo tanto, no se han considerado seriamente debido a sus altos costos energéticos.

La Figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema, indicado generalmente con el número de referencia 2, para retirar dióxido de carbono de una atmósfera. El sistema 2 incluye un recolector solar 10, una fuente de energía complementaria opcional 20, un generador de energía 30, un sistema de extracción de aire 42 y un sistema de recolección 50. Cada uno de estos componentes del sistema 1 se explica detalladamente más adelante.

El recolector solar 10 no es una característica de la presente invención y se conoce en la técnica, p. ej., espejos parabólicos de energía solar concentrantes y torres de energía solar concentrantes. Como se conoce en la técnica, el recolector solar 10 convierte la energía solar en energía térmica, que se puede usar para calentar un fluido de trabajo para impulsar el generador de energía 30, mediante la línea 20031. La energía térmica residual (es decir, calor de proceso) se puede usar para impulsar el sistema de extracción de aire 42, mediante la línea 20032 y/o el sistema de recolección 50, mediante la línea 20033. Por ejemplo, cualquier calor de proceso restante luego del uso primario del calor solar se puede utilizar para mejorar la eficacia de las reacciones químicas y/o físicas utilizadas en el sistema de extracción de aire 42 para absorber CO₂ del aire y/o para alejar el CO₂ del medio.

El generador de energía 30 puede ser, p. ej., un generador eléctrico de energía térmica que convierte la energía térmica proporcionada por el recolector solar en electricidad. Además, la energía térmica proporcionada por el recolector solar 10 puede estar complementada por la energía generada por la fuente de energía complementaria 20.

Además, como se describió anteriormente, el «calor de proceso» puede proporcionarse a partir del uso de fuentes de energía para producir productos distintos de la generación de energía o eléctrica. Por ejemplo, en un sistema de cogeneración, el procesamiento primario, tal como el procesamiento químico, la producción de cemento, acero o aluminio, refinamiento, la producción de productos energéticos como el carbón y productos energéticos líquidos, puede utilizar el calor para impulsar el procesamiento primario, y el calor no utilizado restante después del procesamiento primario o generado durante el procesamiento primario sería el calor de proceso de dicho procesamiento, y se puede usar en un método de acuerdo con los principios de la presente invención.

La Figura 3 es un diagrama de bloques de un sistema de extracción de aire 42 que puede utilizarse con el sistema 2. El sistema de extracción de aire 42 incluye un interruptor de aire 41, un caustificador 43, un dispositivo de apagado 45, un calcinador 47 y una unidad de captura 49. El interruptor de aire 41 puede utilizar un material absorbente para captar selectivamente CO₂ del aire, y puede estar compuesto por un material absorbente que fácilmente absorbe/se une a CO₂ del aire puede ser una amina que pueda funcionar (p. ej., captar CO₂ y procesarse para recoger el CO₂ y regenerar el absorbente) a temperatura relativamente baja (p. ej., por debajo de aproximadamente 120 °C) o hidróxido de sodio (NaOH) que funcionaría a temperatura significativamente superior. Como se sabe en la técnica, los absorbentes sólidos enriquecidos con amina se pueden usar para absorber/unirse a CO₂. preferiblemente, el material absorbente se regenera y el método de captura requiere calor de menos de aproximadamente 100 - 120 °C para regenerar el material absorbente. Por lo tanto, el material absorbente preferido es una amina.

La unidad de captura 49 también puede comprimir el CO₂ captado en forma líquida para que se pueda aislar más fácilmente el CO₂.

El sistema de recolección 50, que recibe CO₂ a través de la línea 2014, aísla el dióxido de carbono retirado a una ubicación para al menos uno de aislamiento, almacenamiento y generación de un combustible de carbón renovable o la generación de un producto no combustible, tal como materiales de fertilización y construcción. El sistema de recolección 50 puede utilizar cualquier técnica de aislamiento y/o almacenamiento de carbón conocida o que se descubra en el futuro, tal como, p. ej., inyección en formaciones geológicas o aislamiento de minerales. En el caso de la inyección, el CO₂ captado puede aislarse en formaciones geológicas tales como, p. ej., yacimientos de petróleo y gas, capas de carbón no explotables y yacimientos salinos profundos. En este sentido, en muchos casos, la inyección de CO₂ en una formación geológica puede potenciar la recuperación de hidrocarburos, proporcionando los productos derivados de valor agregado que puede contrarrestar el costo de la captura y recolección de CO₂. Por ejemplo, la inyección de CO₂ en un yacimiento de petróleo o gas natural hace a un lado el producto en un proceso conocido como recuperación mejorada de petróleo. El CO₂ captado puede aislarse de manera subterránea, y de acuerdo con al menos una forma de realización de la invención en un sitio remoto contraviento de los otros componentes del sistema 2 para que cualquier filtración del sitio vuelva a captarse con el sistema 2.

Entre las varias clases de absorbentes de CO₂ sólidos, las aminas respaldadas cuentan con muchas características prometedoras, tal como el funcionamiento a temperaturas bajas (ambiente - 120 °C). Además, estas tienen interacciones absorbentes de CO₂ fuertes (50-105 kJ/mol), que actúan como absorbentes químicos de baja temperatura únicos [4]. Por el contrario, la mayoría de otros absorbentes de baja temperatura tales como zeolita, carbonos y (algunos) MOF dependen de interacciones de fisisorción más débiles, lo que hace que el agua, un componente común en el gas de combustión, pueda superar el CO₂ para sitios de absorción en muchos casos. De hecho, hay más de 70 publicaciones en la literatura abierta que exploran las propiedades de absorción de CO₂ de los absorbentes de aminas respaldados.

Los absorbentes de CO₂ de amina respaldados se regeneran más eficazmente en un proceso de cambio de temperatura, dado que se necesita energía considerable para romper los enlaces de amina-CO₂. Como se indicó anteriormente, esto se ha logrado más a menudo en los informes de bibliografía al proporcionar dos fuerzas impulsoras para desorción, (i) una fuerza impulsora de presión parcial al pasar un flujo de gas inerte sin CO₂ sobre la muestra, y (ii) una entrada de calor, usualmente en forma de un reactor calentado por medios térmicos. Dos enfoques más prácticos para lograr la regeneración de absorbente son (i) calentar el absorbente en una corriente de CO₂ calentada pura y (ii) eliminación de vapor. En el último caso, la única fuerza impulsora para desorción es térmica, y la presión de CO₂ de fase gaseosa significativa limita mucho la cantidad de CO₂ que se desorberá. Se ha demostrado que dicho enfoque también puede provocar una desactivación significativa de las aminas mediante formación de urea, Drage, T.C., et ál., Thermal stability of polyethyleneimine based carbon dioxide adsorbents and its influence on selection of regeneration strategies. *Microporous Mesoporous Mat.*, 2008. 116: p. 504-512. Sin embargo, este enfoque podría ser útil dado que genera una corriente de CO₂ pura para el aislamiento u otros usos.

Ahora se observa que el segundo enfoque, eliminación de vapor, es posiblemente mucho más prometedor en el contexto de la captura de CO₂ de baja temperatura de la atmósfera. La eliminación de vapor proporciona tanto (i) una fuerza impulsora térmica para desorción como (ii) una fuerza impulsora de presión parcial, como en el caso del cambio de temperatura de gas inerte. Cabe destacar que la corriente de producto, que contiene solamente CO₂ y agua, puede purificarse fácilmente mediante compresión, eliminando el agua como líquido para producir una corriente de gas de CO₂ muy concentrada, adecuada para el aislamiento u otros usos. Además, el vapor de bajo costo y bajo grado residual eficazmente de bajo valor de 105 °C saturado de la mayoría de los procesos) puede ser suficiente para retirar CO₂ del absorbente sólido. Ahora se puede demostrar por primera vez que la eliminación de vapor es un enfoque generalmente útil para regenerar varios absorbentes de amina respaldados saturados con CO₂ de manera práctica.

Existen tres clases de absorbentes de amina respaldados útiles. Los absorbentes de clase 1 se basan en soportes porosos impregnados con aminas monoméricas o poliméricas (Figura X). Por lo tanto, las especies de amina se cargan físicamente sobre o en el soporte. Esta clase de absorbentes fue planteada en primer lugar por Song y se describe en la bibliografía técnica, p. ej., en Xu, X.C., et ál., Preparation and characterization of novel CO₂ "molecular basket" adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41. *Microporous Mesoporous Mat.*, 2003. 62(1-2): p. 29-45 y Xu, X.C., et ál., Influence of moisture on CO₂ separation from gas mixture by a nanoporous adsorbent based on polyethylenimine-modified molecular sieve MCM-41. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005. 44(21): p. 8113-8119 y Xu, X.C., et ál., Novel polyethylenimine-modified mesoporous molecular sieve of MCM-41 type as high-capacity adsorbent for CO₂ capture. *Energy Fuels*, 2002. 16(6): p. 1463-1469. Los absorbentes de clase 2 se basan en aminas que se unen covalentemente al soporte sólido. Esto se ha logrado más a menudo al unir aminas a óxidos mediante el uso de química de silano o mediante la preparación de respaldos poliméricos con cadenas laterales que contienen amina. Los absorbentes de clase 3 se basan en soportes porosos sobre los cuales se polimerizan aminopolímeros *in situ*, comenzando por un monómero que contiene amina. Este tipo de clase 3 fue descrito para uso como absorbentes para captura de CO₂ por Hicks, J.C., et ál., Designing adsorbents for CO₂ capture from flue gas-hyperbranched aminosilicas capable of capturing CO₂ reversibly. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008. 130(10): p. 2902-2903 y por Drese, J.H., et ál., Synthesis-Structure-Property Relationships for Hyperbranched Aminosilica CO₂ Adsorbents. *Adv. Funct. Mater.*, 2009. 19(23): p. 3821-3832. Ejemplos representativos de cada una de estas clases de absorbentes se prepararon

para estudios de captura de CO₂ y regeneración de vapor.

El absorbente de clase 1 contenía polietilen imina («PEI») de bajo peso molecular, en un soporte de sílice en partículas poroso comercial, de PQ Corporation. La carga de PEI fue de 35 % en peso, según se midió mediante análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés). El absorbente de clase 2 se obtuvo injertando 3-aminopropiltrimetoxisilano en un portador de tolueno, a una fracción del mismo soporte de sílice (PQ-Mono). La carga orgánica, determinada mediante TGA, fue de 13 % en peso. El absorbente de clase 3 se obtuvo mediante hiperrramificación, polimerización in situ de aziridina en un soporte de espuma de sílice mesocelular, en un portador de tolueno, proporcionando una carga orgánica de 19 %. Ver la Figura 13 para diagramas esquemáticos del sustrato poroso con el absorbente de amina respaldado, en los poros de cada sustrato, respectivamente, I, II y III. Los soportes de sílice porosos útiles también están disponibles comercialmente en estructuras monolíticas, pero delgadas, de Corning, por ejemplo.

Se sometieron los tres absorbentes de amina respaldados a pruebas de absorción y desorción cíclicas usando CO₂ diluido en nitrógeno como el gas de prueba, seguido por regeneración de los absorbentes al poner en contacto los absorbentes respaldados con un flujo de vapor saturado de 103 °C de 1.2 g/min durante 25 minutos en el recipiente reactor revestido. La mezcla de CO₂-vapor producida se llevó posteriormente a un detector de CO₂ basado en IR Horiba mediante una purga de nitrógeno. La Figura 14 muestra un esquema de este aparato experimental. La Figura 15 ilustra un perfil de desorción de CO₂ típico, en este caso para el absorbente de clase 1, PEI, en un sustrato de sílice poroso PQ Corporation particulado. Los absorbentes se expusieron a una corriente de alimentación que contiene CO₂ saturado con agua hasta que tiene lugar la saturación del absorbente. Por consiguiente, el revestimiento alrededor del reactor se llenó con una solución de propilenglicol-agua a 105 °C para limitar la condensación de vapor en las paredes y luego se introdujo vapor saturado (a aproximadamente 103 °C) en el reactor del autoclave para que pase a través del absorbente respaldado para eliminar el CO₂. El efluente de vapor mostró un aumento muy nítido en la concentración de CO₂, donde la concentración de CO₂ en el efluente baja nuevamente básicamente a cero a los 10 minutos. Como se puede observar mediante la traza de desorción en la Figura 15, la gran mayoría (66 %) del CO₂ se retiró en los primeros 3 minutos a una temperatura de muestra de 104 °C. Estos datos muestran claramente que la eliminación de vapor a baja temperatura es eficaz para regenerar estos absorbentes de amina respaldados.

Los datos en la Tabla 1, a continuación, muestran que las tres clases de absorbentes muestran algún nivel de estabilidad en las pruebas de absorción/regeneración cíclicas usando eliminación de vapor. Cabe destacar que el absorbente de clase 1 parece ser bastante estable en las condiciones de eliminación de vapor utilizadas en la presente. En otro trabajo, la desorción de cambio de temperatura de gas inerte a mayor temperatura, la estabilidad fue inferior a la deseada durante múltiples ciclos de regeneración con absorbentes de clase 1. Es posible prever que estos materiales podrían ser los menos estables de las tres clases de absorbentes en condiciones de eliminación de vapor, debido a la falta de enlaces covalentes entre el aminopolímero y el soporte y la solubilidad medible de PEI de bajo peso molecular en agua. Suponiendo que se condensaría algo de vapor en el absorbente al transferir calor a la muestra, se podría inferir que puede retirarse algo de PEI de la muestra, como se observó en algunos casos anteriores. Sin embargo, estos datos sugieren que para al menos tres ciclos que se muestran en la presente, las muestras de clase 1 pueden ser bastante estables.

Tabla 1. Estabilidad de capacidad de CO₂ de varios absorbentes de CO₂ de amina respaldados en múltiples ciclos usando eliminación de vapor para regeneración de absorbentes.

Muestra	Ciclo de capacidad 1 ^[a]	Ciclo de capacidad 2 ^[a]	Ciclo de capacidad 3 ^[a]
Clase 1	100 %	103 %	98 %
Clase 2	100 %	94 %	83 %
Clase 3	100 %	115 %	103 %

^[a] Las capacidades se normalizan con la capacidad inicial descubierta en el primer experimento.

El absorbente de clase 3 también parece ser estable en tres ejecuciones con las condiciones utilizadas. Las capacidades de absorción en las ejecuciones 2 y 3 que son más grandes que la ejecución inicial sugieren alguna restructuración del polímero durante los ciclos. El absorbente de clase 2 pareció perder una parte de su capacidad en los tres ciclos. Sorprendentemente, a primera vista, se puede suponer que estas muestras deberían ser las más fuertes, debido al enlace Si-C covalente que conecta las aminas con la estructura del óxido. Sin embargo, incluso esta muestra mostró capacidad de reciclado significativa, y la leve disminución observada en la presente no debería interpretarse como indicador de la estabilidad total de esta clase de materiales. En total, estos datos ilustran un punto simple pero importante: para todas las clases de absorbentes de CO₂ de amina respaldados, existe potencial de desarrollo de materiales que serán estables durante la regeneración mediante eliminación de vapor.

Es posible seguir los siguientes procedimientos para proporcionar absorbente de amina respaldado en sílice en partículas comercial suministrado por PQ Corporation (PQ-9023) o en espuma mesocelular. Para la preparación de

5 todos los absorbentes, el sustrato de sílice se secó en primer lugar al vacío a 100 °C durante 24 h para retirar el agua absorbida en la superficie antes del uso. Una sílice en partículas comercial suministrada por PQ Corporation (PQ-9023) y una espuma mesocelular sintetizada en laboratorio se utilizaron como soporte. La sílice comercial está caracterizada por un área de superficie de 303 m²/g, un volumen de poro promedio de 1.64 cc/g. y un diámetro de poro promedio de 60 nm. La espuma mesocelular se preparó luego de una metodología de bibliografía, Wystrach, V.P., D.W. Kaiser, y F.C. Schaefer, PREPARATION OF ETHYLENIMINE AND TRIETHYLENEMELAMINE. J. Am. Chem. Soc., 1955. 77(22): p. 5915-5918. De manera específica, en una síntesis típica, se usaron 16 g de copolímero tribloque EO-PO-EO Pluronic P123 (Sigma-Aldrich) como agente de plantilla y se disolvió en 260 g de agua DI con 47.1 g de HCl concentrado. Luego, se agregaron 16 g de trimetilbenceno (TMB, 97 %, Aldrich) a 40 °C y se agitaron durante 2 horas antes de agregar 34.6 g de ortosilicato de tetraetilo (98 %, Aldrich) a la solución. La solución se mantuvo a 40 °C durante 20 h antes de agregar 184 mg de NH₄F (en 20 mL de agua). La mezcla luego se envejece a 100 °C durante otras 24 h. Se filtró la sílice resultante, se lavó con agua, se secó en horno y se calcinó a 550 °C en aire durante 6 h para retirar la plantilla orgánica antes del uso adicional. La sílice de espuma mesocelular está caracterizada por un área de superficie de 615 m²/g, un volumen de poro promedio de 2.64 cc/g y diámetros de ventana y celda promedio de 12 nm y 50 nm.

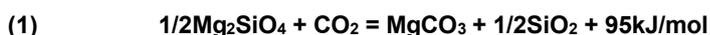
20 Para la preparación del absorbente de clase 1, se mezclaron poli(etilenimina) de bajo peso molecular de 1.8 g (PEI, MN ~ 600, Mw ~ 800, Aldrich) y 90 mL de metanol (99.8 %, Aldrich) en primer lugar en un matraz de 150 mL durante 1 h. Por consiguiente, se agregaron 3 g de sílice en partículas amorfa (PQ Corporation, PD-09023) y se agitó durante 12 h adicionales. El solvente de metanol luego se retiró mediante evaporador rotativo, y el absorbente respaldado resultante («PQ-PEI») se secó adicionalmente al vacío a 75 °C durante la noche antes del análisis.

25 Para la preparación del absorbente de clase 2, se mezclaron 90 mL de tolueno anhidro (99.5 %, Aldrich) y 3 g de sílice en partículas (PQ Corporation) en un recipiente de presión de 150 mL durante 1 h, luego se agregaron 3 g de 3-aminopropiltrimetoxisilano (APTMS, Aldrich) a la mezcla. La mezcla se mantuvo en agitación vigorosa durante 24 h a temperatura ambiente. El absorbente respaldado resultante (PQ-Mono) se recuperó mediante filtración, se lavó con tolueno y acetona y luego se secó durante la noche, al vacío, a 75 °C.

30 Para el absorbente de clase 3, se hizo reaccionar la espuma de sílice mesocelular (MCF) particulada con aziridina (un material muy reactivo pero tóxico) de manera similar, como se indica en la bibliografía (Hicks, J.C., et ál., Designing adsorbents for CO₂ capture from flue gas-hyperbranched aminosilicas capable, of capturing CO₂ reversibly. J. Am. Chem. Soc., 2008. 130(10): p. 2902-2903). Para esta síntesis, se dispersaron 3 g de MCF en 90 mL de tolueno en un recipiente de presión de 150 mL y la mezcla se agitó durante 1 h antes de agregar 6 g de aziridina (que se sintetizó de acuerdo con el siguiente procedimiento, Wystrach, V.P., D.W. Kaiser, y F.C. Schaefer, PREPARATION OF ETHYLENIMINE AND TRIETHYLENEMELAMINE. J. Am. Chem. Soc., 1955. 77(22): p. 5915-5918), inmediatamente antes del uso. Después de agitación continua durante 24 h, se filtró el absorbente respaldado resultante (MCF-HAS), se lavó con tolueno y etanol, y se secó durante la noche al vacío a 75 °C.

35 La eliminación de vapor y la absorción de CO₂ de la atmósfera se llevó a cabo en varios ciclos para analizar la durabilidad de las distintas formas de absorbente utilizado. En cada caso, en el aparato de la Figura 14, la corriente de gas que contiene CO₂ (una mezcla de N₂ y CO₂) pasó por 2 g del absorbente respaldado sustancialmente a temperatura ambiente, es decir, aproximadamente 20 °C, hasta que se alcanza la saturación del absorbente; y el absorbente se sometió a eliminación de vapor. El aparato de prueba (Figura 14) se diseñó y construyó para permitir la evaluación de regeneración de absorbente de eliminación de vapor en múltiples ciclos. La regeneración de los absorbentes respaldados se lleva a cabo poniendo en contacto los absorbentes saturados respaldados con vapor saturado a 103 °C, que fluye a 1.2 g/min durante 25 minutos. El efluente de la mezcla de CO₂-vapor luego se lleva a un detector de CO₂ basado en IR Horiba mediante una purga de nitrógeno [99], para cuantificación. Cabe destacar que esta purga de nitrógeno facilita la cuantificación del CO₂ y no es necesario en un dispositivo práctico, por lo tanto, se puede lograr una concentración real de CO₂ mediante condensación del agua en la corriente de gas, logrando una corriente de CO₂ concentrada como producto.

50 Con respecto al aislamiento de minerales, es posible aislar CO₂ mediante una reacción de carbonatación con silicatos de calcio y magnesio, que tienen lugar naturalmente como depósitos minerales. Por ejemplo, como se muestra en las reacciones (1) y (2) más adelante, es posible hacer reaccionar CO₂ con forsterita y serpentina, que produce carbonatos de calcio y magnesio sólidos en una reacción exotérmica.



55 Ambas reacciones se ven favorecidas a bajas temperaturas, lo que favorece una amina como absorbente. En este sentido, tanto los procesos de captura de aire como de aislamiento de aire que se describen en la presente pueden usar electricidad y/o energía térmica generada por el recolector solar 10 (u otra fuente de energía renovable) para impulsar las reacciones necesarias y alimentar los componentes de sistema adecuados. En un ejemplo de forma de realización de la presente invención, un portador a temperatura alta puede calentarse hasta una temperatura en un intervalo de aproximadamente 400 °C a aproximadamente 500 °C para generar vapor para ejecutar un generador para

electricidad, y el vapor de temperatura y presión inferior que sale de las turbinas de generación eléctrica se puede usar para alejar el CO₂ y regenerar el absorbente (p. ej., una amina a bajas temperaturas o NaOH a temperaturas más altas). La temperatura del calor a temperatura alta, la electricidad generada y la temperatura del calor de proceso a temperatura más baja que permanece después de la producción de electricidad se puede ajustar para producir la mezcla de producción de electricidad y retiro de CO₂ que se considera óptima para una aplicación de cogeneración determinada. Además, en ejemplos de formas de realización, se puede usar el calor de proceso de temperatura más baja que surge de las etapas de captura y aislamiento para enfriar el equipo utilizado en estas etapas.

Es posible usar uno o más sistemas para retirar dióxido de carbono de una atmósfera como parte de un termostato global de acuerdo con un ejemplo. Al regular la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera y, por lo tanto, el efecto invernadero provocado por las emisiones de dióxido de carbono y otros gases, el sistema descrito en la presente se puede usar para modificar la temperatura promedio global. De acuerdo con al menos un ejemplo, varios sistemas de captura y aislamiento de dióxido de carbono pueden estar ubicados en distintas ubicaciones en el mundo, para que el funcionamiento de los múltiples sistemas se pueda usar para modificar la concentración de CO₂ en la atmósfera y, por lo tanto, cambiar el calentamiento de gases de efecto invernadero del planeta. Las ubicaciones pueden seleccionarse para que tengan el mayor efecto en áreas tales como grandes centros industriales y ciudades muy pobladas, o fuentes de puntos naturales de CO₂, las cuales podrían generar concentraciones localmente superiores de CO₂ que permitirían una captura más rentable. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 4, pueden diseminarse múltiples sistemas 1 en el mundo, y la cooperación internacional, que incluye, p. ej., fondos y acuerdos internacionales, se puede utilizar para regular la construcción y el control de los sistemas 1. En este sentido, es posible cambiar la concentración de gases de efecto invernadero para modificar la temperatura global promedio del planeta para evitar períodos de enfriamiento y calentamiento, que pueden ser destructivos para los sistemas humanos y ecológicos. Durante la historia de nuestro planeta, p. ej., ha habido muchos períodos de glaciación y cambios rápidos de temperatura que han provocado destrucción e incluso extinciones en masa. Dichos cambios de temperatura en el futuro podrían ser la causa directa de daño masivo y desestabilización de la sociedad humana a partir de conflictos generados por posibles recursos disminuidos. El termostato global descrito en la presente puede ser la clave para evitar dichos desastres en las décadas venideras.

La Figura 5 es un diagrama de bloques de un sistema, indicado generalmente con el número de referencia 100, para retirar dióxido de carbono de una atmósfera de acuerdo con un ejemplo. El sistema 100 incluye una fuente de energía renovable 110 (que proporciona calor al generador de energía, el sistema de extracción de aire y el sistema de recolección mediante las líneas 20161, 20163 y 20164, respectivamente, una fuente de energía complementaria opcional 120, que proporciona calor mediante la línea 20162 a un generador de energía 130, un sistema de extracción de aire 142, enviando dióxido de carbono a través de la línea 2019 a un sistema de recolección 150. La presente forma de realización difiere de la forma de realización de la Figura 2 dado que la fuente de energía renovable 110 puede ser cualquier fuente de energía conocida o que se descubra en el futuro aparte de la solar, tales como, p. ej., fuentes de energía nuclear, geotérmica y de biomasa. preferiblemente, la fuente de energía renovable produce energía térmica, que se puede usar para producir electricidad y para mejorar la eficacia de las diversas reacciones químicas y/o físicas que tienen lugar dentro del sistema de extracción de aire 142 y el sistema de recolección 150. En este sentido, el sistema de extracción de aire 142 y el sistema de recolección 150, mediante las líneas 20161, 20162, 20163 y 20164, respectivamente, envían calor de proceso mediante la línea 2017. Puede ser igual al que se describe con referencia a la forma de realización anterior, o puede incluir componentes de acuerdo con cualquier sistema de extracción y recolección de aire conocido o que se descubra en el futuro. Además, como se muestra en el mapa global de la Figura 4 con referencia a la forma de realización anterior, es posible colocar estratégicamente múltiples sistemas 100 en el mundo, y se puede coordinar el control de los sistemas 100 para que funcionen en conjunto como termostato global.

Las Figuras 6-9 son ilustraciones esquemáticas de varias maneras en que se puede retirar el dióxido de carbono de una atmósfera.

Específicamente, en la Figura 6, se ilustra un par de sustratos 600, 602, cada uno de los cuales tiene un medio (p. ej., NaOH, una amina u otro absorbente adecuado) que puede ponerse en contacto con una atmósfera para retirar el dióxido de carbono de la atmósfera. Los sustratos 600, 602 tienen forma de panqueque (en el sentido de que tienen un área relativamente grande en comparación con el espesor) orientado verticalmente, y cada uno puede ser relativamente grande (en área de superficie) y relativamente delgado (p. ej., en el orden de unos pocos milímetros, y preferiblemente no más gruesos que un metro). Cada sustrato se puede mover (p. ej., mediante un sistema de poleas o hidráulico, no se muestra) entre una posición superior en la cual el aire cargado de dióxido de carbono se pone en contacto con el medio transportado por el sustrato para retirar dióxido de carbono del aire, y una posición inferior en la cual se dirige calor de proceso en el sustrato para retirar dióxido de carbono del medio. Los sustratos 600, 602 son porosos con grandes áreas de superficie, para que el aire dirigido a un sustrato pueda fluir a través del sustrato. Cuando un sustrato se encuentra en una posición superior (p. ej., la posición del sustrato 600), el aire cargado de dióxido de carbono se dirige al sustrato (p. ej., mediante un ventilador 604 que se muestra en líneas punteadas), para que a medida que el aire fluya a través del sustrato, el dióxido de carbono entre en contacto con el medio y se retire sustancialmente del aire. Por lo tanto, el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a y a través del sustrato para que el dióxido de carbono entre en contacto con el medio, el dióxido de carbono se retira sustancialmente del aire mediante el medio, y el aire del cual se ha retirado sustancialmente el dióxido de carbono se aleja del sustrato. Cuando un sustrato se mueve a la posición inferior (p. ej., la posición del sustrato 602), el calor de proceso se dirige al sustrato

(p. ej., mediante un conducto de fluido 606) y se retira el dióxido de carbono (aleja) mediante una fuente de fluido que se dirige al sustrato (en la dirección que se muestra con la flecha 608) y una fuente de succión 610 mediante la cual se ha retirado dióxido de carbono del medio se aleja del sustrato. Los sustratos 600, 602 pueden moverse alternativamente entre las posiciones superior e inferior, para que el sustrato en la posición superior retire dióxido de carbono del aire y el dióxido de carbono se retire del sustrato en la posición inferior. Cabe destacar que, en lugar del ventilador, si hay vientos fuertes, se pueden usar flujos de viento natural disponible para impulsar el aire a través del sustrato. Además, como se describe más adelante, el ventilador se puede remplazar con una fuente solar (o mediante viento o corrientes de aire impulsadas por medios térmicos), en cuyo caso la eficacia y la reducción de costos de extracción de dióxido de carbono del aire atmosférico pueden mejorarse adicionalmente. Además, en lugar de cambiar las posiciones de los sustratos, el medio para generar los flujos de aire, el flujo de calor de proceso y el flujo de dióxido de carbono en sentido contrario al sustrato puede cambiarse a medida que se capta dióxido de carbono del aire y luego se extrae del medio, como será evidente para los expertos en la técnica.

La Figura 7 es una ilustración esquemática de otra versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio. Específicamente, en la Figura 7, se ilustra un par de sustratos 700, 702, cada uno de los cuales puede ser el mismo medio que en la Figura 6 anterior, para retirar dióxido de carbono de la atmósfera. Los sustratos 700, 702 se orientan horizontalmente, y cada uno puede ser relativamente grande (en área de superficie) y relativamente delgado (p. ej., en el orden de los milímetros o centímetros, hasta un metro). Cada sustrato se puede mover horizontalmente (p. ej., mediante un sistema de poleas (no se muestra) entre una posición de extracción de aire en la cual el aire cargado de dióxido de carbono se pone en contacto con el medio transportado por el sustrato para retirar dióxido de carbono del aire, y una posición de extracción de carbono en la cual se dirige calor de proceso en el sustrato para retirar dióxido de carbono del medio. Los sustratos 700, 702 son porosos, para que el aire dirigido a un sustrato pueda fluir a través del sustrato. Cuando un sustrato se encuentra en una posición de extracción de aire (p. ej., la posición del sustrato 700), el aire cargado de dióxido de carbono se dirige al sustrato (p. ej., mediante un ventilador 704 que se muestra en líneas punteadas), para que a medida que el aire fluya a través del sustrato, el dióxido de carbono entre en contacto con el medio y se retire sustancialmente del aire. Por lo tanto, el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a y a través del sustrato para que el dióxido de carbono entre en contacto con el medio, el dióxido de carbono se retira sustancialmente del aire mediante el medio, y el aire del cual se ha retirado sustancialmente el dióxido de carbono se aleja del sustrato. Cuando un sustrato se mueve a la posición de extracción de carbono (p. ej., la posición del sustrato 702), el calor de proceso se dirige al sustrato (p. ej., mediante un conducto de fluido 706) y se retira el dióxido de carbono (aleja) mediante una fuente de fluido que se dirige al sustrato (en la dirección que se muestra con la flecha 708) y una fuente de succión 710 mediante la cual se ha retirado dióxido de carbono del medio se aleja del sustrato. Los sustratos 700, 702 pueden moverse alternativamente entre las posiciones de extracción de aire y de extracción de carbono, para que el sustrato en la posición de extracción de aire retire dióxido de carbono del aire y el dióxido de carbono se retire del sustrato en la posición de extracción de carbono. Cabe destacar que, en lugar del ventilador, si hay vientos fuertes se pueden usar flujos de viento natural disponible para impulsar el aire a través del sustrato. Además, como se describe más adelante, el ventilador se puede remplazar con una fuente solar (o mediante viento o corrientes de aire impulsadas por medios térmicos), en cuyo caso la eficacia y la reducción de costos de extracción de dióxido de carbono del aire atmosférico pueden mejorarse adicionalmente. Además, en lugar de cambiar las posiciones de los sustratos, el medio para generar los flujos de aire, el flujo de calor de proceso y el flujo de dióxido de carbono en sentido contrario al sustrato puede cambiarse a medida que se capta dióxido de carbono del aire y luego se extrae del medio, como será evidente para los expertos en la técnica.

La versión de la invención que se muestra en la Figura 9 es generalmente similar a la versión orientada horizontalmente de la Figura 7, pero en la versión de la Figura 9, en lugar de que sea un ventilador la fuente que mueve el aire cargado de carbono a través del sustrato en la posición de extracción de aire (p. ej., sustrato 900), hay una fuente de flujo de gas que se genera a partir de una torre o chimenea de calentamiento solar (que se muestra de forma esquemática en 912 en la Figura 9). Es posible generar una chimenea solar al calentar una masa de aire con el sol. La chimenea solar tendría un «pollerín» (que se muestra en líneas punteadas 913 en la Figura 9) que permite el aire calentado por el sol que se concentrará en la chimenea. Por lo tanto, un campo solar con una chimenea solar puede estar asociado con un sistema y estructura que retira dióxido de carbono de la atmósfera y retira dióxido de carbono de un medio de la manera que se muestra y describe con relación a la Figura 7. Sin embargo, en lugar de un ventilador 704 como el impulsor primario del aire cargado de dióxido de carbono en el sustrato, el aire cargado de dióxido de carbono se calienta mediante energía solar y se deja que ese aire se eleve en el embudo o torre solar 912. Debido a la tendencia del aire caliente a elevarse, se genera una corriente ascendente, que transportaría con esta, aire cargado de dióxido de carbono, y el sustrato 900 se posicionaría en la forma de dicha corriente ascendente. Por lo tanto, el aire cargado de dióxido de carbono se dirigiría a través del sustrato 900 en la posición de extracción de aire, y el dióxido de carbono se retiraría del sustrato 902 en la posición de extracción de carbono de la misma manera que se muestra y describe con relación a la Figura 7. Al impulsar la extracción de dióxido de carbono del aire mediante energía solar, los costos de extracción se reducen adicionalmente, y la operación total es muy renovable. Obviamente, la provisión debería realizarse para los períodos en los que el sol no brilló, y se necesitaría alguna forma de impulsor similar al ventilador 704 (Figura 7). En cualquier caso, al tener períodos en los cuales, en lugar del ventilador, se remplaza el ventilador con una fuente solar (o mediante viento o corrientes de aire impulsadas por medios térmicos), la eficacia y la reducción de costos de extracción de dióxido de carbono del aire atmosférico pueden mejorarse adicionalmente.

La Figura 8 es una ilustración esquemática de otra versión de un medio para retirar dióxido de carbono de una atmósfera y para retirar dióxido de carbono del medio. En la Figura 8, el medio, del cual se retira el dióxido de carbono del aire atmosférico y del cual se retira dióxido de carbono del medio, se ubica en un sustrato que se mueve continuamente compuesto, p. ej., por sedimentos cargados con el absorbente 800. El sustrato se mueve a través de una zona de extracción de aire 814, donde el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a y a través del sustrato (que también es poroso como en las formas de realización anteriores), para retirar el dióxido de carbono del aire. El sustrato 800 luego se mueve a una zona de extracción de carbono 816, donde el calor de proceso se dirige al sustrato y el carbono se aleja del sustrato de la manera descrita anteriormente con relación a las Figuras 6, 7. Luego, el sustrato 800 se mueve hacia y a través de una zona de intercambio térmico 818 donde la temperatura del sustrato desciende (p. ej., con el aire que fluye a través del sustrato en la zona de extracción de aire, y mediante cualquier dispositivo de enfriamiento adicional que puede ser útil para reducir la temperatura del sustrato hasta un nivel que permita que se retire eficazmente dióxido de carbono del aire cuando el sustrato se mueve nuevamente a través de la zona de extracción 814. Además, el sistema de la Figura 8 puede tener otra zona de extracción de carbono 816, donde el calor de proceso se dirige al sustrato y el carbono se aleja del sustrato de la manera descrita anteriormente con relación a las Figuras 6, 7.

También se debería destacar que, en todas las versiones de la invención descritas anteriormente, la remoción de dióxido de carbono del aire puede realizarse al menos parcialmente en condiciones de no equilibrio. Además, se debería destacar que el concepto preferido de los solicitantes para extraer dióxido de carbono de la atmósfera comprende utilizar un sustrato de área de superficie grande relativamente delgado con un medio (p. ej., una amina) que retira dióxido de carbono de la atmósfera y utilizar calor de proceso para retirar dióxido de carbono del medio. Utilizar un sustrato de área relativamente grande perpendicular a la dirección del flujo de aire es particularmente útil, debido a la concentración relativamente baja de dióxido de carbono en la atmósfera (a diferencia de la concentración relativamente alta que normalmente se encontraría, p. ej., en gases de combustión).

Nuevos conceptos de método para retirar dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono, según la presente invención

Estructura absorbente y funcionamiento general del absorbente

La Figura 12 es una ilustración esquemática de una estructura de sustrato de cerámica celular, de un tipo producido por Corning bajo la marca registrada Celcor®, que se puede usar en una estructura absorbente, de acuerdo con los principios de la presente invención. El absorbente (p. ej., una amina) se transporta mediante (p. ej., se recubre o inmoviliza de otro modo en) el interior de uno o más de los sustratos de cerámica celulares de Celcor®, que proporciona un área de superficie grande y baja disminución de presión, a medida que fluye el aire cargado de CO₂ a través del sustrato. La estructura absorbente puede comprender, p. ej., múltiples sustratos de cerámica celulares de Celcor® o un único sustrato, con el tipo de forma de panqueque descrito anteriormente con relación a la Figura 6 (es decir, área de superficie mucho mayor al espesor), y el aire cargado de CO₂ se dirige a través de las celdas de la estructura absorbente. También se contempla que la estructura absorbente puede formarse incrustando el material absorbente en la estructura de cerámica celular de Celcor® para formar una estructura absorbente monolítica.

Además, cabe destacar que el sustrato, si bien es preferiblemente de cerámica, un material inorgánico, puede ser un material orgánico.

El aire cargado de CO₂ pasa a través de la estructura absorbente, que tiene preferiblemente forma de panqueque, y la estructura absorbente se une al CO₂ hasta que la estructura absorbente alcanza un nivel de saturación indicado, o el nivel de CO₂ a la salida de la estructura absorbente alcanza un valor indicado que denota que el avance de CO₂ ha comenzado (el avance de CO₂ se refiere a que la estructura absorbente se satura suficientemente con CO₂ que no se capta una cantidad significativa de CO₂ adicional con la estructura absorbente). Los sistemas para medir la concentración de CO₂ son conocidos.

Cuando se desee retirar y recoger CO₂ de la estructura absorbente (y regenerar la estructura absorbente), de la manera que se describe más adelante con relación a las Figuras 10a-h, la estructura absorbente se retira de la corriente de aire cargado de dióxido de carbono y se aísla de la corriente de aire y de otras fuentes de ingreso de aire. Luego, el vapor pasa a través de la estructura absorbente. El vapor inicialmente se condensará y transferirá su calor de condensación latente a la estructura absorbente. Finalmente, la estructura absorbente alcanzará la temperatura de saturación y el vapor pasará a través de la estructura absorbente sin condensación. A medida que el condensado y luego el vapor pasan y calientan la estructura absorbente, el CO₂ que se captó con la estructura absorbente se liberará de la estructura absorbente produciendo más agua condensada al proporcionar el calor de reacción necesario para liberar el CO₂ de la estructura absorbente y retirarse de la estructura absorbente mediante el vapor o extraerse mediante un ventilador/bomba. Por lo tanto, el vapor que pasa a través de la estructura absorbente y libera el CO₂ del absorbente, por razones de costo de eficiencia energética se buscaría minimizar la cantidad de vapor utilizado y que se mezcla con el CO₂. Por lo tanto, lo que se condense (o pueda condensarse) luego de salir de la cámara de regeneración y el condensado puede agregarse a lo generado en la cámara de regeneración, y reciclarse para calentarse y convertirse nuevamente en vapor para uso. Esta técnica se denomina «eliminación de vapor» y también se describe más adelante de manera adicional.

Concepto de elevador vertical de las Figuras 10a -10f y 10h

Las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2 son ilustraciones esquemáticas de estructura y conceptos de método que desarrollan adicionalmente los principios mediante los cuales el dióxido de carbono puede retirarse del aire cargado de CO₂, de acuerdo con los principios de la presente invención. Figuras 10c-h. Las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2 difieren en que en la Figura 10a el tiempo de absorción es significativamente superior que el tiempo de regeneración, pero en la Figura 10b-1, 2-1, 2, el tiempo de absorción es aproximadamente igual al tiempo de regeneración.

Específicamente, en la Figura 10a, se ilustra una estructura de captura de dióxido de carbono rectangular 1000, que tiene una estructura absorbente, como se describe en la presente memoria, y puede entrar en contacto con el aire cargado de CO₂ para retirar el dióxido de carbono del aire cargado de CO₂. El medio de captura de dióxido de carbono rectangular es similar a los sustratos con forma de panqueque de la Figura 6 anterior. La estructura de captura de dióxido de carbono mejorada 1000 comprende un miembro superior 1002 que es preferiblemente una placa metálica sólida, una estructura absorbente 1004 que depende del miembro superior 1002, y se mantiene en el lugar solo mediante barras verticales (para soporte) en otra parte, para que el medio absorbente esté abierto a la atmósfera en los cuatro (4) lados restantes. El soporte está formado preferiblemente de acero inoxidable. Cuando se ubica en una corriente de aire cargado de CO₂, la estructura absorbente 1004 está abierta a corriente de aire cargado de CO₂ en los lados de gran área a través de los cuales el aire se dirige mediante ventilador o el viento que prevalece 2049 y transporta el absorbente que se une al dióxido de carbono que fluye a través de la estructura absorbente, para captar el dióxido de carbono de un flujo de aire cargado de dióxido de carbono que se dirige a través de la estructura absorbente. La estructura absorbente 1004 proporciona una gran área de superficie y baja disminución de presión, a medida que el aire cargado de CO₂ fluye a través de la estructura absorbente 1004.

La estructura de captura de dióxido de carbono 1000 permite el movimiento vertical mediante una estructura elevadora, que se muestra y describe en resumen con relación a las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2, y cuyos detalles se describen y muestran adicionalmente con relación a las Figuras 10c-f y 10h. Como se muestra en la Figura 10a, un cilindro hidráulico 1006 se conecta mediante un pistón y varillas 2034, 2059 con la placa superior 1002 y el pistón se mueve en un marco estructural 1008 que proyecta el cilindro hidráulico desde el entorno ambiental. El cilindro hidráulico 1006 puede mover selectivamente la estructura de captura de dióxido de carbono 1000 entre una posición de captura de dióxido de carbono que se encuentra en línea con un flujo de aire cargado de dióxido de carbono 2024, 2049 y una posición de regeneración que se describe más adelante de manera adicional. En la posición de captura de dióxido de carbono, se atrae un flujo de aire cargado de dióxido de carbono (denominado «entrada de aire fresco» en la Figura 10a) a través de la estructura de captura de dióxido de carbono 1000 (p. ej., mediante una corriente inducida creada por un ventilador 1010 impulsado por un motor 1012). El aire cargado de dióxido de carbono fluye a través del sustrato de soporte absorbente 1004 donde el absorbente se une al dióxido de carbono, para retirar el dióxido de carbono del aire, de manera que el aire que sale de la estructura de captura de dióxido de carbono 1000 elimine sustancialmente el dióxido de carbono (preferiblemente aproximadamente 95 % de dióxido de carbono eliminado).

La estructura de captura de dióxido de carbono 1000 se puede mover selectivamente a una posición de regeneración (mediante el cilindro hidráulico 1006 o mediante un sistema de poleas que realizaría la función análoga), donde el dióxido de carbono se separa de la estructura absorbente 1004, para permitir que el dióxido de carbono se recoja y aisle, y para permitir que la estructura absorbente se regenere, de manera que la estructura absorbente luego pueda moverse nuevamente a una posición donde se encuentre en línea con un flujo de aire cargado de dióxido de carbono, para retirar dióxido de carbono adicional del aire. Se ubica una caja de regeneración 1014 debajo de la estructura de captura de dióxido de carbono 1000. La caja de regeneración 1014 es preferiblemente una placa metálica sólida en 5 lados, y está abierta en la parte superior, para que cuando la estructura de captura de dióxido de carbono 1000 descienda en la caja 1014, la placa superior 1002 cerrará la parte superior de la caja de regeneración 1014, creando un cierre mecánico sustancialmente hermético con la parte superior de la caja de regeneración de CO₂.

La caja de regeneración 1014 está bien aislada con fines de conservación de calor y se puede calentar selectivamente mediante un flujo de calor de proceso (preferiblemente de un sistema y proceso de cogeneración, como se describe adicionalmente en la presente). A medida que se calienta la caja de regeneración 1014 (preferiblemente mediante el «proceso de eliminación de vapor» descrito en la presente), el dióxido de carbono se separa de la estructura absorbente, y se extrae de manera de aislar el dióxido de carbono. A medida que el dióxido de carbono se separa de la estructura absorbente, y se extrae de la caja de regeneración 1014, se regenera la estructura absorbente, para que la estructura de captura de dióxido de carbono 1000 pueda moverse a la posición en la cual se encuentra en línea con un flujo de aire cargado de dióxido de carbono, para retirar dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono.

La Figura 10b-1, 2-1, 2 ilustra esquemáticamente una alternativa a la estructura y técnica de la Figura 10a, dado que se proporciona un par de estructuras de captura de dióxido de carbono 1000, cada una de las cuales está configurada de acuerdo con la estructura de captura de dióxido de carbono de la Figura 10a, y cada una de las cuales se mueve mediante un cilindro hidráulico 1002 entre una posición de captura de carbono en la cual la estructura de captura de carbono se encuentra en línea con un flujo de aire cargado de carbono, y una posición de regeneración en la cual la estructura de captura de dióxido de carbono desciende a una caja de regeneración 1014 configurada como, y que funciona de una manera similar a, la caja de regeneración 1014 de la Figura 10a. La única diferencia esencial entre la estructura de captura de dióxido de carbono y la técnica de la Figura 10b-1, 2-1, 2 y la Figura 10b-1, 2-1, 2, es que en

la Figura 10b-1, 2-1, 2, una estructura de captura de dióxido de carbono siempre puede estar en línea con un flujo de aire cargado de dióxido de carbono, mientras que la otra estructura de captura de dióxido de carbono se regenera de la manera descrita anteriormente con relación a la Figura 10a. Por lo tanto, en la Figura 10b-1, 2-1, 2 (y de una manera similar a la que se muestra en la Figura 6), cuando una primera estructura de captura de dióxido de carbono 1000 se encuentra en una posición superior (p. ej., la posición superior que se muestra en la Figura 10b-1, 2-1, 2), el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a través de una estructura absorbente, para que la estructura absorbente se una al dióxido de carbono en el aire cargado de dióxido de carbono. Cuando la primera estructura de captura de dióxido de carbono 1000 se mueve a la posición inferior y hacia la caja de regeneración 1014, el calor de proceso se dirige al sustrato, y el dióxido de carbono se retira (aleja) de la estructura de soporte absorbente (nuevamente, preferiblemente mediante el proceso de «eliminación de vapor» descrito en la presente). El par de estructuras de captura de dióxido de carbono 1000 puede moverse alternativamente entre las posiciones superior e inferior, para que la estructura de captura de dióxido de carbono en la posición superior retire dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono y el dióxido de carbono se retire de la estructura absorbente que se encuentra en la posición inferior.

Mientras cada una de las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2 muestra una única estructura absorbente para retirar dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono y para regenerar una estructura absorbente de dióxido de carbono (dicha estructura absorbente a menudo se refiere en la presente como una unidad, en la práctica un sistema de termostato global tendría una cantidad de unidades, cada una de las cuales está configurada y funciona de acuerdo con las estructuras y técnicas descritas anteriormente, como será evidente para los expertos en la técnica. Además, la Figura 10h muestra y describe la estructura elevadora en detalle adicional, y como se muestra en las Figuras 10c, d, e y f, la estructura elevadora puede comprender, p. ej., pares de cilindros hidráulicos ubicados de manera que no interfieran con el flujo de aire cargado de dióxido de carbono a través de la estructura absorbente.

Además, las siguientes características adicionales de las estructuras y técnicas de las Figuras 10a y 10b-1, 2-1, 2 también deberían destacarse.

a. Tuberías, válvulas, etc. para la fuente de calor de proceso de nivel bajo / cabezal de suministro 2029 (comúnmente, vapor de baja presión), que más probablemente será una guardatubería horizontal ubicada debajo de la fila horizontal de unidades de termostato global (GT) idénticas, que se colocan en paralelo con la «Dimensión W» 2044 que se muestra en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Si la cantidad de unidades de termostato global (GT) también se expande verticalmente en sentido ascendente, al construir una estructura con niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas, también habrá un cabezal vertical, o guardatubería vertical, ubicada en el extremo de la fila horizontal de unidades GT idénticas, adyacente a la estructura que contiene los niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas.

b. Tuberías, válvulas, etc. para el cabezal de retorno de calor de proceso de nivel bajo 2027 (comúnmente, condensado de vapor de baja presión), que más probablemente será una guardatubería horizontal ubicada debajo de la fila horizontal de unidades de termostato global (GT) idénticas, que se colocan en paralelo con la «Dimensión W» que se muestra en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Si la cantidad de unidades de termostato global (GT) también se expande verticalmente en sentido ascendente, al construir una estructura con niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas, también habrá un cabezal vertical, o guardatubería vertical, ubicada en el extremo de la fila horizontal de unidades GT idénticas, adyacente a la estructura que contiene los niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas.

c. Tuberías, válvulas, etc. para el cabezal de suministro de agua de enfriamiento (CWS) opcional 2030, que más probablemente será una guardatubería horizontal ubicada debajo de la fila horizontal de unidades de termostato global (GT) idénticas, que se colocan en paralelo con la «Dimensión W» que se muestra en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Si la cantidad de unidades de termostato global (GT) también se expande verticalmente en sentido ascendente, al construir una estructura con niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas, también habrá un cabezal vertical, o guardatubería vertical, ubicada en el extremo de la fila horizontal de unidades GT idénticas, adyacente a la estructura que contiene los niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas.

d. Tuberías, válvulas, etc. para el cabezal de retorno de agua de enfriamiento (CWR) opcional 2028, que más probablemente será una guardatubería horizontal ubicada debajo de la fila horizontal de unidades de termostato global (GT) idénticas, que se colocan en paralelo con la «Dimensión W» que se muestra en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Si la cantidad de unidades de termostato global (GT) también se expande verticalmente en sentido ascendente, al construir una estructura con niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas, también habrá un cabezal vertical, o guardatubería vertical, ubicada en el extremo de la fila horizontal de unidades GT idénticas, adyacente a la estructura que contiene los niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas.

e. Tuberías, válvulas, etc. para el cabezal de almacenamiento de producto de CO₂ (>95.00 % molar) a CO₂ 2026, que más probablemente será una guardatubería horizontal ubicada debajo de la fila horizontal de unidades de termostato global (GT) idénticas, que se colocan en paralelo con la «Dimensión W» que se muestra en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Si la cantidad de unidades de termostato global (GT) también se expande verticalmente en sentido ascendente, al construir una estructura con niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas, también habrá un

cabezal vertical, o guardatubería vertical, ubicada en el extremo de la fila horizontal de unidades GT idénticas, adyacente a la estructura que contiene los niveles de plataforma adicionales en las elevaciones apropiadas.

f. El recipiente de recepción / almacenamiento de CO₂ 2026, y todos los equipos necesarios para conectarse, o fijarse, a una tubería de eliminación de CO₂ a alta presión.

5 g. Fijación de suministro y retorno (tuberías, válvulas, etc.) 2029 a la fuente de calor de proceso de nivel bajo en la instalación industrial existente (central eléctrica, central química, o refinería, etc.), que más probablemente será un retorno de condensado de vapor de baja presión /suministro de vapor de baja presión común 2027.

10 h. Fijación de suministro y retorno (tuberías, válvulas, etc.) a la fuente de enfriamiento de nivel bajo en la instalación industrial existente (central eléctrica, central química, o refinería, etc.), que más probablemente será un suministro de agua de enfriamiento (CWS) / retorno de agua de enfriamiento (CWR) ordinario o común 2030/2028.

i. Toda instrumentación, todas las instalaciones eléctricas (tales como subestaciones, cableado, etc.), todas las conexiones de utilidad general (tal como aire instrumental, agua potable, etc.), todos los sistemas de seguridad y bloqueo, etc. Esto también incluiría una central de control, con un sistema de registro de datos informático / sistema de control informático.

15 j. Todas las válvulas de bloque que se muestran en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2 se indicarán como válvulas de bloqueo de «filtración mínima» o TSO (cierre hermético), lo que sea más práctico o más viable.

20 k. Todas las válvulas de bloqueo que se muestran en las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2 serán válvulas de bloqueo totalmente automáticas (ya sea motorizadas, hidráulicas o neumáticas). Todas estas válvulas de bloqueo se conectarán entre sí mediante un sistema temporizador / secuenciador controlado por computadora. Las bombas de fluido hidráulico y los extractores de gas reciclado / de producto de CO₂ también se conectarán y entrelazarán entre sí mediante el sistema temporizador /secuenciador controlado por computadora.

25 l. Si bien la estructura absorbente preferida descrita en la presente comprende un material absorbente (es decir, una amina) transportado por (p. ej., recubierto o inmovilizado de otro modo en) el interior del sustrato celular Celcor®, se contempla que la estructura absorbente también se puede formar incrustando el material absorbente en la estructura celular Celcor® para formar una estructura absorbente monolítica.

30 m. Se reconoce que puede ser importante retirar el oxígeno del entorno alrededor de la estructura absorbente caliente, tanto antes como después de la regeneración de la estructura absorbente, para evitar la contaminación de oxígeno de la estructura absorbente (lo que se generaría mediante envenenamiento con oxígeno de la estructura absorbente al oxidar la estructura absorbente). La manera en la que se puede manejar el retiro de oxígeno se describe más adelante con relación a una técnica denominada «eliminación de vapor con gas de purga».

Eliminación de vapor

Se contemplan 2 técnicas para el proceso de eliminación de vapor. Una técnica se denomina «eliminación de vapor solo con vapor». La otra técnica se denomina «eliminación de vapor con gas de purga». Ambas técnicas utilizan componentes del sistema y etapas del proceso que se muestran esquemáticamente en la Figura 10g.

35 La técnica denominada «eliminación de vapor solo con vapor» funciona de la siguiente manera:

a. El aire pasa a través de los canales en la estructura absorbente y se retira el CO₂ del aire mediante la estructura absorbente hasta que la estructura absorbente alcanza un nivel de saturación indicado o el nivel de CO₂ a la salida de la estructura absorbente alcanza un valor determinado que indica que ha comenzado el avance de CO₂, o durante un período de tiempo indicado determinado mediante análisis.

40 b. La estructura absorbente se retira de la corriente de aire y se aísla del flujo de aire y del ingreso de aire y la migración de CO₂ hacia el aire exterior, cuando se coloca en su posición de retiro de CO₂ 2105.

45 c. El vapor de presión baja 2100 pasa a través de los canales en la estructura absorbente 2105. El vapor inicialmente se condensará y transferirá su calor de condensación latente a la estructura absorbente en la parte delantera de la estructura absorbente. El calor de condensación eleva la temperatura de la estructura absorbente y proporciona energía para impulsar el proceso de desorción de CO₂ de la estructura absorbente. Finalmente, la parte delantera de la estructura absorbente alcanzará la temperatura de saturación y el CO₂ liberado se extraerá mediante el vapor o un ventilador. Este proceso se adentrará en la estructura absorbente desde la parte delantera de la estructura absorbente donde el vapor ingresa hasta que se libera el CO₂ (cabe destacar que la fracción liberada dependerá de la estructura absorbente y la temperatura del vapor utilizado). Solamente se proporcionará una cantidad adecuada de vapor para lograr la desorción del CO₂ de la estructura absorbente para minimizar el vapor utilizado y minimizar la cantidad de vapor mezclado con el CO₂ liberado. A medida que el condensado y luego el vapor pasan a través de la estructura absorbente y calientan el absorbente, el CO₂ se liberará de la estructura absorbente y se transferirá al vapor y condensado. El condensado tendrá una capacidad limitada para «sostener» el CO₂ y una vez saturada el agua «ácida»

no sostendrá más CO₂ y el CO₂ permanecerá en la fase de vapor a medida que se extrae mediante el vapor o con un ventilador. Una vez que el vapor ha pasado a través de la estructura absorbente debe condensarse para liberar el CO₂. Esto se logra en el condensador 2106 que utiliza agua refrigerante 2108 para retirar el calor. La corriente recogida tendrá algo de vapor mezclado en esta que se minimizará en la medida en que sea posible, y el vapor debe condensarse para separarse del CO₂. De manera alternativa, el vapor podría condensarse, usando pérdida de calor a la atmósfera, en una tubería no aislada o una tubería con aletas. Este calor es una pérdida para el sistema, aunque una alternativa sería utilizar el aire que sale de la estructura absorbente en la etapa de absorción (Etapa 1 anterior) para condensar el vapor. Esto elevaría la temperatura del aire en la salida de la estructura absorbente y proporcionaría una fuerza impulsora adicional para mover el aire a través de la estructura absorbente y reducir los requisitos energéticos.

d. Una vez que se ha retirado el CO₂ de la estructura absorbente, la estructura absorbente se eleva nuevamente a la corriente de aire. El aire enfriará la estructura absorbente y retirará cualquier humedad restante. Luego, la estructura absorbente retirará el CO₂ hasta que ocurra el avance indicado (ver Etapa 1) y luego la estructura absorbente desciende a la posición de regeneración y se repite el proceso.

e. El condensado del proceso de desorción (retirando el CO₂ de la estructura absorbente) contiene CO₂ en niveles de saturación. Este condensado 2109 estará cercano a la temperatura de saturación (dado que solo se agrega vapor suficiente al sistema para lograr el retiro del CO₂) y se recicla en una caldera donde se usa el vapor de baja presión de una instalación (central petroquímica o central eléctrica) para regenerar el vapor 2098 utilizado para calentar la estructura absorbente. La reutilización del vapor saturado de CO₂ elimina el requisito de tratar grandes cantidades de agua ácida.

La técnica denominada «eliminación de vapor con gas de purga» funciona de la siguiente manera:

a. El aire pasa a través de los canales en la estructura absorbente y se retira el CO₂ del aire mediante la estructura absorbente hasta que la estructura absorbente alcanza un nivel de saturación indicado o el nivel de CO₂ a la salida de la estructura absorbente alcanza un valor determinado que indica que ha comenzado el avance de CO₂, o durante un período de tiempo indicado determinado mediante análisis.

b. La estructura absorbente se retira de la corriente de aire y se aísla del flujo de aire y del ingreso de aire y la migración de CO₂ hacia el aire exterior.

c. Para retirar el oxígeno de los canales en la estructura absorbente se hace pasar un gas inerte a través de la estructura absorbente durante un período de tiempo corto.

d. El vapor de presión baja pasa a través de los canales en la estructura absorbente. El vapor inicialmente se condensará y transferirá su calor de condensación latente a la estructura absorbente en la parte delantera de la estructura absorbente. El calor de condensación eleva la temperatura de la estructura absorbente y proporciona energía para impulsar el proceso de desorción de CO₂ de la estructura absorbente. Finalmente, la parte delantera de la estructura absorbente alcanzará la temperatura de saturación y el CO₂ liberado se extraerá mediante el vapor o un ventilador. Este proceso se adelantará en la estructura absorbente desde la parte delantera de la estructura absorbente donde el vapor ingresa hasta que se libera el CO₂ (cabe destacar que la fracción liberada dependerá de la estructura absorbente y la temperatura del vapor utilizado). Solamente se proporcionará una cantidad adecuada de vapor para lograr la desorción del CO₂ de la estructura absorbente para minimizar el vapor utilizado y minimizar la cantidad de vapor mezclado con el CO₂ liberado. A medida que el condensado y luego el vapor pasan a través de la estructura absorbente y calientan el absorbente, el CO₂ se liberará de la estructura absorbente y se transferirá al vapor y condensado. El condensado tendrá una capacidad limitada para «sostener» el CO₂ y una vez saturada el agua «ácida» no sostendrá más CO₂ y el CO₂ permanecerá en la fase de vapor a medida que se extrae mediante el vapor o con un ventilador. Una vez que el vapor ha pasado a través de la estructura absorbente debe condensarse para liberar el CO₂. Esto se logra en el condensador 2106 que utiliza agua refrigerante para retirar el calor. La corriente recogida tendrá algo de vapor mezclado en esta que se minimizará en la medida en que sea posible, y el vapor debe condensarse para separarse del CO₂. De manera alternativa, el vapor podría condensarse, usando pérdida de calor a la atmósfera, en una tubería no aislada o una tubería con aletas. Este calor es una pérdida para el sistema, aunque una alternativa sería utilizar el aire que sale de la estructura absorbente en la etapa de absorción (Etapa 1 anterior) para condensar el vapor. Esto elevaría la temperatura del aire en la salida de la estructura absorbente y proporcionaría una fuerza impulsora adicional para mover el aire a través de la estructura absorbente y reducir los requisitos energéticos.

e. Para enfriar la estructura absorbente antes de reemplazarla en la corriente de aire se hace pasar un gas inerte a través de la estructura absorbente hasta que se enfría hasta una temperatura indicada para evitar el daño a la estructura absorbente cuando se coloca nuevamente en la corriente de aire.

f. Una vez que se ha retirado el CO₂ del absorbente y se ha enfriado la estructura absorbente, la estructura absorbente se eleva nuevamente a la corriente de aire. El aire continuará enfriando la estructura absorbente y retirará cualquier humedad restante. Luego, la estructura absorbente retirará el CO₂ hasta que ocurra el avance indicado (ver Etapa 1)

y luego la estructura absorbente desciende a la posición de regeneración y se repite el proceso.

g. El condensado del proceso de desorción (retirando el CO₂ de la estructura absorbente) contiene CO₂ en niveles de saturación. Este condensado estará cercano a la temperatura de saturación (dado que solo se agrega vapor suficiente al sistema para lograr el retiro del CO₂) y se recicla en una caldera 2100 donde se usa el vapor de baja presión de una instalación (central petroquímica o central eléctrica) para regenerar el vapor utilizado para calentar la estructura absorbente. La reutilización del vapor saturado de CO₂ elimina el requisito de tratar grandes cantidades de agua ácida.

Cabe destacar que, en cada una de las técnicas de eliminación de vapor descritas anteriormente, hay dos bucles de vapor cerrados conectados por un intercambiador térmico. Un bucle de vapor suministra el calor de proceso y regresa al condensado caliente de la caldera generado por el calentamiento del bucle que realiza la eliminación de vapor. El otro bucle de vapor es el bucle de vapor que realiza la eliminación de vapor y la regeneración de la estructura absorbente.

La eliminación de vapor, como se describió anteriormente, se realizará de la manera anterior mientras que la estructura absorbente se ubica en la caja de regeneración 1014 que se muestra y describe con relación a las Figuras 10a, 10b-1, 2-1, 2. Una vez que se ha retirado el CO₂ de la estructura absorbente, se eleva la estructura absorbente de la caja de regeneración 1014 nuevamente a la corriente de aire cargado de dióxido de carbono, como también se muestra y describe con relación a las Figuras 10a, 10b-1, 2. La corriente de aire cargado de dióxido de carbono enfriará la estructura absorbente y retirará cualquier humedad restante. Luego, la estructura absorbente retirará el CO₂ hasta que ocurra el avance indicado y luego la estructura absorbente desciende a la posición de regeneración en la caja de regeneración 1014.

Estructura de sedimento recubierto de absorbente y concepto de las Figuras 11a, 11b

Las Figuras 11a y 11b muestran 2 ejemplos de otra estructura y técnica para retirar dióxido de carbono de un flujo de aire cargado de dióxido de carbono, y regenerar un absorbente usado para absorber o unirse al dióxido de carbono, de acuerdo con los principios de la presente invención.

En las estructuras y técnicas de las Figuras 11a y 11b, las partículas, preferiblemente de tamaño de sedimento, fluyen mediante gravedad hacia una fuente de suministro de sedimentos/recipiente de almacenamiento 1100. Los sedimentos se recubren con el absorbente (p. ej., una amina) que absorbe o se une al dióxido de carbono en un flujo de aire cargado de dióxido de carbono que fluye a través de los sedimentos. Los sedimentos se pueden suministrar selectivamente a través de una estructura de válvula 1102 hacia un recipiente en contacto con el aire 1104, y un flujo de aire cargado de dióxido de carbono se dirige a través del recipiente 1104, para que el absorbente absorba o se una al dióxido de carbono y retire el dióxido de carbono del aire. Se proporciona un recipiente de regeneración 1106 debajo del recipiente en contacto con el aire 1104. Los sedimentos pueden dirigirse selectivamente al recipiente de regeneración 1106, donde el calor de proceso se dirige a los sedimentos, para retirar el dióxido de carbono del absorbente y regenerar el absorbente. Los sedimentos con el absorbente regenerado luego se dirigen a una estructura de elevación vertical 1108, donde se redirigen a una ubicación que permite que fluyan hacia la fuente de suministro/recipiente de almacenamiento 1100 y continúen el proceso de retiro del dióxido de carbono. La estructura de elevación vertical 1108 puede comprender, p. ej., una estructura de soplado de aire, un elevador, un transportador helicoidal, etc. que dirige los sedimentos nuevamente a la ubicación que permite que reinicien el proceso de retiro de dióxido de carbono. La diferencia entre los sistemas y técnicas de las Figuras 11a y 11b es que en el sistema y la técnica de la Figura 11a, el aire cargado de dióxido de carbono fluye en sentido descendente a través de una masa de sedimentos contenidos en el recipiente en contacto con el aire 1104, mientras que en el sistema y la técnica de la Figura 11b, el aire cargado de dióxido de carbono fluye horizontalmente a través de los sedimentos que luego fluyen hacia el recipiente en contacto con el aire 1104.

La estructura y las técnicas de las Figuras 11a, 11b son útiles para retirar dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono, y también pueden ser útiles para retirar dióxido de carbono de los gases de combustión que emanan de una fuente que de lo contrario dirigiría el dióxido de carbono hacia la atmósfera. Específicamente, la estructura y las técnicas de las Figuras 11a y 11b se pueden usar para proporcionar sedimentos recubiertos por absorbente directamente en la trayectoria de los gases de combustión que emanan de una fuente y que de lo contrario se dirigirían hacia la atmósfera. Los sedimentos recubiertos por absorbente se pueden usar para retirar el dióxido de carbono de los gases de combustión, y luego el absorbente se puede tratar con calor de proceso, para retirar el dióxido de carbono de los sedimentos (para que pueda extraerse y aislarse), y para regenerar el absorbente en los sedimentos (para que puedan continuar utilizándose para retirar el dióxido de carbono de los gases de combustión).

También se debería destacar que si bien las estructuras de las Figuras 11a, 11b se orientan verticalmente, puede ser deseable que determinadas estructuras (p. ej., los lechos de partícula) se inclinen (para facilitar que el agua que se condensa del vapor durante la regeneración baje hasta el fondo del lecho de partículas y no bloquee el lecho de partículas), o incluso se orienten horizontalmente (también para tratar el problema del agua condensada).

Sumario de las formas de realización adicionales de la presente invención

La presente invención ilustra métodos capaces de captar dióxido de carbono de una mezcla de aire ambiental y un

porcentaje relativamente pequeño de gases originados por combustión. La expresión «aire ambiental», como se usa en la presente memoria descriptiva, se refiere a e incluye aire no encerrado en las condiciones y concentraciones de materiales presentes en la atmósfera en una ubicación particular.

5 La mejora adicional de la presente invención proporciona un método para retirar dióxido de carbono de la atmósfera ambiental al dirigir el aire ambiental cargado de CO₂ a través de una estructura absorbente porosa que se une selectivamente de forma extraíble a (capta) CO₂, preferiblemente en condiciones ambientales, y retirar (eliminar) CO₂ de la estructura absorbente (y regenerar así de manera eficaz la estructura absorbente) usando calor de proceso, preferiblemente en forma de vapor a baja temperatura, a una temperatura preferiblemente de no más de 120 °C para calentar la estructura absorbente y para retirar el CO₂ de la estructura absorbente, y más preferiblemente usando vapor como el transportador de calor. La estructura absorbente es preferiblemente un sustrato sólido poroso que sostiene en su superficie sitios de unión a amina para CO₂.

10 Según la presente invención, el aire mezclado en un «mezclador» de aire/combustión se transporta hacia y en contacto con un absorbente, el absorbente se mueve por turnos entre posiciones de captura y regeneración de dióxido de carbono. Después de la etapa de captura de dióxido de carbono, el absorbente se mueve a una posición de regeneración de «eliminación», donde el vapor cogenerado mediante el calor de proceso se usa para «eliminar» el dióxido de carbono del absorbente, luego de lo cual se repiten los ciclos de captura y regeneración.

15 La ventaja inesperada de captar CO₂ a temperatura ambiente se vuelve posible mediante la efectividad inesperada de eliminación de vapor del CO₂ de la estructura absorbente usando calor de proceso, específicamente, usando vapor a presión atmosférica. Además, la razón por la cual se puede usar dicho vapor a baja temperatura es el mecanismo del vapor. A medida que el frente de vapor continúa hacia y a través de la estructura absorbente, gradualmente calienta la estructura a medida que se condensa el vapor. Detrás del frente de vapor tendrá lugar una presión parcial baja de CO₂, como resultado de la presencia del vapor, que fomentará que se elimine más CO₂. Por lo tanto, el vapor funciona detrás del frente de vapor como gas de barrido, o purga. Es decir, en el frente el vapor aleja el CO₂ mediante calor, y detrás mediante dilución de presión parcial.

20 De acuerdo con una forma de realización de la presente invención, la estructura absorbente que capta CO₂ comprende preferiblemente un monolito con paredes (esqueleto) (muy) porosas que contiene sitios de unión a amina que se unen selectivamente a CO₂. En otra forma de realización, el monolito tiene paredes porosas (sustrato) y sobre las superficies, o en los poros, se deposita un material que contiene un grupo amina que se une selectivamente a CO₂. En otra forma de realización, el esqueleto muy poroso monolítico ha depositado en sus superficies un recubrimiento de un sustrato muy poroso formado por un material que sostiene selectivamente el material que contiene un grupo amina.

25 En aun otro ejemplo de la presente invención, el material que contiene un grupo amina es transportado por un sustrato, en forma de partículas sólidas relativamente pequeñas, que incluyen tanto un lecho fijo como móvil.

30 En aun otro ejemplo, el propio sustrato se forma de un esqueleto que contiene amina polimerizada. Más preferiblemente, en las condiciones que se cumplen en la mayoría de los países, el absorbente amina es un polímero solamente con grupos amina primarios, es decir, el átomo de nitrógeno se conecta con dos átomos de hidrógeno. Sin embargo, cuando las condiciones ambientales están a temperatura extremadamente baja, p. ej., inferior a 0 °C, como se puede encontrar en la mayoría de las zonas de Alaska o el norte de Escandinavia o Asia, se cree que las aminas secundarias y terciarias con unión más débil pueden ser eficaces, ya que son para gas de combustión de alta concentración.

35 La presente invención está diseñada para captar dióxido de carbono de la atmósfera en condiciones ambiente. Las condiciones ambiente incluyen presión sustancialmente atmosférica y temperaturas en el intervalo de aproximadamente -(menos)20 °C a aproximadamente 35 °C. Se reconocerá que el aire ambiente no tiene una concentración de CO₂ fija.

40 El CO₂ captado se elimina preferiblemente del absorbente usando calor de proceso en forma de vapor saturado, regenerando así el absorbente. El vapor saturado está preferiblemente a una presión sustancialmente a o cerca de la presión atmosférica y una temperatura cercana a 100 °C, es decir, hasta aproximadamente 130 °C, donde 105-120 °C es un intervalo preferido. También cabe destacar que la temperatura del vapor entrante debería supercalentarse a la presión en que se suministra al presente proceso, es decir, a una temperatura superior a la temperatura en equilibrio a la presión de la estructura absorbente, en la cámara de regeneración. Después de que el CO₂ se elimina del absorbente, luego se puede separar fácilmente del vapor mediante condensación del vapor y retiro del CO₂. El agua condensada, aún caliente, y cualquier vapor, se recicla en el generador de vapor del proceso para ahorrar la energía térmica razonable. El aire pobre en CO₂ se libera nuevamente al aire exterior (ambiente).

45 Además, en aun otro de sus aspectos, la presente invención se lleva a cabo preferiblemente inmediatamente adyacente al sitio industrial que usa combustible de carbono, quemando un combustible que contiene carbono para proporcionar calor y energía al sitio, y en donde un pequeño porcentaje, preferiblemente no más de aproximadamente 5 % en volumen, y más preferiblemente entre aproximadamente 1 y 3 % en volumen, de gas del combustible que se

esté consumiendo, se mezcla con el aire antes de dirigirse a las superficies del absorbente.

En aun otra forma de realización, puede agregarse hasta aproximadamente 25 % en volumen de un gas efluente al aire. Como antes, es importante que la mezcla se limite a una concentración de CO₂ a la cual la velocidad de captura de CO₂ no fuera lo suficientemente alta para que el calor exotérmico liberado durante la absorción eleve la temperatura del monolito cargado con el absorbente hasta el punto en que su efectividad para captar CO₂ se vea disminuida. Cabe destacar que el término gas «efluente» puede incluir un verdadero gas de combustión, es decir, de la combustión de combustibles de hidrocarburos, tales como fósiles. Sin embargo, el gas efluente también puede ser el efluente de un proceso de generación de combustible de hidrocarburos, tal como el proceso de IGCC de gasificación de carbón, o en sentido más amplio cualquier escape de un sistema de generación de energía basado en la combustión de un hidrocarburo o cualquier proceso que se realice a temperatura alta generada por la oxidación de un hidrocarburo.

La fracción del CO₂ captado depende de la temperatura de una manera proporcionada por el isoterma de Langmuir, que para el absorbente de amina primaria disponible es exponencial con una temperatura debido a su alto calor de reacción, es decir, aproximadamente 84kJ/mol. Un aumento de temperatura de 25 °C a 35 °C reduce el porcentaje de sitios de amina que puedan captar CO₂ en equilibrio en aproximadamente e⁻¹. Por supuesto, en climas fríos esta será una restricción menos seria. p. ej., si la temperatura ambiente es de 15 °C, un aumento de 10 °C brindaría el mismo rendimiento que el caso de 25 °C. El isoterma de Langmuir para una amina primaria es cercano al óptimo a aproximadamente 15 °C en términos de la fracción de sitios de amina en equilibrio y el calor razonable necesario para recoger el CO₂, y regenerar el absorbente de manera eficaz a aproximadamente 100 °C. Se muestra un diseño conceptual, donde el gas efluente se mezcla con el aire a través de un aparato tipo carburador, y se analiza el aumento de la temperatura, en la Figura 27.

Al combinarlo con un efluente de proceso de CCS, se evitan, o al menos se minimizan, muchos de los problemas asociados directamente con la mezcla del gas efluente, especialmente en proporciones superiores al 5 %. Dichos problemas con la inyección directa de gas efluente incluyen la temperatura alta del gas efluente, que genera varios problemas: La cantidad de gas efluente que debe agregarse al aire es relativamente pequeña (no más de 25 % en peso). La corriente de aire y la corriente de gas efluente están ambas a baja presión y, por lo tanto, eficazmente, no hay energía en estas corrientes que se pueda usar para la mezcla sin aumentar la disminución de presión. La corriente de aire podría variar en temperatura (dependiendo de la ubicación de la central) entre -34.44 °C (-30 °F) y +43.33 °C (+110 °F). La temperatura alta tiene un efecto en el flujo volumétrico y la energía necesaria para el ventilador. Una temperatura de aire baja podría afectar el proceso dado que el gas efluente contiene una cantidad significativa de agua y tiene un intervalo de punto de condensación entre 48.9 °C (120 °F) y 62.8 °C (145 °F), dependiendo del tipo de combustible, velocidad de aire en exceso, contenido de humedad del aire de combustión, impurezas, etc. Por lo tanto, si el gas efluente no se mezcla bien con el aire o el conducto de gas efluente entra en contacto con el aire ambiente frío, puede ocurrir la condensación. El condensado de gas efluente es corrosivo y su presencia puede generar daño a la tubería, el conducto o el equipo, a menos que se usen materiales de construcción adecuados.

Además, el gas efluente puede contener partículas sólidas (incluso detrás de los filtros o cámara de filtros) que podrían, con el tiempo, bloquear los pequeños conductos propuestos para el sustrato. Por lo tanto, se debe tener particular cuidado para entender el posible bloqueo de las partículas durante el funcionamiento normal. Por último, otros contaminantes tales como óxidos de azufre, en el gas de combustión que podría desactivar el absorbente, además de ser corrosivo para el equipo.

La mayoría de estos problemas se evitan cuando se usa el método de la presente invención, incluido el uso de un carburador como se describe en la presente memoria, al integrar esto en un proceso de depuración de gas de combustión, tal como el proceso de CCS conocido, tal como el gas efluente del proceso de CCS de gas de combustión en el proceso de la presente invención.

Combinar este proceso con el proceso de CCS también mejora los costos totales. Como se sabe, el costo incremental por tonelada de retiro de CO₂ aumenta a medida que aumenta el porcentaje de CO₂ retirado, y se vuelve muy costoso al ir de 90 % a 95 % de velocidad de remoción. A medida que se reduce el porcentaje captado por debajo de un nivel determinado, también se vuelve muy costoso, ya sea debido a que la penalización por el CO₂ no captado aumenta en situaciones en las que las emisiones de CO₂ están reguladas y/o que la fuente siga emitiendo CO₂ de manera significativa, lo que reduce el valor del proceso total. Por este motivo, el objetivo para el gas efluente del proceso de CCS es usualmente el 90 % de remoción. Por otro lado, los costos de la presente invención bajan a medida que aumenta el porcentaje de CO₂ en la corriente de proceso mediante la adición del gas efluente al aire, siempre que la concentración de CO₂ permanezca por debajo de este, donde el aumento de temperatura de la captura exotérmica disminuye la eficacia del absorbente.

Este proceso se integra al proceso de CCS, de manera que el sistema carburador se use para mezclar el aire con el efluente del proceso de CCS, en lugar de directamente con el mismo gas de combustión. Existe un punto óptimo, de un costo por tonelada de CO₂, para la etapa de CCS. Por ejemplo, si el proceso de CCS retira solamente el 80 % del CO₂ del gas de combustión, y pasa el efluente de la etapa de CCS a la etapa de captura de aire presente, la mezcla del CO₂ restante (si 10 % de CO₂ en el gas de combustión, a una remoción de 80 %, produce 2 % en el efluente de la etapa de CCS). En dicho caso, si se mezcla el 2 % de la corriente de CO₂ en la entrada de aire de la presente

invención, por cada 1 % de dicha corriente efluente mezclada en el aire, aumentaría la concentración de CO₂ en el método de la presente invención en aproximadamente 50 %. El aumento de la temperatura asociado se puede determinar para esta forma de realización, donde el aumento de la temperatura depende de la velocidad de absorción de CO₂ y, por lo tanto, la concentración incidental de CO₂ en la corriente de proceso mezclada que entra en contacto inicialmente con el absorbente.

Como otro ejemplo, si se mezcla en 5 % de efluente, se reducirían los costos en un factor de 3; la concentración sería 3 veces superior en la corriente mezclada que en el aire solamente, en un proceso de captura de aire independiente. El aumento de temperatura para dicho caso es cercano al caso de 1 % de metano para mezclar la versión de corriente de gas efluente completa del carburador, o aproximadamente 3.5 grados C. Cabe destacar que, si la captura de aire solamente retiró el 70 % del CO₂ en la corriente mezclada, los procesos combinados (es decir, el CCS y el proceso de la presente) retirarían más del 100 % del CO₂ emitido por la central eléctrica. El resultado combinado sería producir energía libre de dióxido de carbono, u otros procesos que utilizaron combustible fósil como la fuente de energía. El costo combinado sería inferior al costo de intentar realizarlo todo en una etapa, al optimizar las porciones de CO₂ retirado en cada etapa.

Aparte de lograr beneficios directos de la reducción del costo por tonelada de CO₂ recogido, al optimizar el costo de cada uno del proceso de CCS y el proceso de CO₂ de la presente invención, también existen otros beneficios de dicha integración del proceso. Estos incluyen que la corriente de escape del procesamiento de gas de combustión inicial está limpia de partículas y otras impurezas, lo que elimina el problema/costo de limpiar el gas de combustión antes de llevar a cabo la presente invención, optimizando adicionalmente la eficacia y disminuyendo el costo de energía. Se persiguen muchos procesos de remoción de CO₂ precombustión y poscombustión diferentes y muchos podrían surgir en el futuro. Los detalles de la cantidad mezclada y el procesamiento adicional posible del escape de la primera etapa de procesamiento de gas de combustión variarán en detalle, pero el concepto básico permanece incambiado: limpiar y retirar parcialmente el CO₂ del gas de combustión, o en sentido más amplio, el «efluente» y luego completar el retiro de CO₂ en el proceso de la presente invención mezclado con una cantidad mayor de aire.

Breve descripción de las figuras adicionales

a. La Figura 16, en la presente, es un diagrama de bloques generalizado de un sistema para retirar dióxido de carbono de la atmósfera;

b. Las Figuras 17A-B presentan diagramas de flujo generalizados que muestran las etapas sucesivas en un método preferido según la presente invención para retirar dióxido de carbono de la atmósfera que extrae calor de proceso de una fuente que quema carbón, y obtener una corriente purificada de CO₂ relativamente de bajo costo;

c. Las Figuras 18A-B presentan diagramas de flujo generalizados que muestran las etapas sucesivas en un método preferido según la presente invención para retirar dióxido de carbono de la atmósfera que extrae calor de proceso de una fuente de energía que no quema carbón, y obtener una corriente purificada de CO₂ relativamente de bajo costo;

d. La Figura 19 presenta un diagrama de flujo generalizado que muestra las etapas sucesivas en un método preferido alternativo según la presente invención para retirar dióxido de carbono de la atmósfera y obtener una corriente purificada de CO₂ relativamente de bajo costo;

e. La Figura 20 presenta un diagrama de flujo más específico que muestra las etapas sucesivas en el método preferido según la presente invención para retirar dióxido de carbono de la atmósfera y obtener una corriente purificada de CO₂ relativamente de bajo costo;

f. Las Figuras 21A,B son diagramas que muestran la formación en forma de V preferida de los múltiples módulos monolíticos para captar un millón de toneladas de CO₂ de la atmósfera;

g. La Figura 22 es una ilustración esquemática de una versión preferida de una formación de múltiples ventiladores para proporcionar el flujo de aire a través de la formación en forma de V de módulos de captura de CO₂ cuando no hay viento;

h. La Figura 23 es una ilustración esquemática de un sistema elevador preferido para mover la estación primaria y de eliminación de CO₂; y

i. Las Figuras 24 A-C son ilustraciones esquemáticas que muestran la estructura elevadora que mueve la estructura absorbente entre las dos estaciones.

j. Las Figuras 25, 26A y 26B son ilustraciones esquemáticas que muestran medios alternativos para inyectar una pequeña proporción de gases efluentes calientes en el aire entrante en la etapa de captura de CO₂.

k. La Figura 27 representa el cambio en el uso de energía y temperatura del absorbente con contenido de CO₂ inicial variable en el gas entrante.

l. La Figura 28 representa un diagrama de flujo de la forma de realización del proceso de remoción de CO₂ de dos

etapas de la presente invención.

Descripción detallada de las formas de realización adicionales de la presente invención

Con referencia al diagrama de bloque generalizado del proceso de la presente invención que se muestra en la Figura 16, la etapa 1 permite mover una masa fluida de aire ambiente con la concentración de CO₂ relativamente baja usual en la atmósfera, con una disminución de presión relativamente baja (en el intervalo de 100-1000) pascales. El flujo de CO₂ que contiene aire de la etapa 1 pasa, en la etapa 2, a través de un lecho, o lechos, de gran área, de absorbente para el CO₂, el lecho tiene alta porosidad y, en las paredes que definen los poros, un absorbente de CO₂ muy activo, es decir, donde la absorción genera un calor de reacción relativamente alto.

Dicho absorbente de CO₂ muy activo es preferiblemente un material que contiene un grupo amina primario, que también puede tener algunos grupos amina secundarios presentes. Los grupos amina primarios son generalmente más eficaces a las temperaturas ambiente usuales en el intervalo de aproximadamente 10-25 °C. Al utilizar todos los grupos amina primarios, especialmente en forma de polímeros, se puede maximizar la carga. La concentración relativamente baja de CO₂ en el aire (en oposición a los gases efluentes), requiere un absorbente fuerte. Las aminas primarias tienen un calor de reacción de 84Kj/mol de CO₂ que indica enlaces más fuertes, mientras que las aminas secundarias solamente tienen un calor de reacción de 73Kj/mol. Cabe destacar que, a temperatura inferior, también podrían ser eficaces aminas secundarias de -10 a +10 °C.

Más generalmente, se debería destacar que, en sentido amplio, la presente invención se basa no solamente en la eficacia de las aminas primarias en condiciones ambientales, sino también en el reconocimiento de que retirar el CO₂ del aire en condiciones ambientales es práctico, con la condición de que eliminar el CO₂ del absorbente sea igualmente práctico a temperatura relativamente baja. Por lo tanto, la presente invención contempla el uso de otros absorbentes con las propiedades deseables de las aminas primarias con respecto a la captura de aire de CO₂, dichos absorbentes se usarían en la invención del proceso descrito en la presente solicitud.

Las aminas primarias funcionan eficazmente en concentraciones de captura de aire (de aire atmosférico) en condiciones ambientales. La carga de CO₂ depende mucho de la relación del calor de reacción/K (constante de boltzmann) T (temperatura); la diferencia de calor de reacción entre aminas primarias y secundarias, como se mostró anteriormente, puede provocar un factor de aproximadamente 100 veces la diferencia de carga, según la ecuación de isoterma de langmuir conocida. Los grupos amina se respaldan preferiblemente en un esqueleto muy poroso, que tiene una gran afinidad con las aminas o sobre el cual, o en el cual, pueden depositarse las aminas.

De manera alternativa, los grupos amina pueden formar parte de un polímero que forma por sí mismo la estructura de esqueleto muy porosa. Una estructura de óxido de aluminio muy porosa es muy eficaz al utilizarse como el esqueleto para sostener las aminas. Este esqueleto de cerámica tiene un volumen de poro y superficie para lograr altas cargas de aminas en mmoles de sitios de nitrógeno de amina por gramo de sustrato de material poroso. Tal material de soporte de esqueleto preferido tiene 230 celdas por 16.3871 centímetros cúbicos (230 celdas por pulgada cúbica) con un espesor de 15.24 centímetros (seis pulgadas). Otra estructura que se puede usar se basa en un material poroso de sílice conocido como cordierita y fabricado y comercializado por Corning bajo la marca registrada CELCOR. El producto CELCOR se fabrica con macro canales rectos que se extienden a través del monolito, y las paredes interiores de los canales se recubren con un recubrimiento de material poroso, tal como óxido de aluminio, en los poros del cual se pueden unir o depositar (y el cual, preferiblemente, es adherente a los compuestos de amina) las aminas.

Es posible reducir el costo del proceso al hacer el monolito más delgado, al aumentar la densidad de los grupos amina primarios por volumen y, por lo tanto, al requerir menos volumen de monolito para lograr un tiempo de absorción mayor que el tiempo para mover el lecho entre absorción y regeneración y para llevar a cabo la eliminación de vapor. Esto se puede lograr al utilizar un esqueleto en contacto con el monolito que se fabrica de un polímero basado en amina primaria, pero también se logra al menos parcialmente al formar la estructura del monolito de óxido de aluminio. Si bien el óxido de aluminio no se forma como una estructura tan estructuralmente durable como la cordierita, dado que se pueden quitar las condiciones que se cumplen a la temperatura ambiente de la captura de aire o las temperaturas relativamente bajas a las cuales se absorbe CO₂ en las aminas a temperatura ambiente, la resistencia estructural del óxido de aluminio es adecuada.

Las siguientes modificaciones son importantes para la captura de aire dado que minimizan el costo de fabricar la estructura, así como la cantidad de energía necesaria para calentar la estructura de soporte de amina hasta la temperatura de eliminación.

También es útil proporcionar interruptores relativamente delgados, con capacidad de carga alta para CO₂ con ciclización rápida entre absorción y regeneración. Esto usaría la versión de dos lechos en tándem donde una absorben y la otra regenera. Es preferible utilizar lechos tipo panqueque planos, con una longitud, en la dirección del flujo de aire, en el intervalo de no más de aproximadamente 50.8 centímetros (20 pulgadas) y aproximadamente 0.762 milímetros (0.03 pulgadas), o incluso más delgado. El intervalo de espesor más preferido es de no más de aproximadamente 20.32 centímetros (8 pulgadas), y más preferiblemente no más gruesos que aproximadamente 7.62 centímetros (3 pulgadas).

Al utilizar la cordierita CELCOR recubierta con óxido de aluminio, o cualquier estructura de monolito proporcionada con canales que pasan el espesor total del monolito, la longitud del interruptor en la dirección del flujo de aire, para una disminución de presión fija y flujo de aire laminar fijo, y con una fracción vacía fija, presenta una escala como el área de las aberturas de canal cuadrado individuales en el monolito CELCOR, y el tiempo de ciclo, según se determina mediante el absorbente que se satura con CO₂ o hasta algún nivel fijo de absorción de CO₂, presenta una escala con el mismo factor. La fracción vacía es la relación de área de entrada abierta a área de entrada total de la cara delantera del monolito, enfrentada al flujo de aire. preferiblemente, la fracción vacía del monolito es de entre 0.7 y 0.9, es decir, entre 70 % y 90 % de canales abiertos.

Por lo tanto, a medida que disminuye el tamaño de las aberturas de monolito individuales para una fracción vacía fija, la longitud del canal, es decir, el espesor de la estructura de monolito para una disminución de presión fija, disminuirá proporcional al área de dicha abertura, mientras que el tiempo de absorción para alcanzar un nivel fijo de absorción, o para alcanzar la saturación, disminuirá de manera proporcional a la misma velocidad en que disminuye la longitud. Dado que el costo disminuirá a medida que disminuye la longitud (cuanto más corto sea el dispositivo, menor será el costo, aproximadamente proporcional a la longitud), limitado por el costo adicional que se puede generar a medida que se acorta el tiempo de ciclo y el costo para fabricar monolitos de paredes más delgadas. Cuánto se puede reducir la longitud estará limitado por la carga de absorbente, p. ej., la cantidad de grupos amina que se pueden colocar en los poros de las paredes, por volumen unitario de las paredes del monolito, cuanto mayor sea la carga, menor será la longitud del monolito, para un tiempo de ciclo fijo.

Los parámetros anteriores suponen que se logre una carga constante determinada (de grupos absorbentes, p. ej., grupos amina primarios). Además, la velocidad del aire entrante se supone constante en los comentarios anteriores. Se debe entender que la disminución de presión por tonelada de captura de CO₂ aumenta a medida que aumenta la velocidad del flujo de aire, que aumenta el costo de la electricidad para mover el aire, en la medida en que las fuerzas naturales, como el viento, no sean suficientes para lograr el flujo de aire deseado. El costo del proceso total, aparte del costo de electricidad, disminuye a medida que aumenta la velocidad de flujo de aire. Por lo tanto, la elección de velocidad de aire es un acuerdo entre el costo capital, que se reduce a medida que aumenta la velocidad del flujo de aire, y los costos operativos, que aumentan a medida que aumenta la velocidad de flujo de aire. Se prefiere que funcione con un flujo de aire entrante en el intervalo de 2-4m/seg. Los costos relativos variarán dependiendo de las condiciones locales de cada sitio de central, p. ej., si hay un viento predominante fiable presente o no y el costo local de la electricidad.

Además, se ha descubierto que el tiempo de captura de CO₂ puede ser varias veces mayor que el tiempo de eliminación de CO₂. Por lo tanto, es posible el ahorro de costo de capital utilizando solamente un único lecho con un tiempo de absorción diez veces superior al tiempo de movimiento más el tiempo de eliminación de vapor. El tiempo de eliminación de vapor puede acortarse al aumentar la velocidad de flujo de vapor durante la regeneración. De manera alternativa, es posible usar la forma de realización de lecho en tándem que puede eliminar dos o más lechos absorbentes usando la misma cámara de eliminación. Esto mejoraría de manera adicional el ahorro de costo de capital al acortar la longitud de flujo de cada uno de los dos lechos. Al funcionar con 2 lechos de absorción, cada lecho absorbente podría experimentar una reducción de su espesor en un factor grande, p. ej., 10 veces o más. De manera específica, dos o más estructuras de material absorbente delgadas podrían moverse entre una posición de captura de aire y la cámara de eliminación. Esto permitiría la eliminación de un lecho, lo que incluye enfriarlo hasta la temperatura ambiente desde la temperatura de eliminación, mientras que el otro lecho, regenerado, enfrenta flujo de aire fresco.

En el límite de interruptores delgados, el monolito de cerámica podría remplazarse por un interruptor tipo lámina delgada flexible, o tela, donde la lámina, p. ej., una tela, se recubre con el absorbente y es flexible, para poder moverla de manera continua sobre rodillos en lugar de intermitentemente en un elevador. Dicha lámina flexible podría, en el límite, ser un proceso continuo donde la lámina que transporta el absorbente se mueve continuamente entre las etapas de absorción y regeneración sobre un conjunto de rodillos, siempre que pueda formarse eficazmente un cierre entre las etapas de captura y eliminación del proceso. En el límite, a medida que se acorta la longitud, se hacen posibles otras formas de realización. Por ejemplo, dicha otra forma de realización podría incluir un interruptor flexible delgado, p. ej., formado a partir de una lámina delgada o una tela. El interruptor flexible puede moverse de manera continua entre la posición de absorción y la posición de regeneración, p. ej., en algún dispositivo tipo rodillo continuo. En teoría, esto sería similar a la versión en tándem de la forma de realización elevadora descrita en la presente en detalle, ya que mientras una parte del interruptor se mueve hacia la cámara de absorción, otra parte se mueve hacia la cámara de regeneración. Esto convierte esencialmente el diseño elevador en lote en un proceso de movimiento continuo. Este diseño depende de cierres confiables que puedan separar la cámara de absorción de la cámara de regeneración mientras el interruptor flexible se mueve entre las cámaras.

El siguiente modelo informático proporciona un procedimiento útil para optimizar la eficacia del proceso de captura de CO₂ de la presente invención. Este modelo se basa en los siguientes parámetros de rendimiento claves del proceso

PARÁMETROS DE RENDIMIENTO CLAVES DEL PROCESO:

Csh = Calor específico del material de esqueleto de soporte, en joules/kg grad K

d = Tamaño de poro promedio del esqueleto

HRs = Calor de reacción del absorbente(amina), en joules /mol de CO₂

L = Carga, moles de CO₂/kg de estructura absorbente;

5 Ld/a = carga real, en kg de CO₂ por metro cuadrado de área de entrada de aire del monolito en el monolito Corning de 230 celdas

Ns = Densidad de sitios de absorción de CO₂ en las superficies porosas, en cantidad de sitios por metro cuadrado de superficie de poro.

10 En general, a medida que aumenta la carga también es necesaria una eficacia de amina elevada, según lo define la fracción de sitios amina presentes disponibles para unirse a CO₂. Este es el motivo por el cual se prefieren las aminas primarias y también para ajustar la carga para minimizar el bloqueo de los poros. Los resultados experimentales indican que la carga óptima que equilibra la eficacia de amina con el aumento de la carga se encuentra entre 40 - 60 % en volumen de contenido de amina orgánica con respecto al sustrato/esqueleto poroso al cual se une o en cuyos poros se deposita.

Pcm = Densidad del material de esqueleto (p. ej., sílice u óxido de aluminio), en kg/metro cúbico

15 PORc = Porosidad,

PUR = Relación de CO₂ liberado al aire atrapado, pureza de CO₂,

RH = calor de reacción; Relación de calor razonable al calor de reacción RH durante la regeneración SH/RH.

Save = Área de superficie por volumen del esqueleto, en 1/metros cuadrados de superficie/metros cúbicos

SH = calor razonable

20 TA = Tiempo para llenar hasta saturación con CO₂, tiempo de absorción,

TS = Tiempo para regenerar usando eliminación de vapor,

w = espesor de la pared de poros del esqueleto

Parámetros de diseño importantes a tener en cuenta en el diseño de este proceso

25 La estructura porosa se especifica mediante el tamaño de poro/canal promedio d, y el espesor de pared de w. La porosidad PORc es la relación del área de pared abierta al área de superficie total perpendicular a la dirección de flujo de aire. En este modelo es igual a la relación del área de canal abierto promedio al área promedio total. Para esta aproximación, se ignora la naturaleza tortuosa de las curvas en los canales de las paredes del medio poroso. Por lo tanto, $PORc = d^2 / (d+w)^2$. El área de superficie por volumen se proporciona mediante $Savc = 4 d / (d+w)^2 = 4 PORc/d$.
30 La disminución de presión depende del tamaño de las aberturas en el canal, la fracción vacía del monolito, la longitud y velocidad de flujo de aire.

Estructura absorbente y funcionamiento general del absorbente

35 La Figura 12 es una ilustración esquemática de una estructura de sustrato de cerámica celular, de un tipo producido por Corning bajo la marca registrada CELCOR®, que se puede usar en una estructura absorbente, de acuerdo con los principios de la presente invención. El absorbente (p. ej., una amina) se transporta mediante (p. ej., se recubre o inmoviliza de otro modo en) el interior de uno o más de los sustratos de cerámica celulares de CELCOR®, que proporciona un área de superficie grande y baja disminución de presión, a medida que fluye el aire cargado de CO₂ a través del sustrato. La estructura absorbente puede comprender, p. ej., múltiples sustratos de cerámica celulares de CELCOR®, apilados como ladrillos, o un único sustrato, con el tipo de forma de panqueque descrito anteriormente con relación a la Figura 6 (es decir, área de superficie delantera mucho mayor al espesor), y el aire cargado de CO₂
40 se dirige a través de las celdas de la estructura absorbente. También se contempla que la estructura absorbente puede formarse incrustando el material absorbente en el recubrimiento, p. ej., de óxido de aluminio, en las paredes de la estructura de cerámica celular de CELCOR® para formar una estructura absorbente monolítica.

45 También cabe destacar que se forma una estructura incluso más preferida de ladrillos de óxido de aluminio poroso, en lugar de la sílice de cordierita. Si bien la estructura de óxido de aluminio no es tan fuerte física y/o térmicamente como la estructura de sílice, las condiciones menos rigurosas que se cumplen en este proceso de captura de temperatura ambiente, y en el proceso de eliminación a temperatura relativamente baja, permiten el uso de la estructura menos fuerte.

Además, cabe destacar que el sustrato, además de una estructura de cerámica, un material inorgánico, la estructura absorbente puede ser un material orgánico tal como el que se forma de una poliamina polimerizada al reticular el

polímero de amina para formar un polímero sólido, el polímero sólido debería ser capaz de extruirse a temperatura suficientemente baja para que no se volatilice el polímero, ni se ablande a la temperatura del vapor de eliminación, es decir, hasta 120 °C, que se usa para la regeneración del absorbente.

Los sitios de unión en la estructura porosa se determinan mediante la cantidad y dispersión de las aminas a través de la estructura porosa. Existen tres clases generalmente conocidas de absorbentes de aminas respaldados que se han usado en la presente situación. Los absorbentes de clase 1 que se prefieren en la presente se basan en soportes porosos impregnados con aminas monoméricas o poliméricas (Figura 12). Por lo tanto, las especies de amina se cargan físicamente sobre o en los poros de la estructura de soporte. Esta clase de absorbentes se describe en la bibliografía técnica, p. ej., en Xu, X.C., et ál., Preparation and characterization of novel CO₂ "molecular basket" adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41. *Microporous Mesoporous Mat.*, 2003. 62(1-2): p. 29-45 y Xu, X.C., et ál., Influence of moisture on CO₂ separation from gas mixture by a nanoporous adsorbent based on polyethylenimine-modified molecular sieve MCM-41. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005. 44(21): p. 8113-8119 y Xu, X.C., et ál., Novel polyethylenimine-modified mesoporous molecular sieve of MCM-41 type as high-capacity adsorbent for CO₂ capture. *Energy Fuels*, 2002. 16(6): p. 1463-1469. Los absorbentes de clase 2 se basan en aminas que se unen covalentemente al soporte sólido. Los métodos para formar dichos absorbentes de clase 2 en la estructura porosa útiles en la presente invención son conocidos en la técnica. Esto se ha logrado más a menudo al unir aminas a las paredes porosas del monolito de cerámica, p. ej., óxidos de sílice u óxidos de aluminio, mediante el uso de química de silano o mediante la preparación de respaldos poliméricos con cadenas laterales que contienen amina.

Los absorbentes de clase 3 se basan en soportes porosos sobre los cuales se polimerizan aminopolímeros *in situ*, comenzando por un monómero que contiene amina. Este tipo de clase 3 fue descrito para uso como absorbentes para captura de CO₂ por Hicks, J.C., et ál., Designing adsorbents for CO₂ capture from effluent gas-hyperbranched aminosilicas capable of capturing CO₂ reversibly. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008. 130(10): p. 2902-2903 y por Drese, J.H., et ál., Synthesis-Structure-Property Relationships for Hyperbranched Aminosilica CO₂ Adsorbents. *Adv. Funct. Mater.*, 2009. 19(23): p. 3821-3832. Cada una de estas clases de absorbentes se pueden usar para estudios de captura de CO₂ y regeneración de vapor.

Una estructura absorbente muy preferida es una en la cual la amina primaria se incorpora en la estructura del monolito que requiere solamente una etapa para realizarlo. Dicha forma de realización específica se puede realizar a partir de plástico/polímeros, que pueden sobrevivir debido a las condiciones leves utilizadas en la presente invención. El monolito puede ser un compuesto que incluye materiales inorgánicos no poliméricos, dicho compuesto tendría propiedades en términos de resistencia, porosidad, estabilidad que podrían ser útiles.

Se pueden realizar los siguientes procedimientos para proporcionar un absorbente de amina respaldado en sílice en partículas comercial suministrado por PQ Corporation (PQ-9023) o en espuma mesocelular. Para la preparación de todos los absorbentes, el sustrato de sílice se secó en primer lugar al vacío a 100 °C durante 24 h para retirar el agua absorbida en la superficie antes del uso. Una sílice en partículas comercial suministrada por PQ Corporation (PQ-9023) y una espuma mesocelular sintetizada en laboratorio se utilizaron como soporte. La sílice comercial está caracterizada por un área de superficie de 303 m²/g, un volumen de poro promedio de 1.64 cc/g. y un diámetro de poro promedio de 60 nm. La espuma mesocelular se preparó según una metodología de bibliografía, Wystrach, V.P., D.W. Kaiser, y F.C. Schaefer, PREPARATION OF ETHYLENIMINE AND TRIETHYLENEMELAMINE. *J. Am. Chem. Soc.*, 1955. 77(22): p. 5915-5918. De manera específica, en una síntesis típica, se usaron 16 g de copolímero tribloque EO-PO-EO Pluronic P123 (Sigma-Aldrich) como agente de plantilla y se disolvió en 260 g de agua DI con 47.1 g de HCl concentrado. Luego, se agregaron 16 g de trimetilbenceno (TMB, 97 %, Aldrich) a 40 °C y se agitaron durante 2 horas antes de agregar 34.6 g de ortosilicato de tetraetilo (98 %, Aldrich) a la solución. La solución se mantuvo a 40 °C durante 20 h antes de agregar 184 mg de NH₄F (en 20 mL de agua). La mezcla luego se envejece a 100 °C durante otras 24 h. Se filtró la sílice resultante, se lavó con agua, se secó en horno y se calcinó a 550 °C en aire durante 6 h para retirar la plantilla orgánica antes del uso adicional. La sílice de espuma mesocelular está caracterizada por un área de superficie de 615 m²/g, un volumen de poro promedio de 2.64 cc/g y diámetros de ventana y celda promedio de 12 nm y 50 nm.

En general, para un absorbente de clase 1, el compuesto de amina puede aplicarse a la estructura del sustrato poroso mediante impregnación física de las fases líquida o de vapor. El compuesto de amina se puede dispersar en los poros de la estructura del sustrato. En esta forma de realización, el volumen del poro se vuelve el parámetro fundamental que determina la carga y los poros de 5-15 nm son preferidos, pero la conclusión es querer paredes lo más delgadas posibles y, por lo tanto, la mayor porosidad posible que sea también lo suficientemente fuerte en términos físicos, para que el monolito sea estructuralmente fuerte. Como ejemplo de la preparación del absorbente de clase 1, se mezclaron poli(etilenimina) de bajo peso molecular de 18 kg (PEI, MN-600, Mw-800, Aldrich) y 90 L de metanol (99.8 %, Aldrich) en primer lugar durante 1 h. Posteriormente, se agregaron 30 kg de sílice en partículas amorfa (PQ Corporation, PD-09023) [o un sustrato adecuado (175 in²) del monolito CELCOR®] y se agitó el líquido durante 12 h adicionales. El solvente de metanol luego se retiró mediante evaporador rotativo, y el absorbente respaldado resultante («PQ-PEI») se secó adicionalmente al vacío a 75 °C durante la noche antes del uso.

Para la preparación del absorbente de clase 2, se mezclaron 90 L de tolueno anhidro (99.5 %, Aldrich) y 3 kg de sílice en partículas (PQ Corporation), o un sustrato de monolito adecuado (p. ej., un ladrillo del monolito CELCOR® con un

área de superficie delantera de 36 in², y un área de superficie de poro de 175 in²) en un recipiente de presión durante 1 h, luego se agregaron 30 kg de 3-aminopropiltrimetoxisilano (APTMS, Aldrich) a la mezcla. La mezcla se mantuvo en agitación vigorosa durante 24 h a temperatura ambiente. El absorbente respaldado resultante (PQ-Mono) se recuperó mediante filtración, se lavó con tolueno y acetona y luego se secó durante la noche, al vacío, a 75 °C.

5 Para el absorbente de clase 3, se hace reaccionar la espuma de sílice mesocelular (MCF) particulada [[o un sustrato adecuado (175 in²) del monolito CELCOR®]] con aziridina (un material muy reactivo pero tóxico) de manera similar, como se indica en la bibliografía (Hicks, J.C., et ál., Designing adsorbents for CO₂ capture from effluent gas-hyperbranched aminosilicas capable of capturing CO₂ reversibly. J. Am. Chem. Soc., 2008. 130(10): p. 2902-2903). Para esta síntesis, se dispersan 30 kg de MCF en 90 L de tolueno en un recipiente de presión adecuado y la mezcla se agita durante 1 h antes de agregar 60 kg de aziridina (que se sintetizó de acuerdo con el siguiente procedimiento, Wystrach, V.P., D.W. Kaiser, y F.C. Schaefer, PREPARATION OF ETHYLENIMINE AND TRIETHYLENEMELAMINE. J. Am. Chem. Soc., 1955. 77(22): p. 5915-5918), inmediatamente antes del uso. Después de agitación continua durante 24 h, se filtra el absorbente respaldado resultante (MCF-HAS), se lavó con tolueno y etanol, y se secó durante la noche al vacío a 75 °C.

15 El aire cargado de CO₂ pasa a través de la estructura absorbente, que preferiblemente tiene forma de panqueque, es decir, la dimensión en la dirección del flujo de aire es tanto como dos órdenes de magnitud inferior que las otras dos dimensiones que definen las superficies que se enfrentan a la trayectoria del flujo de aire, y los sitios amina en la estructura absorbente se unen al CO₂ hasta que la estructura absorbente alcanza un nivel de saturación determinado, o el nivel de CO₂ a la salida de la estructura absorbente alcanza un valor determinado que indica que el avance de CO₂ ha comenzado (el avance de CO₂ se refiere a que la estructura absorbente se satura suficientemente con CO₂ de manera que no se capte una cantidad significativa de CO₂ adicional mediante la estructura absorbente).

20 Cuando se desea retirar y recoger CO₂ de la estructura absorbente (y regenerar la estructura absorbente), de la manera que se describe adicionalmente más adelante con relación a las Figuras 10a-h, la estructura absorbente se retira de la corriente de aire cargado de dióxido de carbono y se aísla de la corriente de aire y de otras fuentes de ingreso de aire. Luego, el vapor pasa a través de la estructura absorbente. El vapor inicialmente se condensará y transferirá su calor de condensación latente a la estructura absorbente, a medida que pasa desde y a través de la parte delantera de la estructura absorbente hasta que toda la estructura absorbente alcanza la temperatura de saturación, luego, cuando el vapor entra en contacto con el absorbente calentado, se condensará adicionalmente de manera que para cada aproximadamente dos (2) moles de vapor se condensará para liberar calor latente suficiente para proporcionar el calor de reacción necesario para liberar un (1) mol del CO₂ del absorbente de amina primario. A medida que el condensado y luego el vapor pasan y calientan la estructura absorbente, el CO₂ que se captó anteriormente con la estructura absorbente se liberará de la estructura absorbente produciendo más agua condensada al proporcionar el calor de reacción necesario para liberar el CO₂ de la estructura absorbente y retirarse de la estructura absorbente mediante el vapor o extraerse mediante un ventilador/bomba de escape. Esta técnica se denomina «eliminación de vapor» y también se describe más adelante de manera adicional. El vapor pasa a través de la estructura absorbente para provocar la liberación del CO₂ del absorbente; por razones de costo de eficiencia energética se buscaría minimizar la cantidad de vapor utilizado y que se mezcla con el efluente de CO₂. Por lo tanto, lo que se condense (o pueda condensarse) luego de salir de la cámara de regeneración, el condensado puede agregarse a lo generado en la cámara de regeneración, y reciclarse para calentarse y convertirse nuevamente en vapor para uso adicional.

35 El proceso de eliminación culminará usualmente al inicio del avance del vapor, cuando la cantidad de vapor no condensado que sale del extremo posterior de la estructura absorbente se vuelve grande en comparación con el CO₂ recientemente liberado. Las condiciones exactas para culminar la inyección de nuevo vapor se determinarán al equilibrar la fracción aumentada de CO₂ eliminado con el aumento del costo de energía a medida que el proceso de vapor se vuelve menos eficaz en términos de la relación de CO₂ liberado por energía de vapor utilizado. Esa energía debe reemplazarse cuando el vapor y condensado vuelven a calentarse para el siguiente ciclo de eliminación. La especificación exacta variará con la eficacia de recuperación de calor y el costo del calor de proceso usado en una aplicación particular.

40 El System In que diseña la estructura de un sistema que se debe comercializar, los siguientes parámetros de diseño deberían tenerse en cuenta. Si N_s es la cantidad de sitios de unión a CO₂ por metro cuadrado de superficie de poro, Av es el número de Avogadro, y si la densidad del material de la estructura de esqueleto es P_{cm}, el esqueleto poroso tendrá una densidad P_c proporcionada por P_c = (1-POR_c) P_{cm}; la carga L en moles por kilogramo de estructura absorbente es proporcionada por

$$L = N_s \text{Savc} / \text{Av P}_c = 4 N_s \text{POR}_c / \text{Av d P}_{cm}(1-\text{POR}_c)$$

55 Si se resuelve la expresión anterior para POR_c, se descubre

$$L = (4 N_s / \text{Av P}_{cm}) (1 / (2w + w^2/d))$$

Dado que es deseable maximizar la carga de CO₂ absorbido por la estructura, los absorbentes de poliamina

proporcionan la N_s alta deseada. En cualquier caso, el análisis anterior aclara que se prefiere tener paredes lo más delgadas posible, entre los poros/canales en el soporte poroso. La carga en moles/kg es de primer orden, independientemente del tamaño de los poros, con la disminución en S_{avc} , a medida que aumenta la porosidad al hacer el tamaño de poro más grande, cancelado al primer orden debido a la disminución en la densidad del soporte poroso, P_{cm} .

Se pueden insertar los valores para A_v y para P_{cm} de 2 500 Kg/m³ (nota: promediando la diferencia en los valores para cuarzo y sílice fusionada) y convertir la N_s en N_{sn} que es la cantidad de sitios de unión por nanómetro cuadrado, donde w y d están en nanómetros, para encontrar: $L = 1.33 (N_{sn}/w(1+w/2d))$ moles/kg, de la estructura de esqueleto. Para $N_{sn}=5$ sitios por nanómetro cuadrado y $w=2$ nanómetros y $d=5$ nanómetros, una porosidad de aproximadamente 0.5 genera un área de superficie por gramo de 400 mm² y $L=2.5$ moles/kg. de la estructura de esqueleto.

La capacidad de carga real de CO₂, como kg/m³ de entrada de aire, L_d/a , donde el espesor de la pared de soporte es W_c y la longitud (en la dirección de flujo de aire) del monolito es L_m proporcionada por $L_d/a = L(.044)(P_{cm}(1-POR_c)) S_{avm} W_c L_m$, que sustituye L ,

$$L_d/a = (N_s S_{avc}/A_v P_{cm}(1-POR_c)) (.044)(P_{cm}(1-POR_c)) S_{avm} W_c L_m;$$

$$L_d/a = N_s(.044)/A_v (S_{avc} S_{avm} W_c L_m),$$

Sustituye S_{avc} ,

$$L_d/a = N_s(.044)/A_v (S_{avm} W_c L_m) (4/d(1+w/d)^2).$$

En un ejemplo, usando el monolito CELCOR Corning de 230 celdas, la longitud de flujo de poro L_m es de 0.146 metros, el área de superficie por volumen del monolito S_{avm} es de aproximadamente 2000 m²/m³ y el espesor de la pared del poro del monolito W_m es de 0.265 mm., determinado a partir de $L_d/a = L (.044 \text{ kg/mol}) (P_c S_{avm} .146 W_m)$, para una cantidad de CO₂ en kg/m² área de entrada de aire. Un criterio de diseño general es realizar L y L_d/a lo más grande posible, limitado por la restricción de disminución de presión, es decir, limitado por la fuerza del viento y/o despliegue del ventilador, que se cumple en un ejemplo que usa resultados de modelado para el S_{avm} del monolito de Corning de 230 celdas, y la longitud de poro, en la dirección del flujo de aire, de 0.146 m y velocidad de flujo de aire de entrada de 2.5 m/seg.

Las paredes del monolito deberían tener el POR_c deseado, y la cantidad de sitios de unión para proporcionar un N_{sn} alto. W_m se determina en función de la optimización (minimización) de la disminución de presión/ S_{avm} , que a su vez estará restringida por un límite de qué tan pequeño puede ser el W_m para tener una carga aceptable, en función de otras restricciones (ver más adelante). Cabe destacar que L aumenta a medida que disminuye w , y aumenta d , pero disminuye L_d/a , con aumento del tamaño de poro para un w fijo, debido a que la porosidad aumenta a medida que disminuye P_c . En términos generales, el diseño óptimo tiene el menor w posible, y una porosidad que equilibra el impacto del tamaño de poro en los parámetros de rendimiento descritos más adelante. Se debe recordar que el compuesto de amina puede impregnarse como un líquido en los poros del monolito, así como también, o en lugar de, respaldarse en las paredes de la estructura de poros.

La captura de aire según la presente invención es una condición relativamente leve. Esta característica de la presente invención permite el uso de una estructura mucho menos fuerte para el monolito. En particular, esto permite el uso de paredes relativamente delgadas fabricadas de un material con alta porosidad sobre el cual se deposita un absorbente; un material tal es óxido de aluminio. Esto ahorrará costos, usando materiales que generalmente son menos fuertes y, por lo tanto, menos costosos de fabricar.

Parámetros de rendimiento

Relación de SH/RH. Como se indicó anteriormente, para la presente invención, la relación de calor razonable de la estructura de soporte absorbente (SH) a calor de reacción del absorbente (HR) que se pierde, durante la regeneración, es un factor de rendimiento fundamental (una razón principal para la necesidad de carga elevada en este caso). Depende de la carga L , a saber, $SH/HR = C_{sh} \Delta T / L \cdot HR \cdot WC$, donde C_{sh} es el calor específico del sustrato en joules por kg por grado Kelvin, HR es el calor de reacción de absorción, por mol de CO₂, en joules por mol de CO₂, y WC es la capacidad funcional del lecho en el proceso utilizado (p. ej., la fracción de la carga que se capta en cada ciclo).

Suponiendo (de manera conservadora) un C_{sh} de aproximadamente 1kj/kg grados K para el sustrato sólido, un ΔT de 80 °C, y $HR = 84$ kj/mol (aproximadamente 35 KT), para una amina primaria, y $WC=1/2$, $SH/HR = 1.9/L$. El proceso requiere la HR elevada de la amina primaria para lograr buena carga de los sitios N_s , a temperatura ambiente de 25 °C, y para la presión parcial baja de CO₂ en aire. Al usar solamente aminas primarias, la fracción de sitios que se unen a CO₂ aumentaría a temperatura ambiente y concentraciones ambiente de CO₂, y es muy comparable a los resultados para las concentraciones elevadas de CO₂ en gas efluente a temperatura elevada (45-65C). Este descubrimiento sorprendente hace posible utilizar aminas primarias para captura con aire eficaz de CO₂. La técnica anterior consideraba que la captura de aire satisfactoria requiere el uso de hidróxido de sodio de unión mucho más fuerte/mayor

calor de reacción (2-4 veces más que las aminas primarias), como el absorbente. Este enfoque fue mucho menos económico, dado que se requieren temperaturas muy superiores para regenerar el hidróxido de sodio, lo que genera la necesidad de mayores cantidades de energía costosa.

5 El criterio de diseño general para la presente invención es que SH/HR sean lo más bajos posible y que la recuperación de SH sea lo más alta posible. En cualquier caso, SH/HR deberían ser inferiores o iguales a uno, y más preferiblemente entre $\frac{1}{2}$ y 1. Cabe destacar que este requisito solamente depende de la carga específica, en moles/kg de la estructura, y por lo tanto nuevamente al primer orden, depende solamente del aumento de N_{sn}/w , para el caso de unión a la superficie. Sin embargo, existe una dependencia de segundo orden que disminuye la relación de SH/HR a medida que disminuye el tamaño del poro.

10 TA - El tiempo de absorción - El tiempo para completar la absorción, TA, se diseñó para el monolito CELCOR de Corning de 230 celdas por 16.3871 centímetros cúbicos (230 celdas/cpulgadas cúbicas) de 15.24 centímetros (seis pulgadas) de espesor (en la dirección del flujo de aire). Usando estos resultados, se puede determinar el TA a partir de la siguiente relación, donde el lado izquierdo es la cantidad de CO₂ que ingresa en el dispositivo y se capta, y el lado derecho es la fracción de CO₂ de entrada que se capta con la amina y recoge durante la eliminación de vapor:

15
$$P_{CO_2} V_{in} FC TA = L/d FS WC,$$

donde

P CO₂ es la densidad de CO₂ en el aire = 7.6×10^{-4} kg/m³,

Vin es la velocidad del aire de entrada, FC = fracción captada,

FS= fracción de saturación de lecho que se logra, y

20 WC=fracción de CO₂ captado que se recoge.

Por lo tanto, $TA = L/d FS WC/P_{CO_2} V_{in} FC = N_s(.044)/A_v(Savm Wc Lm)(4/d(1+w/d)^2)FS.WC/P_{CO_2} V_{in} FC$

En sitios de muy baja temperatura, puede ser posible utilizar aminas secundarias también, y de hecho se puede ajustar el sistema al variar la relación de aminas primarias y secundarias, para limitar la salida de calor. En general, el aumento de WC o L, aumenta la eficiencia energética del proceso, y reduce los costos de proporcionar calentamiento externo.

25 Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, SH/HR varía como $1/w(1+w/2d)$, y el tiempo de absorción TA varía como $1/d(1+w/d)^2$, de manera que ambos mejoren a medida que w disminuye; pero a medida que d disminuye, SH/HR disminuye, pero mejora el TA, es decir, se reduce. Para calcular el TA, utilizar los mismos valores que se utilizaron para calcular L, es decir, 2 nm para w y 5 nm para d, que proporciona una porosidad de 0.5 para la estructura del esqueleto. En el caso de la impregnación física, son deseables porosidades superiores, limitadas solamente por la necesidad de estabilidad estructural del monolito.

30 PUR - La pureza del CO₂ recogido - Como factor de rendimiento final, la pureza del CO₂ que se recoge es significativa en aquellas situaciones en las que el CO₂ eliminado pretende comprimirse para el envío por tubería, para utilizarse para recuperación mejorada de petróleo o para aislamiento. La preocupación principal es acerca del aire atrapado y no el vapor de agua, que se retira fácilmente en las etapas iniciales de la compresión si el CO₂ debe transportarse por tubería. Para otros usos en los que el dióxido de carbono no se comprime significativamente, tal como un suministro para algas o aporte para otros procesos, la presencia de aire a menudo no es un problema. La pureza del CO₂ se ve afectada principalmente por la cantidad de aire atrapado en el sistema de captura cuando se somete a la eliminación de vapor. Por lo tanto, esto requiere permitir la remoción de dicho aire atrapado antes de comenzar la eliminación del CO₂, p. ej., introducir el vapor de eliminación. La remoción de cualquier aire atrapado también es deseable dado que el oxígeno en el aire puede provocar la desactivación del absorbente cuando el sistema se calienta hasta la temperatura de eliminación, especialmente en presencia de vapor.

35 El oxígeno puede retirarse fácilmente bombeando el aire para que salga de la estructura de soporte, para formar al menos un vacío parcial, antes de calentarse a la temperatura de eliminación. Como ventaja inesperada, al usar grupos amina primarios como el absorbente, la reducción de la presión en la estructura no generará inmediatamente la pérdida correlativa del CO₂ absorbido, cuando el absorbente se encuentra a las temperaturas relativamente más ambiente, cuando se reduce la presión parcial mediante bombeo. El CO₂ no se libera espontáneamente de la amina a dichas temperaturas bajas. Dicha liberación, como se ha demostrado experimentalmente, requiere una temperatura de eliminación de al menos 90 °C.

40 Este proceso se puede llevar a cabo cuando la fase de captura inicial genera una saturación considerable del CO₂ en el absorbente, o hasta que genera solamente, p. ej., aproximadamente 60-80 % de la saturación con el CO₂. Esto reducirá sustancialmente el tiempo del ciclo de captura hasta un grado proporcionalmente tanto como 40 %, para que el ciclo corriente del proceso genere una mayor extracción de CO₂ por unidad de tiempo. En general, la absorción se enlentece a medida que el absorbente se acerca mucho a la saturación.

Los detalles de formas de realización preferidas de la presente invención se proporcionan en el contexto de los siguientes ejemplos específicos del método de captura y eliminación de CO₂, con referencia a los dibujos adjuntos.

Las Figuras 17a, b y 18a, b son ilustraciones esquemáticas de varias maneras en que se puede retirar el dióxido de carbono de una atmósfera, de acuerdo con los principios de la presente invención.

5 Cuando una estructura absorbente, tal como un sustrato que transporta un absorbente amina primario, se encuentra en la posición de captura de CO₂ (p. ej., la posición del sustrato 600, en la Figura 6, o 2003 en las Figuras 17a y 18a), el aire cargado de dióxido de carbono (de 2004) se dirige al sustrato (p. ej., mediante un único ventilador grande 604, que se muestra en las líneas punteadas, en la Figura 6, o mediante múltiples ventiladores más pequeños 3010, como se muestra en las Figuras 22-23), para que el aire fluya a través del sustrato y en contacto con el absorbente, el dióxido de carbono entra en contacto con el medio de absorción en las superficies del sustrato, y se retira sustancialmente del aire. Por lo tanto, el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a y a través del sustrato para que el dióxido de carbono en el aire entre en contacto con el medio, el dióxido de carbono se retira sustancialmente del aire mediante el medio, y el aire pobre en CO₂ o más pobre 2008 del cual se ha retirado sustancialmente el dióxido de carbono se aleja del sustrato, nuevamente hacia la atmósfera.

15 En las formas de realización de las figuras anteriores, los sustratos se mueven entre la zona de captura de CO₂ y la cámara de eliminación/regeneración de CO₂ 2006. Cuando un sustrato se mueve a la cámara de eliminación de CO₂ 2006, es decir, la posición inferior como se muestra en las Figuras 6, 17b y 18b, el sustrato se encuentra sustancialmente a temperatura ambiente, el calor de reacción de la actividad de absorción se ha retirado mediante el efecto convectivo de la masa o aire soplado a partir del cual se retiró el CO₂, que es mucho mayor que la cantidad de CO₂.

Cualquier aire atrapado en el sustrato 2002 y la cámara 2006 puede bombearse, p. ej., mediante una bomba de evacuación de aire 2023, o incluso mediante un ventilador de escape, para formar un vacío parcial en la cámara 2006. A continuación, el calor de proceso, p. ej., en forma de vapor saturado del cogenerador de vapor 2019, se dirige a y a través del sustrato cargado de CO₂ 602, 2002 en la cámara de eliminación 2006.

25 El dióxido de carbono se retira del absorbente (elimina) mediante el flujo de un vapor supercalentado relativamente caliente; el vapor entrante se encuentra a una temperatura no superior a 130 °C, y preferiblemente no superior a 120 °C, y más preferiblemente no superior a 110 °C. El vapor, que comprende principalmente dióxido de carbono y algo de vapor saturado, fluye y sale de la cámara de eliminación 2006, a través del conducto de escape 2088 hacia un separador 3009, donde se condensa cualquier vapor presente. El agua condensada líquida se separa del CO₂ eliminado gaseoso. Una parte del vapor que se condensa en la propia estructura absorbente durante el proceso de eliminación se recogerá en un drenaje en el fondo de la cámara de regeneración (p. ej., al inclinar la estructura levemente desnivelada) o se evaporará luego del bombeo, y la reducción de la presión en la cámara de regeneración luego de completar el proceso de eliminación de vapor. Dicha evaporación del vapor condensado enfriará la estructura absorbente antes de colocarse nuevamente en contacto con el aire para captar más CO₂ (esto también mitigará la tendencia del oxígeno a desactivar el absorbente mediante su oxidación). Una parte del agua que permanece en la estructura porosa también se puede retirar por el efecto de hacer pasar el aire a través del dispositivo en la etapa de absorción (esto dependerá de la humedad ambiente). Sin embargo, se ha demostrado experimentalmente que la eficacia de captura aumenta en presencia de humedad. Esto es conocido en la técnica y se genera debido a que el absorbente seco debe utilizar dos sitios amina para unir el CO₂ al absorbente cuando está seco, 50 % de eficacia de amina, hasta solamente un sitio de unión de amina por CO₂ captado en presencia de humedad elevada, 100 % de posible eficacia de amina. La posible eficacia de amina aun puede estar limitada por el bloqueo de los poros y la decisión práctica de cuánto del lecho debe saturarse con CO₂ antes de culminar el proceso de absorción y mover la estructura absorbente a la etapa de regeneración.

45 El CO₂ eliminado del absorbente regenerado a su vez se bombea hacia un depósito de almacenamiento 2012 donde se mantiene a presión ligeramente elevada para uso inmediato, p. ej., para proporcionar una atmósfera rica en CO₂ para potenciar el crecimiento de algas. o el gas de dióxido de carbono puede comprimirse a presiones superiores, mediante el compresor 2014, para almacenamiento a largo plazo 2014 o para transportarse por tubería hasta un uso final alejado, p. ej., aislamiento o tratamiento de pozos petrolíferos o pozos de gas natural para mejorar la producción. Durante cualquier fase de compresión inicial, el CO₂ se purifica adicionalmente mediante la condensación de cualquier vapor restante, dicho condensado de agua a su vez se retira, mediante los medios conocidos.

Los sustratos 602, 2002, se mueven alternativamente entre, p. ej., las posiciones superior e inferior 2003, 2006, mediante un sistema elevador de, p. ej., poleas o elevadores hidráulicos 2021, controlados por el subsistema 2030. Se reconoce que cuanto más rápido es el tiempo del ciclo menor será el costo total para obtener una producción anual de CO₂ captado. Se ha descubierto que el tiempo requerido para la etapa de eliminación, que incluye el movimiento del lecho, la extracción por bombeo inicial del aire, el tiempo de eliminación de vapor, y el período de enfriamiento, y el tiempo para regresar a la etapa de absorción, puede ser varias veces menor que el tiempo de la etapa de captura de CO₂ que permite una forma de realización de un lecho con un porcentaje elevado del tiempo (90 %) con el lecho en el modo de absorción. De manera alternativa, se pueden obtener tiempos muy cortos limitados por el tiempo de movimiento más el tiempo de eliminación de vapor y luego utilizar la forma de realización en la cual dos o más

estructuras absorbentes se eliminan en una cámara de eliminación, de manera sucesiva.

Al ubicar comercialmente estas instalaciones de extracción de CO₂, se prevé que una opción incluye ampliarlas a una capacidad de eliminación en el orden de un millón (1 000 000) de toneladas métricas de CO₂ por año de la atmósfera. Dicha instalación utilizará al menos aproximadamente 500 de dichos módulos de sustrato que se mueven recíprocamente, donde cada módulo tendrá superficies rectangulares principales que se extienden perpendiculares al flujo de aire con un área de tanto como aproximadamente 50 metros cuadrados, y un espesor, en la dirección del flujo, de más preferiblemente no más de aproximadamente 15.24 centímetros (seis (6) pulgadas), pero usualmente menos, p. ej., tan bajo como 1.5 mm (0.06 pulgadas). Cada módulo de monolito se forma preferiblemente de elementos de monolito con forma de ladrillo, cada espesor deseado del módulo, pero con una superficie de aproximadamente 15.24 centímetros por 15.24 centímetros (6 pulgadas por 6 pulgadas), para que cada módulo pueda formarse de aproximadamente 2000 de dichos ladrillos, apilados juntos.

Estos conjuntos de módulos se disponen preferiblemente en el patrón en forma de V que se muestra en las Figuras 21a,b, donde el punto del patrón en forma de V preferiblemente se enfrenta hacia el viento predominante y los módulos se disponen a lo largo de los brazos del patrón en forma de V, para que se expongan al viento predominante, y/o a sus ventiladores, u otros medios para proporcionar un flujo de aire descrito en la presente. La separación entre las filas en forma de V es determinada por la velocidad a la cual el aire bajo en CO₂ expulsado de la primera fila se mezcla eficazmente con el aire ambiente para que el aire que ingresa a la segunda fila sea cercano a la concentración del aire ambiente. En general, los cálculos sugieren que esto estará en el orden de los 100 metros. Sin embargo, determinadas condiciones podrían reducir la distancia, p. ej., elevando la cámara de absorción del suelo, o la presencia de vientos predominantes o terreno inusualmente beneficioso aumentará la mezcla y, por lo tanto, acortará la distancia de separación necesaria.

En el enfoque mezclado, como se muestra en la Figura 17A, en el cual se mezclan pequeños porcentajes en volumen de gas efluente en el aire 2004, una forma de realización podría ser que la primera fila sea aire ambiente solamente y luego tomar el aire agotado y mezclar el gas efluente con el aire agotado para ingresarlo en la segunda fila. Para los casos en los que se cuenta solamente con una cantidad limitada de gas efluente para mezclarlo con el aire y, cuando se desee, retirar considerablemente más CO₂ total que lo que se emite en el gas efluente, se pueden ajustar las cantidades relativas de mezcla de aire y combustión, ajustando el porcentaje de combustión mezclado con el aire y/o dividiendo las unidades y mezclas variables de corrientes de combustión y aire en distintas unidades, incluidas aquellas de captura de aire puro. Por lo tanto, usando el mezclador de aire/combustión 2004, se puede ajustar generalmente una fracción de la cantidad total de CO₂ recogido que supera lo emitido en el conducto hasta cualquier nivel deseado.

El medio absorbente tiene preferiblemente grupos amina principalmente primarios como los sitios de captura activos para CO₂ pero puede incluir algunos grupos amina secundarios. Ejemplos de dichos compuestos de absorción adecuados que pueden respaldarse en las estructuras incluyen polietiliminas, aminopolímeros hiperramificados y propiletilendiamina, todos descritos anteriormente en las clases 1, 2 y 3.

Como medio para mejorar adicionalmente la eficacia del método de la presente invención, puede ser útil agregar una pequeña proporción de gas efluente, a partir de una fuente de energía basada en hidrocarburos utilizada para el proceso primario adyacente a la planta de captura de CO₂, como se muestra en las Figuras 17a y 19. Como se muestra de manera esquemática en las figuras de la presente, el gas efluente 2041b del proceso primario 2041a pasa inicialmente a través de una etapa de pretratamiento 2032 y se trata para retirar cualquier impureza sólida o líquida y cualquier material gaseoso que pueda interferir con la eficacia de los absorbentes, tales como compuestos de azufre-oxígeno. Preferiblemente, no más de 5 % en volumen del gas efluente tratado luego se mezcla en un mezclador de gas 2004 que se mezclará con el aire ambiente entrante, antes de que pase a la estructura absorbente 2003 para captura de CO₂. La cantidad de gas efluente que se agrega es más preferiblemente de no más de 3 % en volumen y más preferiblemente no más de 2 % en volumen. La pequeña cantidad del gas efluente tratado que se agrega no debería tener un efecto significativo en la temperatura del flujo de aire entrante a la estructura absorbente 2003, pero debería generar un aumento relativamente considerable en la concentración de CO₂ en el aire entrante, lo que hace que la captura de CO₂ sea más eficaz. Usando cálculos teóricos, se puede demostrar que el aumento de la concentración de CO₂ eficaz de la mezcla mediante la adición de gas efluente en la proporción de 3 % aumenta la concentración de CO₂ en el aire en un factor de cinco a diez veces; sin embargo, la concentración de CO₂ permanece más de 30 veces menor que el gas efluente. Sin embargo, por encima de la concentración de la pequeña adición de gas efluente, el aumento de la temperatura a partir del calor de reacción de absorción se vuelve significativo, reduciendo la eficacia de captura de CO₂ del aire ambiente, de manera que sea necesario utilizar diseños para gas efluente. Por lo tanto, limitar la cantidad de gas efluente agregada es una forma de evitar el costo asociado con el suministro del enfriamiento necesario para evitar el sobrecalentamiento.

Cabe destacar que la ubicación preferida para dicha instalación de extracción de CO₂, además de ser adyacente a una fuente de calor de proceso adecuado 2041, 2041a, debería ser en un área con patrones de flujo de viento regulares. De esta manera, si hay vientos fuertes disponibles, se pueden usar flujos de viento naturales para impulsar el aire a través del sustrato, sin necesidad de energía adicional para impulsar los ventiladores. Como resultado de vientos de origen natural, la energía de los ventiladores se puede reemplazar al menos parcialmente, con vientos

predominantes, o con una fuente solar (que, p. ej., puede proporcionar corrientes de aire térmicas), que mejorarán de manera adicional la eficiencia energética y la reducción de costos de extracción de dióxido de carbono del aire atmosférico.

5 Además, como alternativa no reivindicada a mover los sustratos que transportan absorbente entre ubicaciones de cámara de captura y regeneración (eliminación), al proporcionar disposiciones de válvula y tubería adecuadas, con sensores y elementos de control adecuados 2003c, los módulos de la estructura absorbente pueden permanecer sustancialmente en una ubicación y se pueden controlar los flujos hacia y a través del absorbente, como se muestra esquemáticamente en la Figura 19 en la presente. En la Figura 19, el medio para generar los flujos de aire, el flujo de calor de proceso y el flujo de dióxido de carbono en sentido contrario al sustrato puede cambiarse usando válvulas, a medida que se capta dióxido de carbono del aire y luego se extrae del medio, como será evidente para los expertos en la técnica.

10 Los sustratos 2002 y 3001 (en las Figuras 17-18 y 22-24, en la presente) son porosos, para que el aire dirigido a un sustrato pueda fluir a través del sustrato. Cuando un sustrato se encuentra en una posición de extracción de aire (p. ej., la posición del sustrato 2002, en la Figura 17A), el aire cargado de dióxido de carbono se dirige al sustrato (p. ej., mediante un ventilador 704 que se muestra en líneas punteadas), para que a medida que el aire fluya a través del sustrato, el dióxido de carbono entre en contacto con el medio y se retire sustancialmente del aire. Por lo tanto, el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a y a través del sustrato para que el dióxido de carbono entre en contacto con el medio, el dióxido de carbono se retira sustancialmente del aire mediante el medio, y el aire del cual se ha retirado sustancialmente el dióxido de carbono se aleja del sustrato. Cuando se mueve un sustrato a la posición de extracción de carbono (p. ej., la posición del sustrato marcada 2006), el calor de proceso, en forma de vapor saturado, se dirige al sustrato (p. ej., 2005, en la Figura 17B), y se retira el dióxido de carbono, junto con cualquier vapor restante (en la dirección que se muestra con la flecha 708, en la Figura 7) mediante una fuente de succión ubicada en el conducto 710 (Figura 7) y en, o adyacente a, el separador 3009 (en la Figura 17A), mediante el cual el dióxido de carbono que se ha retirado del medio se extrae del sustrato.

20 En lugar de mover los sustratos entre dos ubicaciones físicas, los conductos para generar los flujos de aire, el flujo de calor de proceso y el flujo de dióxido de carbono hacia y en sentido contrario al sustrato puede cambiarse a medida que se capta dióxido de carbono del aire y luego se extrae del medio, como será evidente para los expertos en la técnica.

25 También cabe destacar que, en todas las versiones de la invención descritas anteriormente, la remoción de dióxido de carbono del aire se puede realizar de manera que la etapa de extracción de CO₂ no sature completamente los grupos amina, es decir, el medio de absorción no alcanza condiciones de equilibrio. Esto genera un tiempo de ciclo más corto, y debido a la velocidad de absorción más lenta que tiene lugar a medida que la amina se acerca a su punto de saturación en equilibrio, en un periodo extendido de funcionamiento del proceso, el uso de tiempos de ciclo más cortos puede generar una mayor eficacia de extracción de CO₂ de la atmósfera.

30 **Concepto de elevador vertical de las Figuras 10a -10f, y 10h y 22f, 23a,b y 24a-c.** Estas figuras muestran ilustraciones esquemáticas de las estructuras del elevador y la cámara, los diseños que mejoran adicionalmente el sistema con el cual se puede captar el dióxido de carbono de aire cargado de CO₂ y luego eliminar usando vapor de calor de proceso, de acuerdo con los principios de la presente invención. Además, al hacer funcionar el elevador verticalmente, cuando la etapa de regeneración es la parte inferior, el peso del conjunto, que se sostiene desde la superficie superior, hace que la caja sea autosellante.

35 De manera específica, en estos dibujos, se ilustra una estructura de captura de dióxido de carbono rectangular 1000,3000, que tiene una estructura absorbente 3001, como se describe en la presente memoria, que se puede mover entre una posición en la que entra en contacto con el aire cargado de CO₂ para captar el dióxido de carbono del aire. La estructura absorbente rectangular 3001 tiene un área relativamente grande perpendicular al flujo de aire en comparación con su espesor, y se orienta verticalmente con relación a un flujo sustancialmente horizontal de aire cargado de CO₂. La estructura de captura absorbente de dióxido de carbono 3001 comprende un miembro superior no poroso sólido 1002, 3002, que es preferiblemente una placa metálica sólida; la estructura absorbente 3001 se sostiene entre los miembros superior e inferior 3002, 3003. El miembro inferior también es una placa sólida 3003, que es preferiblemente una placa metálica sólida, que ayuda a extraer el aire de la cámara de eliminación/regeneración.

40 Cuando se ubica en una corriente de aire cargado de CO₂, la estructura absorbente 3001 se expone a la corriente de aire cargado de CO₂ que pasa a través de su superficie de área grande, es dirigido con un conjunto de ventiladores de escape 3010, o mediante un viento predominante; el absorbente capta el dióxido de carbono del aire que fluye a través de la estructura absorbente. La estructura absorbente muy porosa 3001, 1004 proporciona una gran área de superficie y baja disminución de presión.

45 Cuando el absorbente ha captado la cantidad deseada de dióxido de carbono del aire, el flujo de aire, si se desea, puede bloquearse. Si bien el aire fluye a través del absorbente, el aire efluente de la estructura absorbente 3001, se agota sustancialmente de dióxido de carbono (preferiblemente aproximadamente 95 % agotado de dióxido de carbono). Se entiende que, en determinadas situaciones, las posiciones verticales relativas de las cámaras de captura y eliminación pueden invertirse, si bien generalmente se prefiere tener la unidad de captura en la parte superior, dado

que se obtiene una mezcla mayor al alejarse más del suelo.

En la posición de regeneración, la estructura absorbente 3001 luego se calienta mediante un flujo de calor de proceso (preferiblemente a partir de un proceso de cogeneración, como se describe adicionalmente en la presente). Como se describió anteriormente, el calor de proceso se convierte preferiblemente mediante un intercambiador térmico en vapor saturado, que se admite en la cámara sellada inferior después de extraer el aire, para eliminar el CO₂ del absorbente, como se describió anteriormente, mediante el efecto combinado del calor y el vapor. A medida que se calienta la caja de regeneración 1014 (preferiblemente mediante el «proceso de eliminación de vapor» descrito en la presente), el dióxido de carbono se separa de la estructura absorbente, y se extrae junto con cualquier vapor no condensado, en una cámara de separación, donde se retira toda agua líquida restante, lo que permite condensar más vapor, a medida que se enfría. El dióxido de carbono purificado luego se puede utilizar o presurizar y aislar, según se desee. Después de que el dióxido de carbono se elimina de la estructura absorbente 3001, y se retira de la cámara sellada, la estructura absorbente así regenerada se mueve nuevamente en sentido ascendente hacia la posición de captura de CO₂, como se muestra mediante la serie de dibujos de las Figuras 23a-c, y esquemáticamente en las Figuras 17A-B y 18A-B.

La Figura 10b-1, 2 ilustra esquemáticamente una alternativa a la estructura y técnica de la Figura 10a. El par de estructuras de captura de dióxido de carbono 1000 puede moverse alternativamente entre las posiciones superior e inferior, para que la estructura de captura de dióxido de carbono en la posición superior retire dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono y el dióxido de carbono se retire de la estructura absorbente que se encuentra en la posición de regeneración o eliminación inferior. Las dos estructuras absorbentes también pueden actuar como contrapesos entre sí a medida que se mueven hacia arriba y hacia abajo.

Eliminación de vapor

a. Se contemplan dos técnicas para el proceso de eliminación de vapor. La técnica preferida se denomina «eliminación de vapor solo con vapor».

b. Cabe destacar que una etapa adicional de enfriamiento evaporativo del lecho absorbente antes de elevarlo nuevamente a la posición de absorción reducirá el riesgo de degradación cuando el oxígeno en el aire entra en contacto con el absorbente a una temperatura elevada. Esto se logra usando una bomba de escape suficientemente fuerte de la cámara de eliminación de manera que se vaporice al menos una parte del vapor condensado, a la menor presión resultante, retirando así su calor latente con el enfriamiento resultante del monolito absorbente.

La eliminación de vapor, como se describió anteriormente, se realizaría de la manera precedente con relación a las Figuras 17-23, adjuntas a la presente.

Características del absorbente

En general, el absorbente que forma la estructura absorbente está caracterizado por su capacidad para absorber (captar) CO₂ a temperatura (ambiente) y concentración bajas y regenerar a mayor temperatura (de vapor de calor de proceso) y concentración elevada (dado que el CO₂ que es captado por la estructura absorbente tendrá una concentración elevada de CO₂ a medida que tiene lugar la eliminación). La concentración de CO₂ en aire cargado de CO₂ se encuentra en el orden de 300 veces menos que la concentración de CO₂ en gases efluentes (un aporte principal a la presencia de CO₂ en la atmósfera). El CO₂ puede captarse de una corriente de aire cargado de CO₂ a temperatura ambiente (p. ej., aproximadamente 20 grados C en muchos climas); y la temperatura del vapor usada en el proceso de eliminación de vapor descrito anteriormente se encuentra a una temperatura de aproximadamente 100-120 grados C, en función de la isoterma de Langmuir o ecuación de absorción de Langmuir (que es conocida por los expertos en la técnica). La temperatura de la estructura absorbente durante la captura de aire no debería ser demasiado alta, pero preferiblemente debería permanecer a la temperatura ambiente inferior cuando se capta CO₂. De lo contrario, la carga de CO₂ capaz de lograrse con el absorbente se reducirá con el aumento de la temperatura, p. ej., como se describe en la ecuación de isoterma de Langmuir conocida. Por lo tanto, si bien el material absorbente es preferiblemente una amina, el material de amina específico u otro absorbente adecuado puede variar para distintos climas para optimizar el CO₂ neto que se recoge durante cada ciclo de captura y regeneración en el cual se utilizará el proceso de la presente invención.

Calor de proceso y cogeneración

Como se explicó anteriormente, según la presente invención, se usa calor de proceso para proporcionar el vapor que se usa en el proceso de «eliminación de vapor» descrito en la presente, para retirar CO₂ de la estructura absorbente y regenerar la estructura absorbente. También es preferible que el calor de proceso se proporcione mediante un proceso de cogeneración, donde un proceso primario (p. ej., una central petroquímica, una instalación pública, etc.) produce vapor que se proporciona directamente al sistema y se utiliza para retirar el CO₂ de la estructura absorbente y regenerar la estructura absorbente.

Las centrales industriales tales como centrales energéticas y centrales petroquímicas generan grandes cantidades de vapor. Cuanto mayor es la presión a la cual se genera el vapor, mayor será la eficacia térmica que se puede lograr y el uso de sistemas de cogeneración (donde las turbinas de gas generan electricidad y los gases calientes de la turbina

se usan para generar más vapor) también mejora la eficacia térmica total de un sistema y proceso de captura de CO₂, de acuerdo con los principios de la presente invención.

Existen muchos diseños diferentes de sistemas de vapor dentro de la industria petroquímica debido a la mezcla diferente de impulsores eléctricos y de turbina para bombas y compresores, la temperatura necesaria para rehornadores de columna y tareas de precalentamiento, etc. Estos afectan la cantidad de vapor generado y también la cantidad de niveles de presión a los cuales se suministra el vapor al proceso. A la vista de estas calificaciones, un diseño de sistema de vapor petroquímico «típico» incluye vapor que se genera a presión muy alta (VHP) mediante las grandes calderas e instalaciones de cogeneración. Este vapor de VHP pasa hacia y a través de turbinas que se usan para impulsar motores o compresores y generar un vapor de escape a menor presión. Los siguientes niveles de vapor son HP y MP que se proporcionan a partir de las turbinas de extracción o mediante descarga directa del vapor VHP principal. El nivel de vapor final es LP y es proporcionado por el vapor de salida de las turbinas y mediante descarga directa. Cada nivel de vapor proporciona vapor a distintos usuarios y cualquier exceso de vapor pasa al siguiente nivel de vapor. Por lo tanto, el vapor LP recibe todo el vapor que no se puede utilizar de manera útil en los niveles superiores de vapor. Es importante reconocer que, en una instalación petroquímica, el sistema de vapor debe ser flexible dado que distintas secciones del proceso pueden estar desconectadas o iniciando, pueden estar cerradas o a velocidades inferiores a las de diseño en distintos momentos. Esto es distinto de una central energética pública en la cual el vapor solamente debe proporcionar una función - generar electricidad.

El valor del vapor depende del nivel de presión. El costo base del vapor VHP es fijo según los costos de capital y operativos de generación. Por lo tanto, a medida que se reduce la presión del vapor después de que pasa a través de las turbinas y las activa, se vuelve menos eficaz para generar electricidad adicional, y se reduce el valor del vapor.

En el caso del uso propuesto del vapor supercalentado, a presión ambiente, para liberar el CO₂ de la estructura absorbente, se supone que existen las siguientes ventajas para una instalación petroquímica grande típica:

a. A un nivel de vapor propuesto para la presente invención (13.79 a 68.95 kPa) (2 - 10 psig) el costo del vapor necesario será muy bajo para una instalación típica, si bien esto variará entre instalaciones dependiendo de la cantidad de vapor LP disponible.

b. En comparación con un sistema amina convencional en un sistema de captura de gas efluente, que requiere vapor de eliminación a aproximadamente 413.685 kPa (60 psig), el costo del vapor utilizado en la presente invención es significativamente inferior. Además, es mucho más probable que no haya un suministro adecuado de 413.685 kPa (60 psig) disponible y que debería generarse vapor VHP adicional. Esto elevaría el costo del vapor 413.685 kPa (60 psig) dado que debería cobrarse al costo total del vapor VHP o que deberían instalarse turbinas adicionales para recuperar energía, pero esto implicaría costos de capital significativos.

En la mayoría de las centrales eléctricas, se extrae un suministro de vapor de la turbina de baja presión para calentar el agua suministrada al sistema. Este vapor que se extrae sería adecuado para su uso en el proceso propuesto de la presente invención para retirar CO₂ de la estructura absorbente, como se proporciona en la cogeneración de electricidad y calor industrial. En la cogeneración de electricidad y CO₂, como se describe en este ejemplo, es posible utilizar presión muy baja (21b por encima de la presión atmosférica y temperatura aproximadamente 105 °C) y puede devolver el condensado para calentar la caldera dado que el calor de proceso que se usa es solamente el calor latente del vapor, para que el condensado sustancialmente a 100 °C regrese a la caldera. Si bien la cogeneración de electricidad y calor industrial reduce la electricidad producida, eleva la eficacia térmica total del uso del calor generado a energía útil de 35-40 % a 85-95 %. Por lo tanto, es favorable cuando hay usos cercanos para el vapor de temperatura y presión bajas (usualmente 120 grados C, 2 lbs por encima de vapor atmosférico). En la cogeneración de electricidad y captura de CO₂, se puede situar la instalación lo suficientemente cerca para usar el vapor de temperatura y presión bajas; y al poder usar vapor de presión y temperatura incluso menores y hacer recircular el condensado caliente en el bucle de vapor de calor de proceso nuevamente para calentar la caldera, es posible minimizar el impacto en la generación de electricidad y, por lo tanto, el costo del vapor.

Comentario adicional con respecto a la mezcla de aire ambiente y gas efluente

En la presente invención, una relación de volumen relativamente grande (p. ej., 97-99 %) de aire cargado de CO₂ se mezcla con un volumen relativamente pequeño de gases efluentes (preferiblemente no más de aproximadamente 3 % de gas efluente, y más preferiblemente no más de 2 % de gas efluente). El gas efluente contiene una concentración relativamente alta de CO₂; por lo tanto, para producir una corriente de fluido en la cual el CO₂ en el gas efluente agrega suficiente CO₂ al aire para que el costo de remoción de CO₂ de los gases combinados sea más ventajoso, y también proporciona beneficios dado que el aire cargado de CO₂ enfría los gases efluentes. Se cree que la aplicación de los principios de la invención para producir dicha corriente de gas mixta hace que el proceso de la presente invención descrito anteriormente sea particularmente eficaz. El CO₂ en el volumen relativamente grande de aire cargado de CO₂ mixto aún es CO₂ de concentración relativamente baja, de acuerdo con un concepto básico del paradigma de la presente invención; la cantidad de volumen pequeño de gas efluente aumenta la concentración de CO₂ en la corriente de fluido, y hace que el proceso del solicitante sea más rentable con respecto a la manera en que retira CO₂ de una corriente de fluido ambiente. Al mismo tiempo, el volumen alto de aire ambiente enfría los gases efluentes para que

los gases combinados permitan que la temperatura absorbente permanezca en un intervalo de temperatura en el cual el proceso de la presente invención es más eficaz al usar la amina como el absorbente.

5 Ejemplos de métodos útiles para mezclar el gas efluente con el aire se muestran en las Figuras 25 y 26. En la Figura 25, se inyecta un chorro de gas efluente 3031 en un flujo de aire ambiente, para formar una mezcla antes de pasar el conjunto de ventiladores como se muestra en la Figura 22. En la Figura 26, se presenta un diseño particular donde se inyecta gas efluente a través de una tubería ubicada centralmente 3035 en una corriente de aire que pasa de un cabezal de anillos concéntricos, que define múltiples orificios, ubicado circunferencialmente alrededor de la entrada de gas efluente central. Nuevamente, la mezcla pasa a través de los ventiladores para mezcla adicional antes de ingresar en el absorbente. Por supuesto, en este caso, los ventiladores no actúan como ventiladores de escape que extraen el aire a través de la estructura absorbente.

En resumen

15 Por consiguiente, con la estructura y técnica de las Figuras 10a-10h, y las Figuras 17-23, el aire cargado de dióxido de carbono se dirige a través de la estructura de captura de dióxido de carbono orientada verticalmente 1000, 2002 que tiene un absorbente capaz de absorber, o unirse a, dióxido de carbono, para retirar dióxido de carbono del aire. Cuando se completa la captura de carbono, la estructura de captura de dióxido de carbono orientada verticalmente desciende hacia un recinto de regeneración 1014, 2006, donde el calor de proceso se dirige a la estructura de captura de dióxido de carbono, para separar el dióxido de carbono del absorbente, y regenerar el absorbente. La estructura de captura de dióxido de carbono 1000, 2002 se eleva selectivamente del recinto de regeneración hasta una posición que, después de que la estructura se enfría hasta casi ambiente, se encuentra en el flujo de aire cargado de dióxido de carbono, para que el absorbente regenerado pueda continuar utilizándose para absorber o captar dióxido de carbono, desde el flujo de aire cargado de dióxido de carbono. Además, la presente invención se puede llevar a cabo usando la estructura y técnica de las Figuras 11a, 11b, cuando un flujo de partículas porosas que transportan absorbente se suministra selectivamente a una cámara de remoción de dióxido de carbono 1104; el aire se dirige a través de las partículas en la cámara de captura de dióxido de carbono, para que el absorbente absorba o capte dióxido de carbono. Después de completar la captura de dióxido de carbono, las partículas se dirigen a una cámara de eliminación/regeneración de dióxido de carbono 1106, donde el calor de proceso se usa para separar dióxido de carbono del absorbente, y regenerar el absorbente transportado por las partículas. Las partículas con el absorbente regenerado luego se dirigen nuevamente a una fuente de suministro de partículas, para que las partículas con el absorbente regenerado puedan reutilizarse para absorber o captar dióxido de carbono del aire.

30 Se siguen los principios de la presente invención en un método para captar CO₂, en donde se agrega una pequeña cantidad (en volumen) de gas efluente al flujo de aire cargado de CO₂. La concentración de CO₂ en el aire aumenta significativamente, en comparación con la concentración de CO₂ en el flujo de aire cargado de CO₂ no mezclado, y el flujo de fluido pasa a través de una estructura absorbente que capta el CO₂ en el aire.

35 En virtud de la descripción precedente, se cree que serán evidentes para los expertos en la técnica diversas maneras alternativas de retirar dióxido de carbono de un fluido, de acuerdo con los principios de la presente solicitud, incluido el uso de muchas etapas y componentes convencionales que son o serán conocidos y útiles para llevar a cabo la presente invención sin que formen parte por sí mismos de la invención. El alcance de la presente invención concuerda con el alcance de la invención que se reivindica en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

- 1.** Método para retirar y concentrar dióxido de carbono de aire cargado de dióxido de carbono, comprendiendo el método
- mezclar aire ambiente con una pequeña proporción de un gas efluente que contiene dióxido de carbono (3031),
- 5 dirigir un flujo de aire cargado de dióxido de carbono a través de una estructura de captura de dióxido de carbono (1000; 2002) comprendiendo un absorbente capaz de adsorber, o unirse de manera extraíble, a dióxido de carbono para retirar dióxido de carbono del aire, el absorbente se mantiene en las superficies de una masa sólida porosa, de manera que el dióxido de carbono se adsorba, o se una, al absorbente en las superficies de la masa sólida,
- 10 dirigir calor de proceso a la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) para separar dióxido de carbono del absorbente como una forma más concentrada de CO₂, y para regenerar el absorbente;
- dirigir otro flujo de aire cargado de dióxido de carbono a través de la estructura de captura de dióxido de carbono regenerada (1000; 2002) para que el absorbente regenerado pueda adsorber o unirse a dióxido de carbono adicional, para retirar el dióxido de carbono adicional del flujo de aire cargado de dióxido de carbono adicional,
- 15 donde el flujo de aire cargado de dióxido de carbono se dirige a través de una cámara de remoción y el calor de proceso se dirige a la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) en una cámara de regeneración (1106; 2006); y
- el método comprende además mover alternativamente la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) entre la cámara de remoción y la cámara de regeneración (1106; 2006).
- 20 **2.** Método según la reivindicación 1, donde la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) se mueve verticalmente entre la cámara de remoción y la cámara de regeneración (1106; 2006), la cámara de regeneración (1106; 2006) se sella cuando la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) se encuentra en la cámara de regeneración (1106; 2006).
- 3.** Método según la reivindicación 1, donde el aire se mezcla con no más de un 25 % en volumen de un gas efluente (3031).
- 25 **4.** Método según la reivindicación 1, donde la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) en la cámara de regeneración (1106; 2006) se purga inicialmente de aire antes de dirigir el calor de proceso a la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002).
- 5.** Método según la reivindicación 4, donde después de la regeneración de la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002), la estructura de captura se enfría antes de regresar a la cámara de remoción.
- 30 **6.** Método según la reivindicación 1, donde el calor de proceso se dirige a la estructura de captura que contiene dióxido de carbono (1000; 2002) en forma de vapor saturado a una temperatura en el rango de hasta 130 °C.
- 7.** Método según la reivindicación 1, donde la estructura de captura (1000; 2002) se mueve a la cámara de regeneración (1106; 2006) antes de saturar por completo el absorbente con CO₂, y la estructura de captura (1000; 2002) se mueve desde la cámara de regeneración (1106; 2006) antes de eliminar todo el CO₂ del absorbente.
- 35 **8.** Método según la reivindicación 1, donde el CO₂ y el vapor, que salen de la cámara de remoción antes de pasar a través de la estructura de captura (1000; 2002), se enfrían y condensan para separar el agua del CO₂ para obtener CO₂ de pureza elevada.
- 9.** Método según la reivindicación 8 comprendiendo, además, las etapas de
- 40 proporcionar energía térmica a un proceso de producción primario mediante la combustión de un combustible que contiene carbono, generando calor útil y de proceso,
- dicho proceso primario emite uno o varios gases efluentes (3031) capaces de alejar el calor de proceso,
- dichos gases efluentes (3031) se encuentran a una temperatura y contienen una concentración de dióxido de carbono sustancialmente superior al aire ambiente,
- utilizar una parte de dicho calor de proceso de los gases efluentes (3031) para cogenerar vapor saturado,
- 45 retirar componentes no deseables de dichos gases efluentes (3031) para producir gases efluentes tratados (3031).
- mezclar una parte de los gases efluentes tratados (3031) con dicho aire ambiente para crear una mezcla con el aire que contiene una pequeña proporción de los gases efluentes tratados (3031), de manera que la concentración de dióxido de carbono en dicha mezcla sea inferior al cinco por ciento.

10. Método definido en la reivindicación 1, donde la masa sólida porosa comprende un sustrato monolítico muy poroso que sostiene en las superficies de sus poros el absorbente de dióxido de carbono para absorber o unirse a dióxido de carbono del fluido.

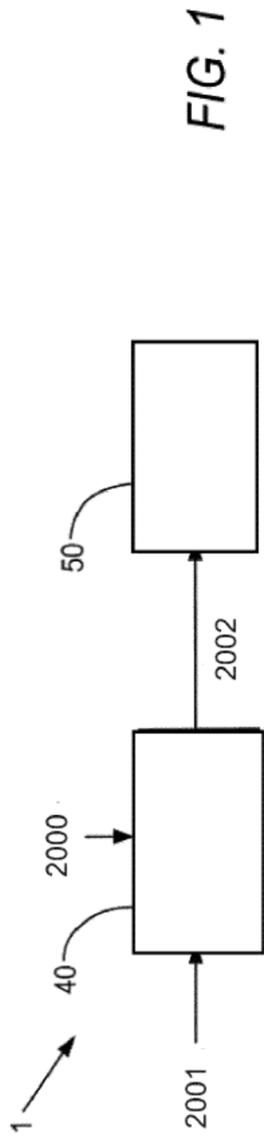


FIG. 1

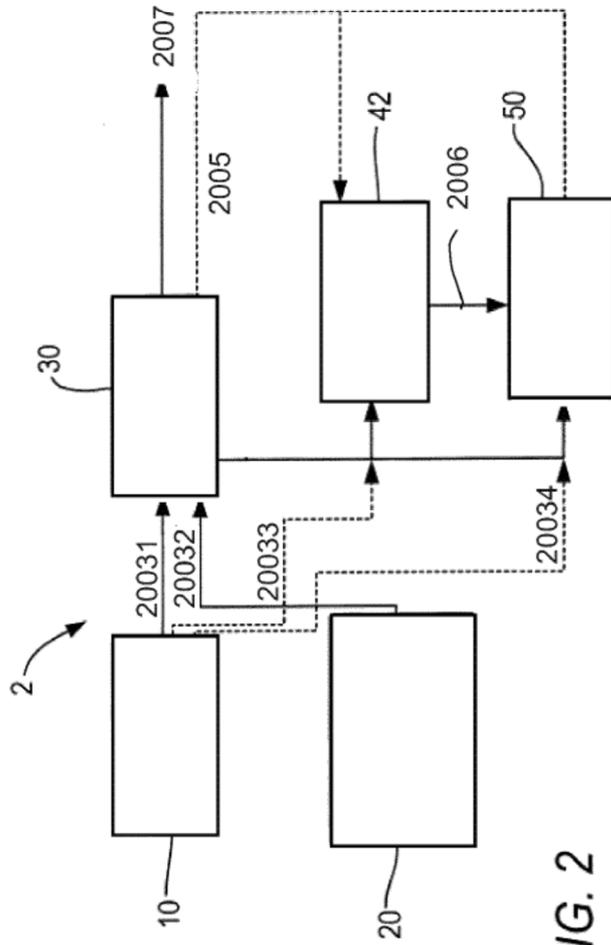
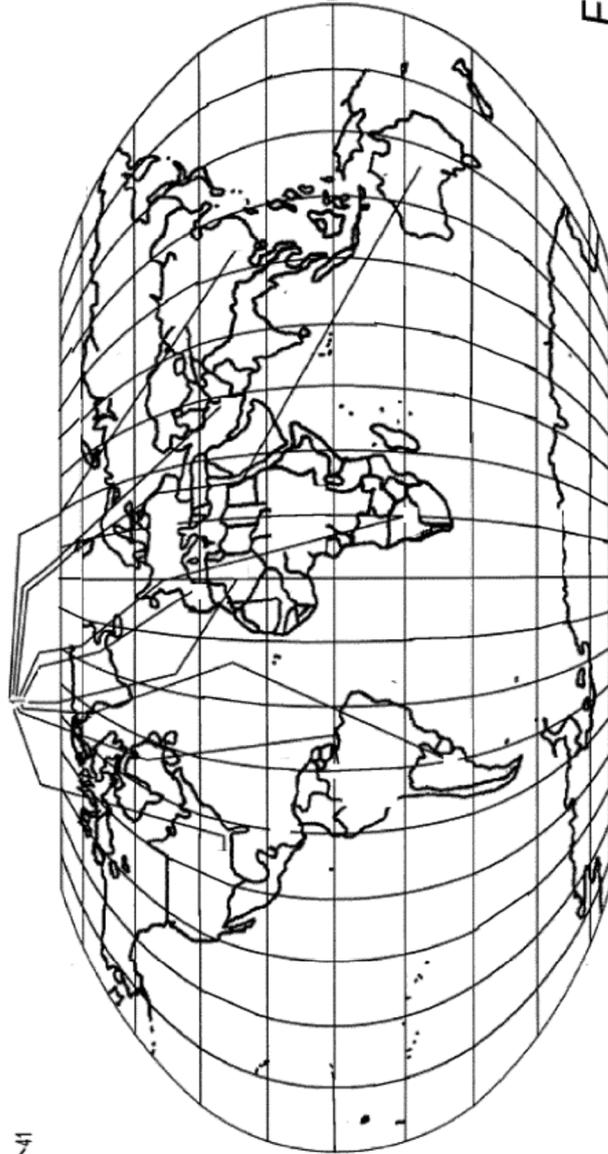
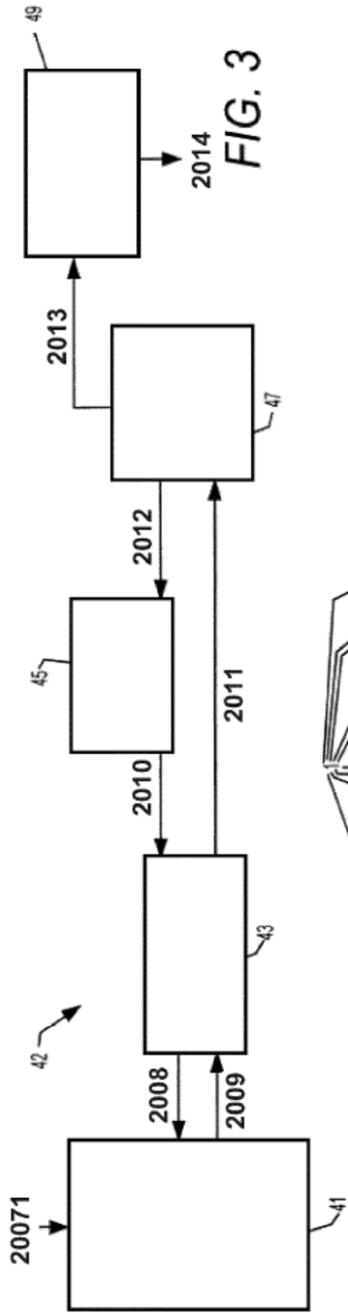


FIG. 2



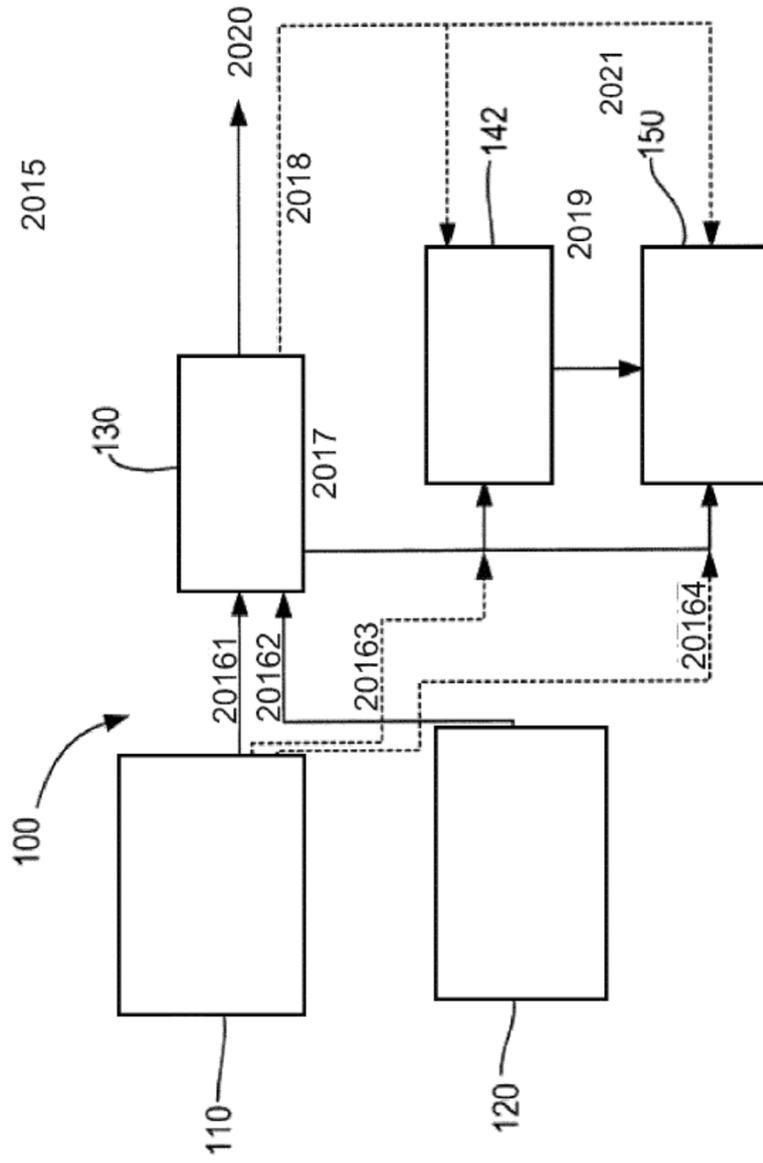


FIG. 5

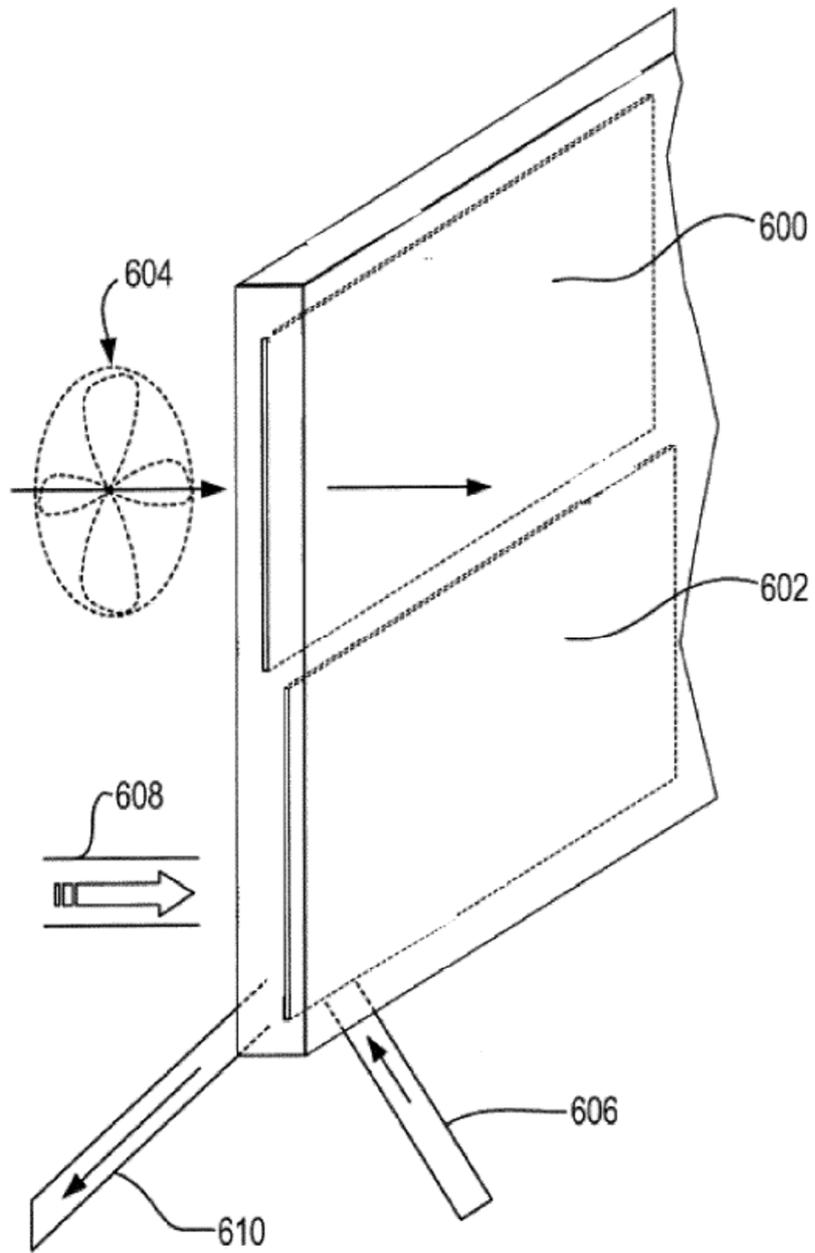


FIG. 6

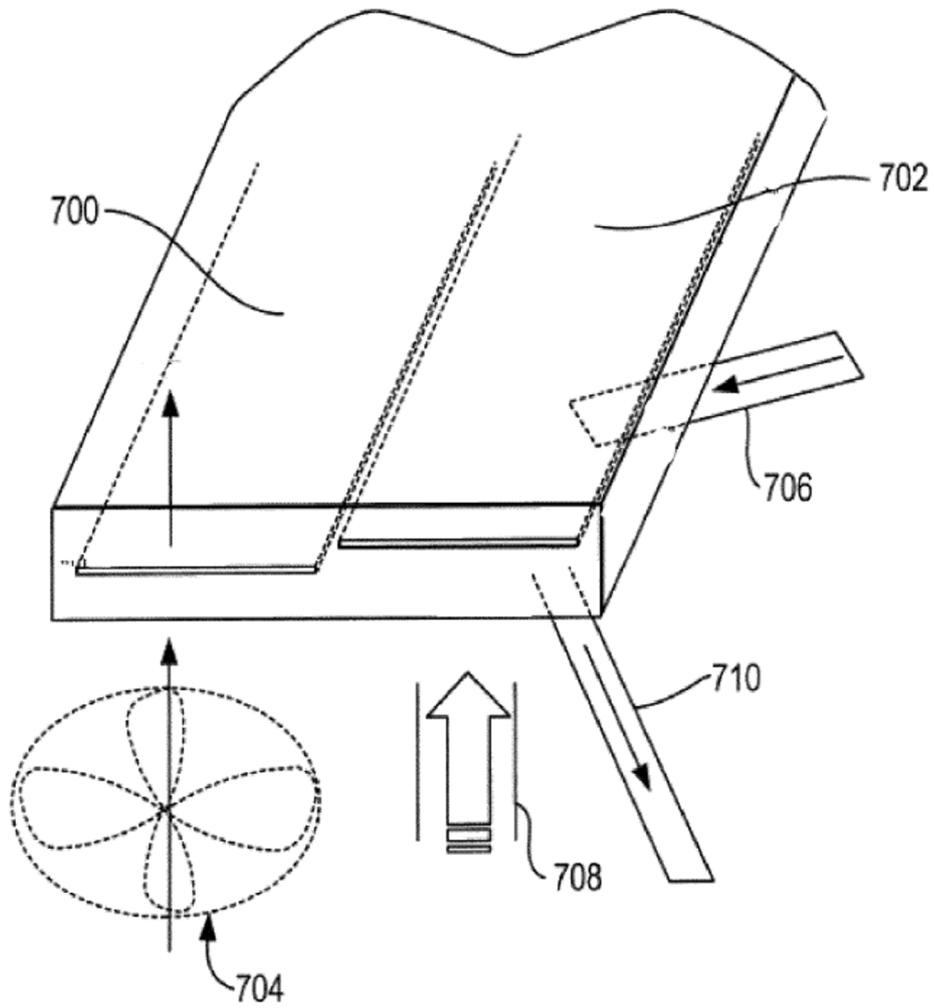
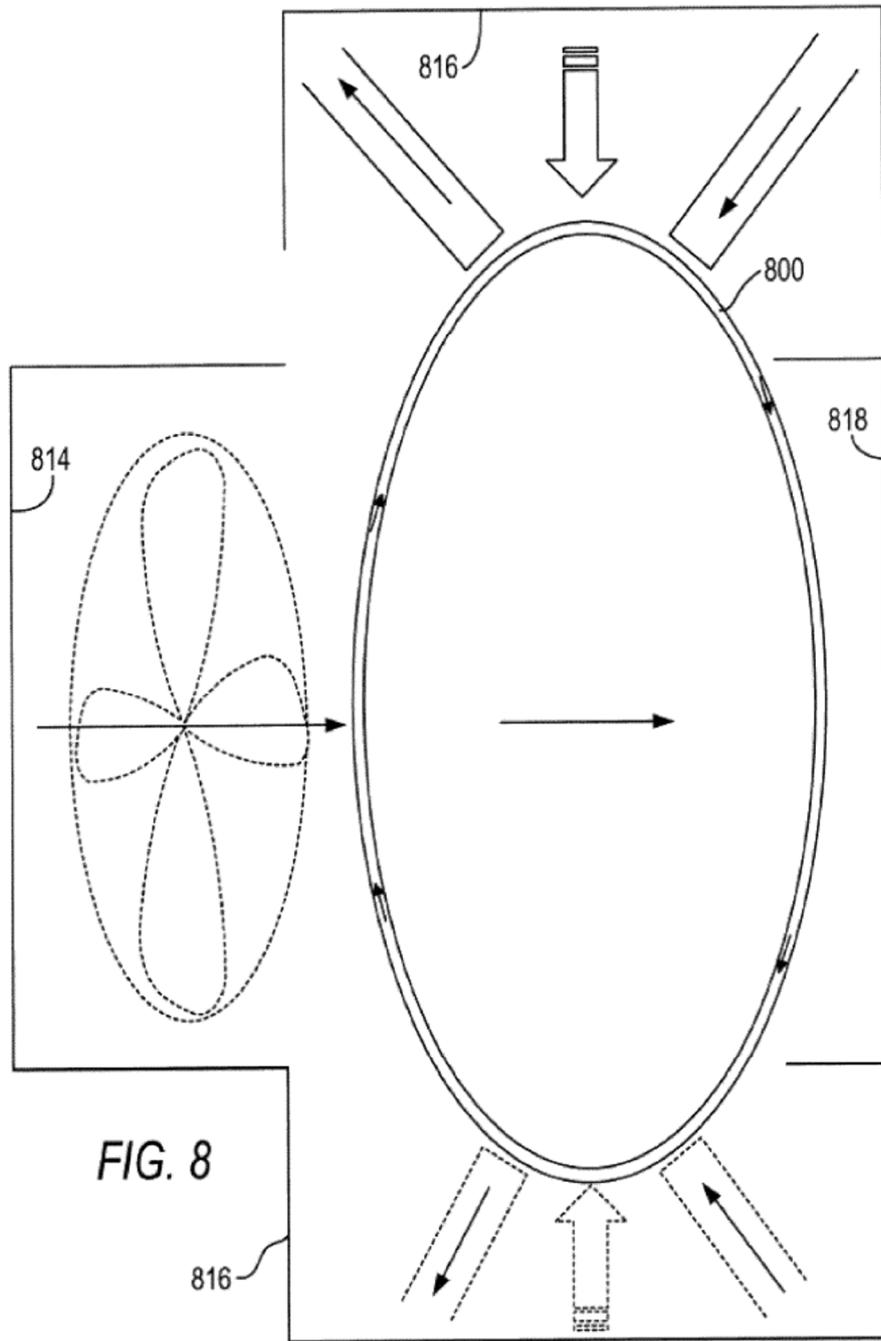
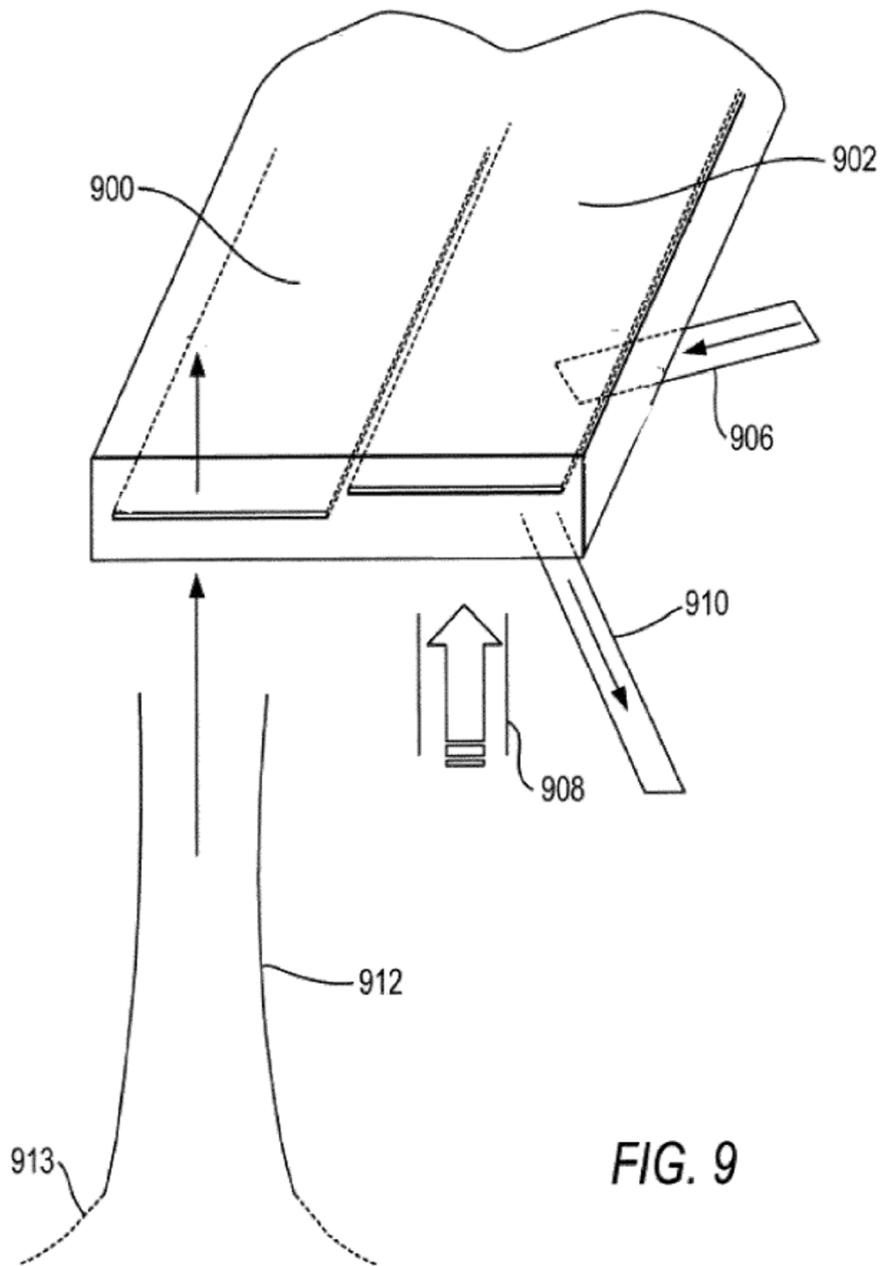


FIG. 7





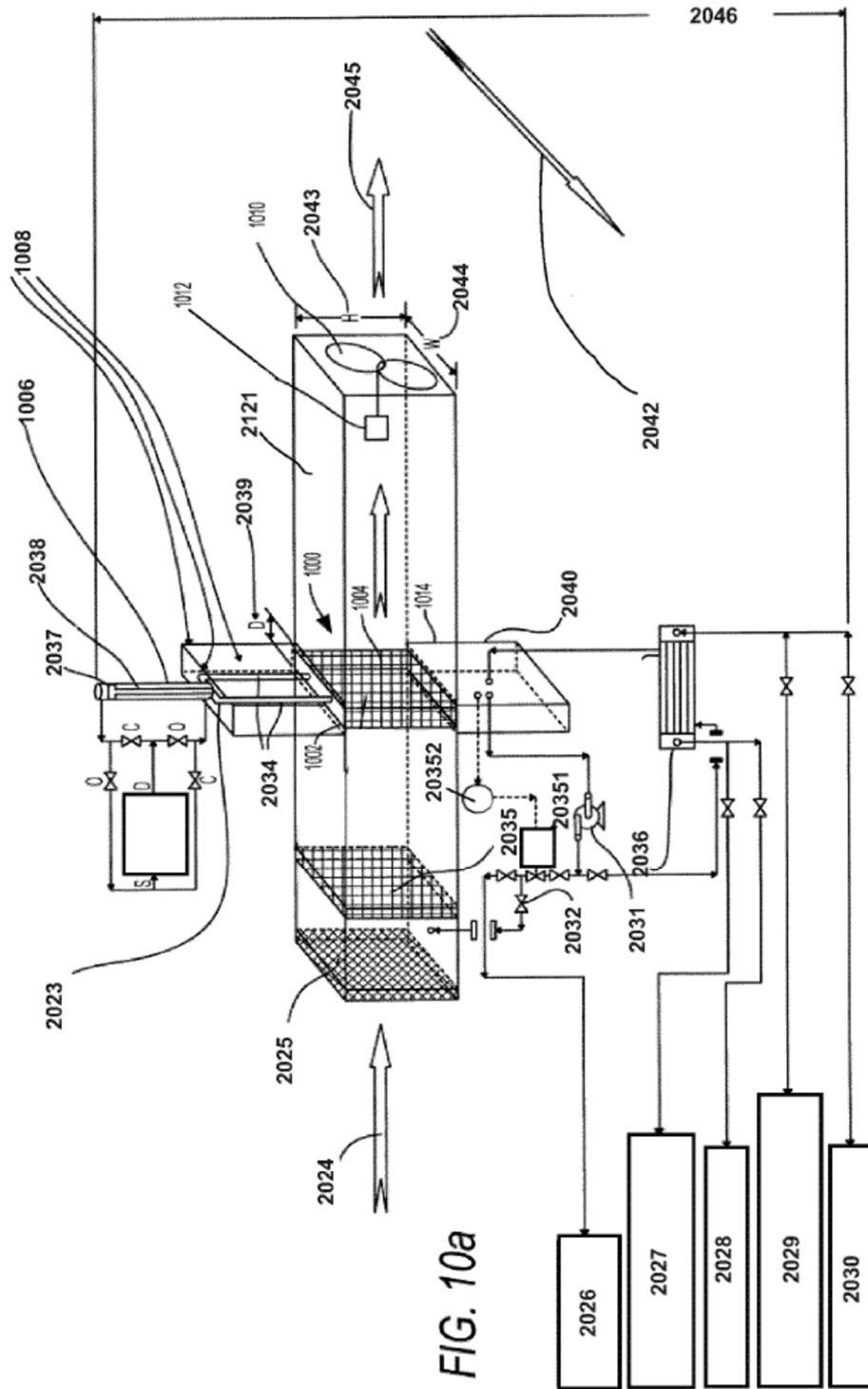


FIG. 10a

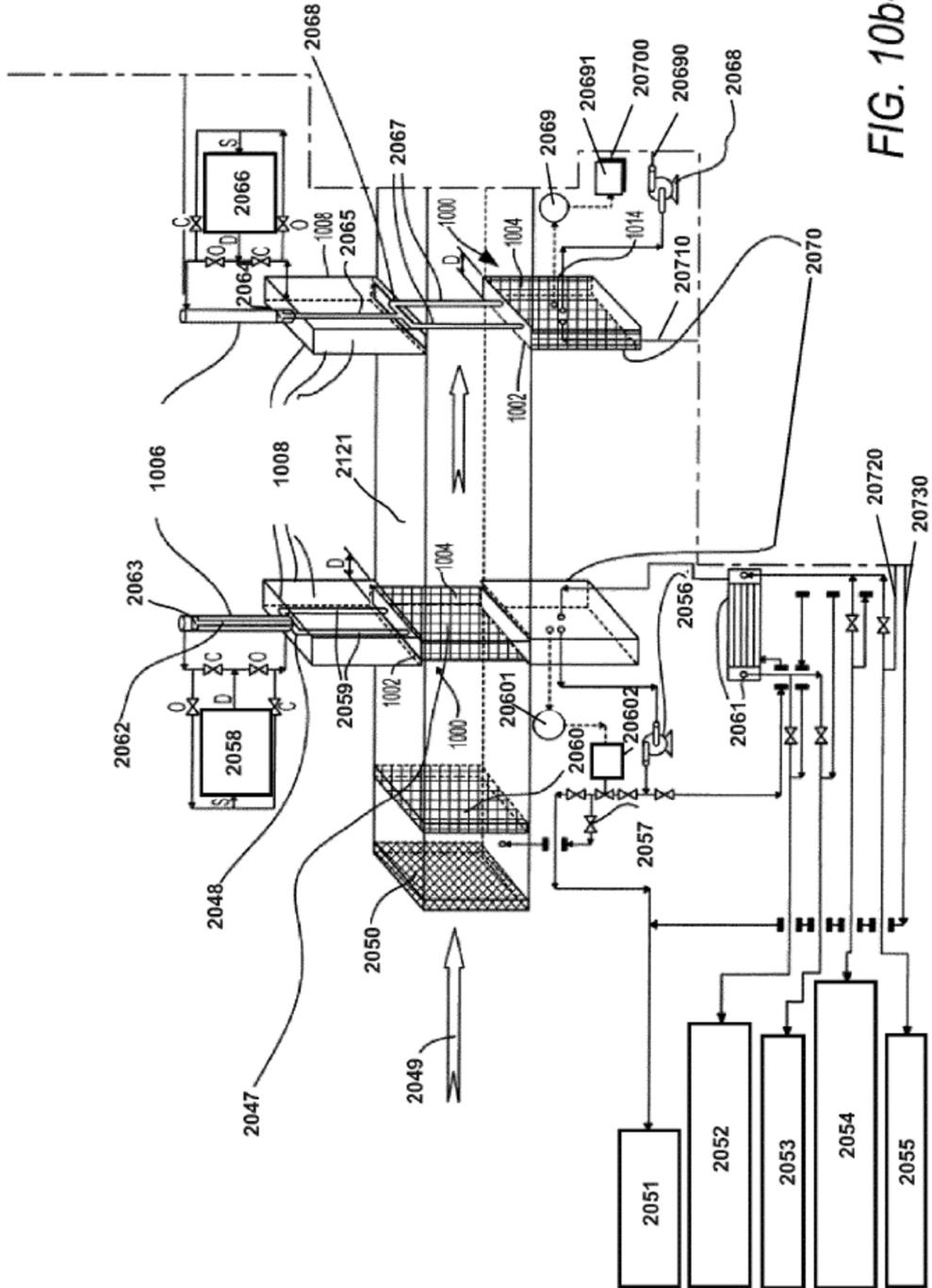


FIG. 10b-1

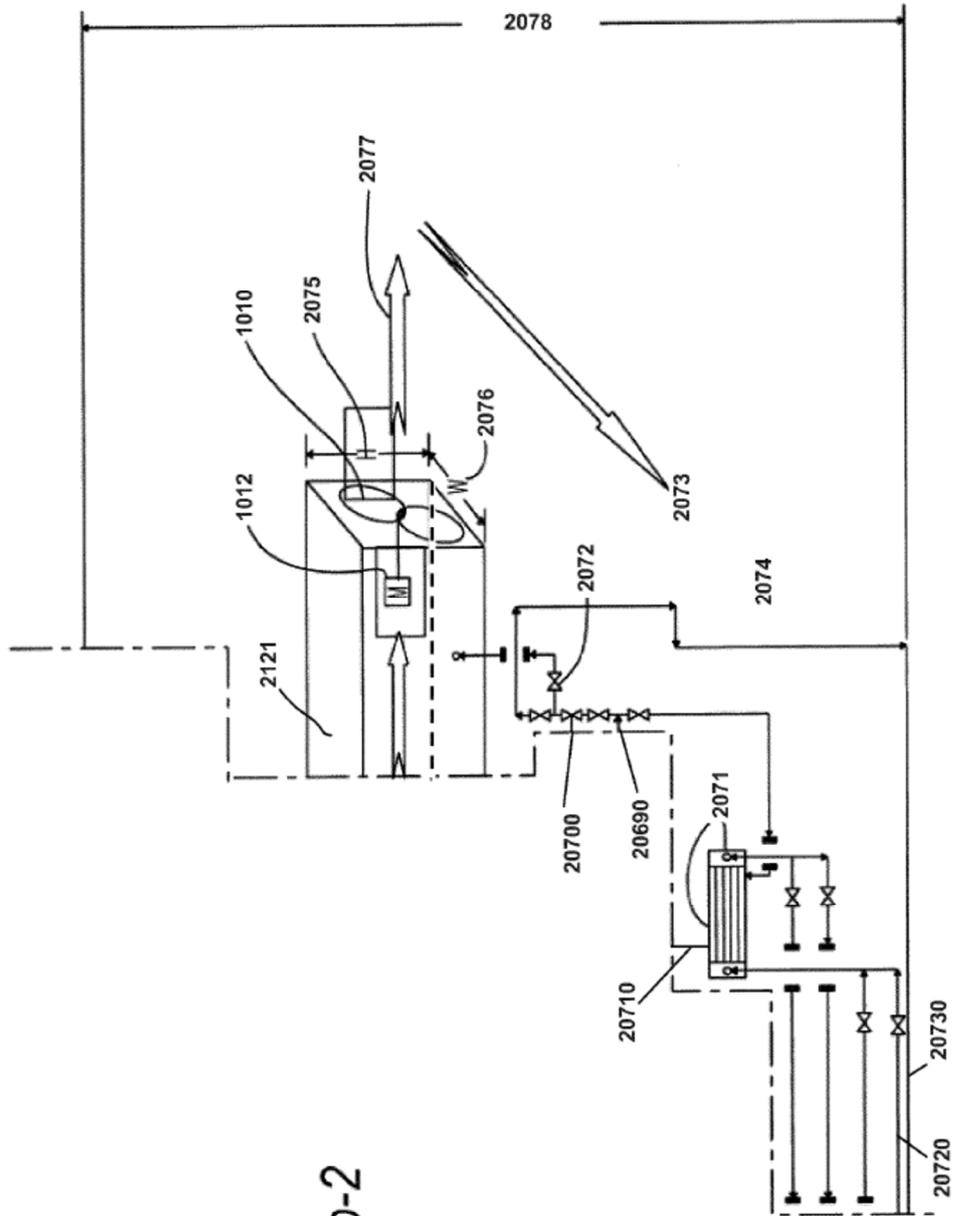


FIG. 10b-2

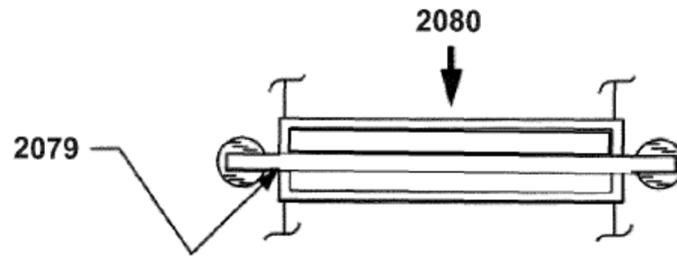


FIG. 10c

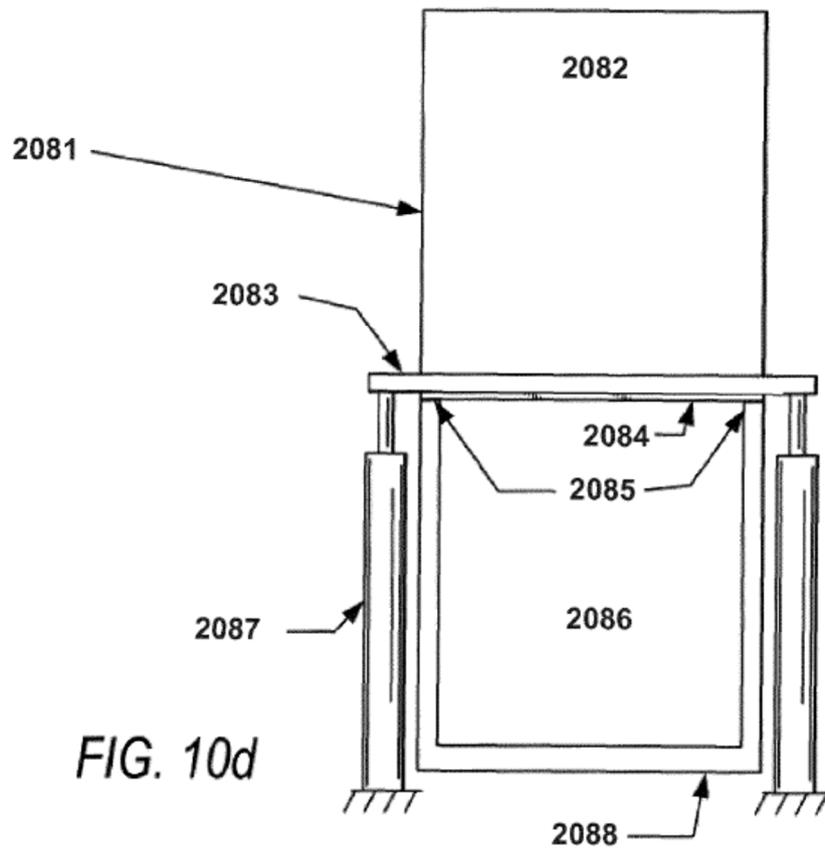


FIG. 10d

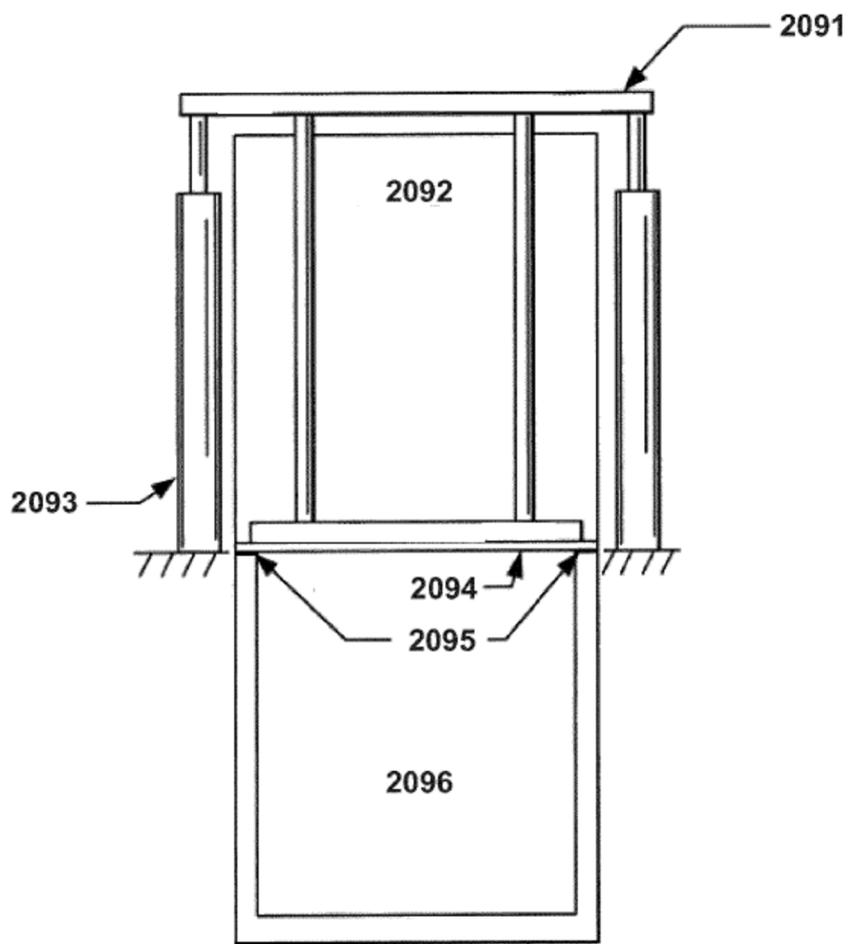
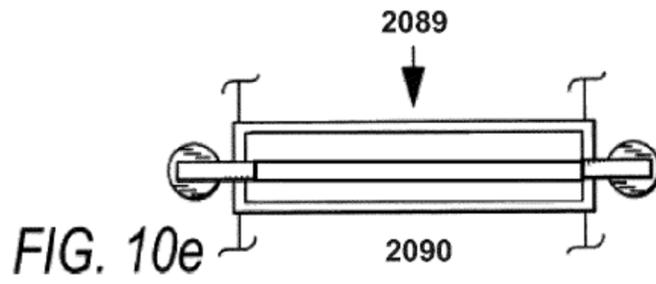


FIG. 10f

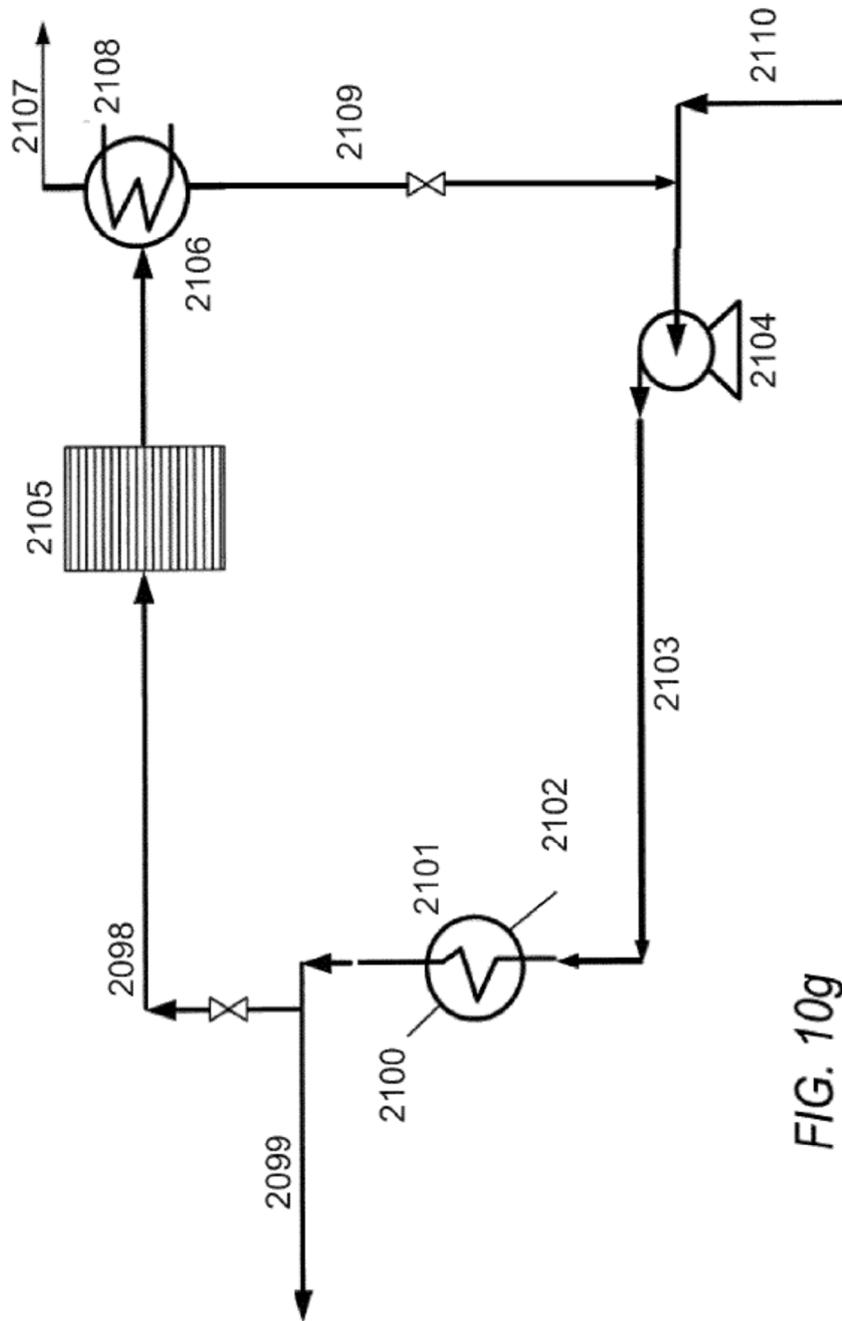


FIG. 10g

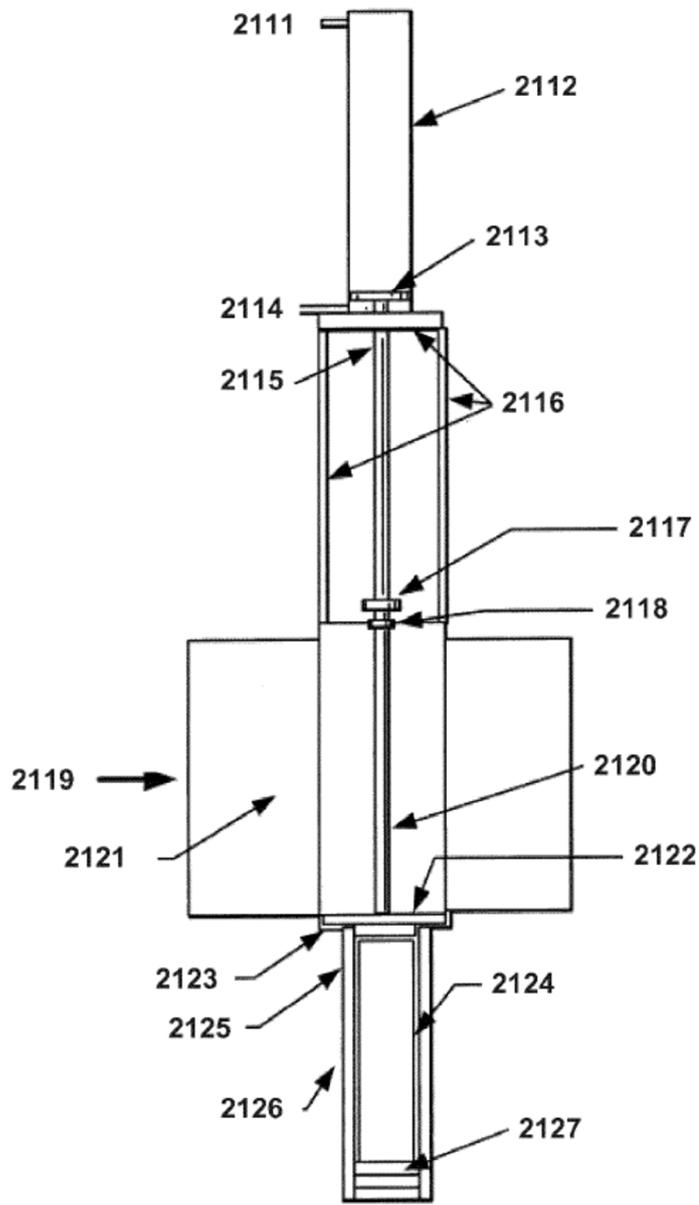


FIG. 10h

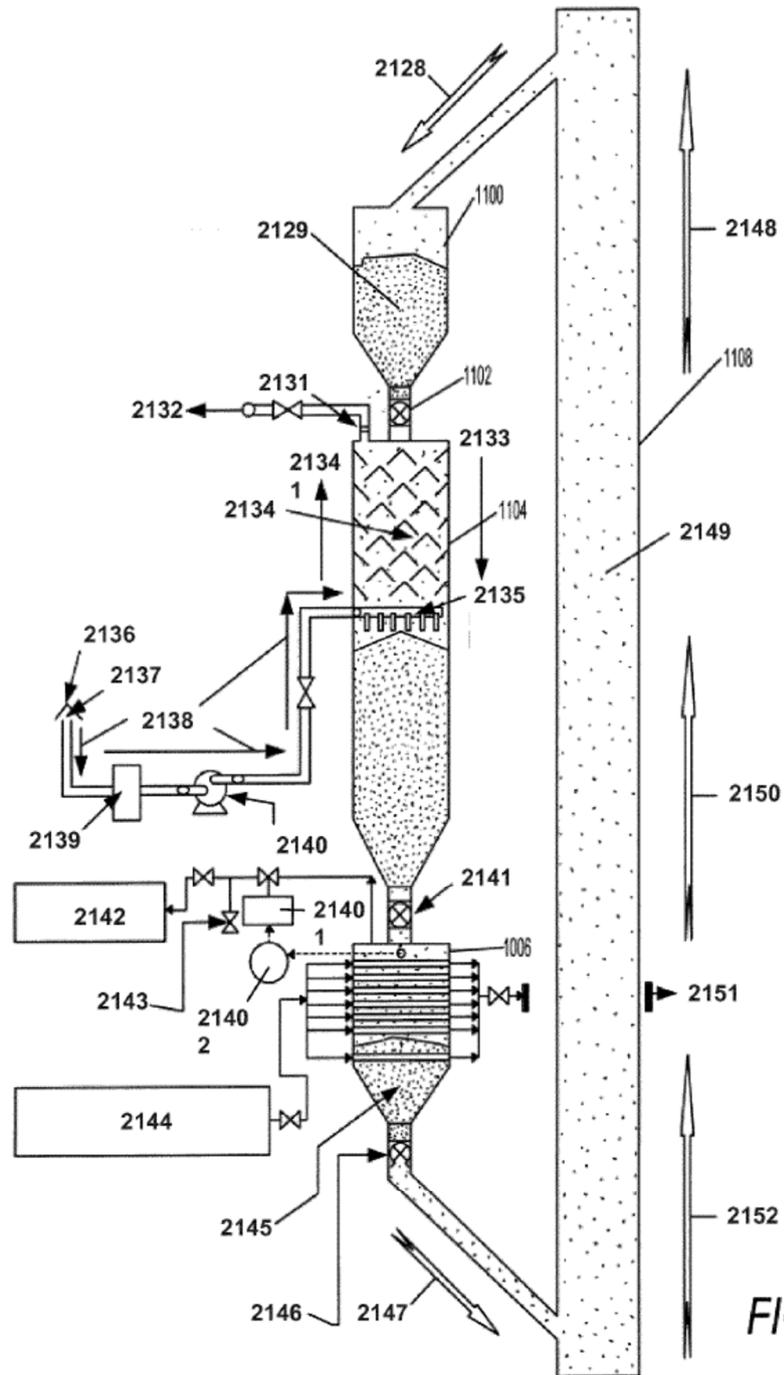


FIG. 11a

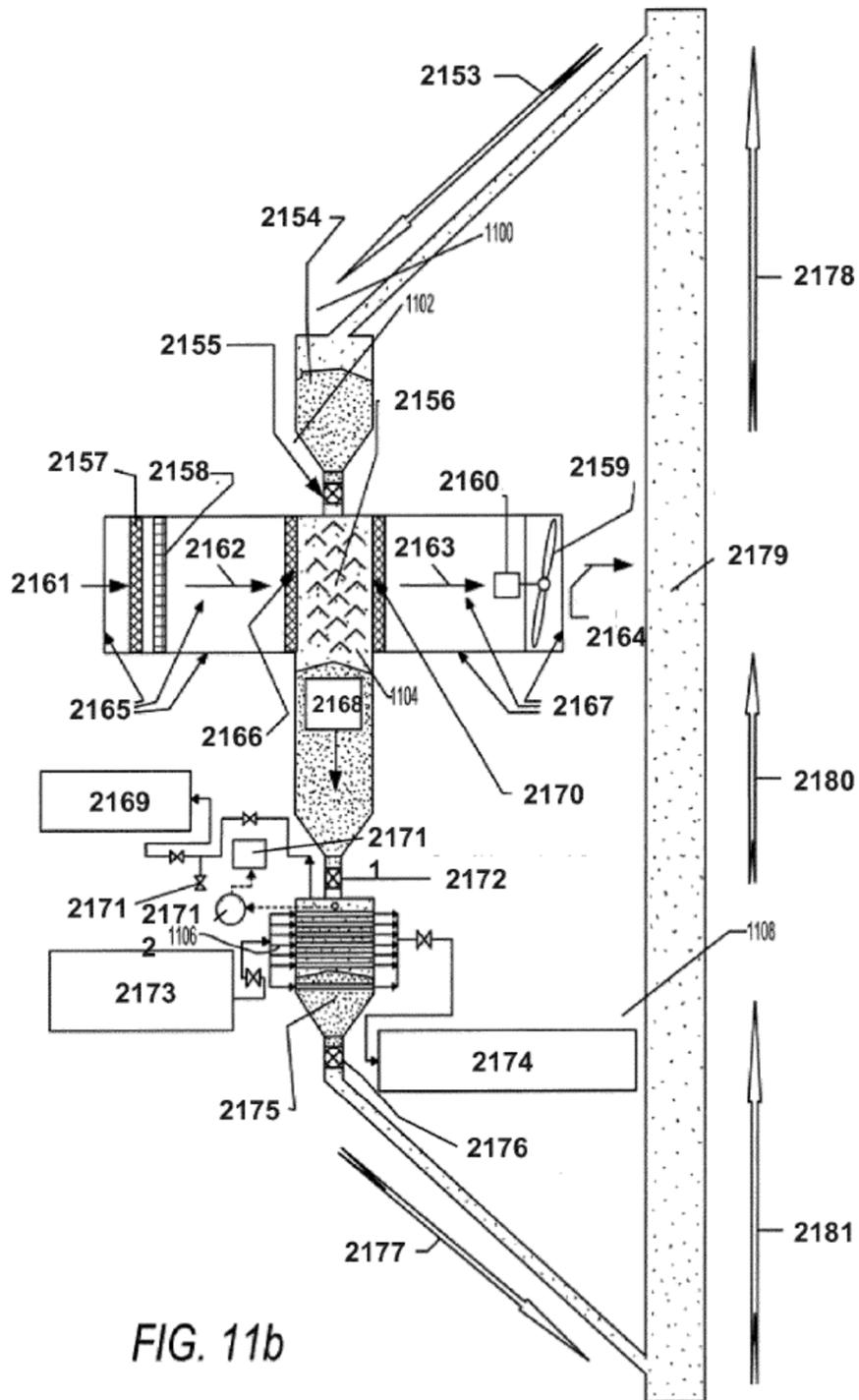


FIG. 11b

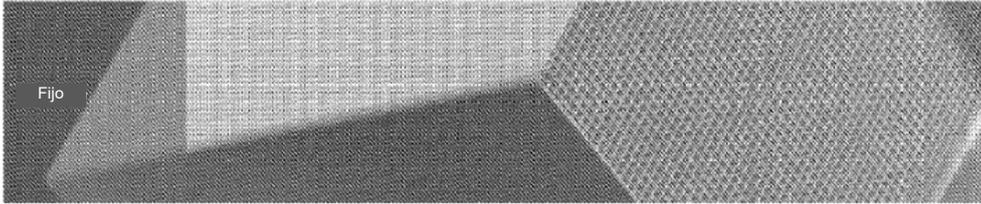
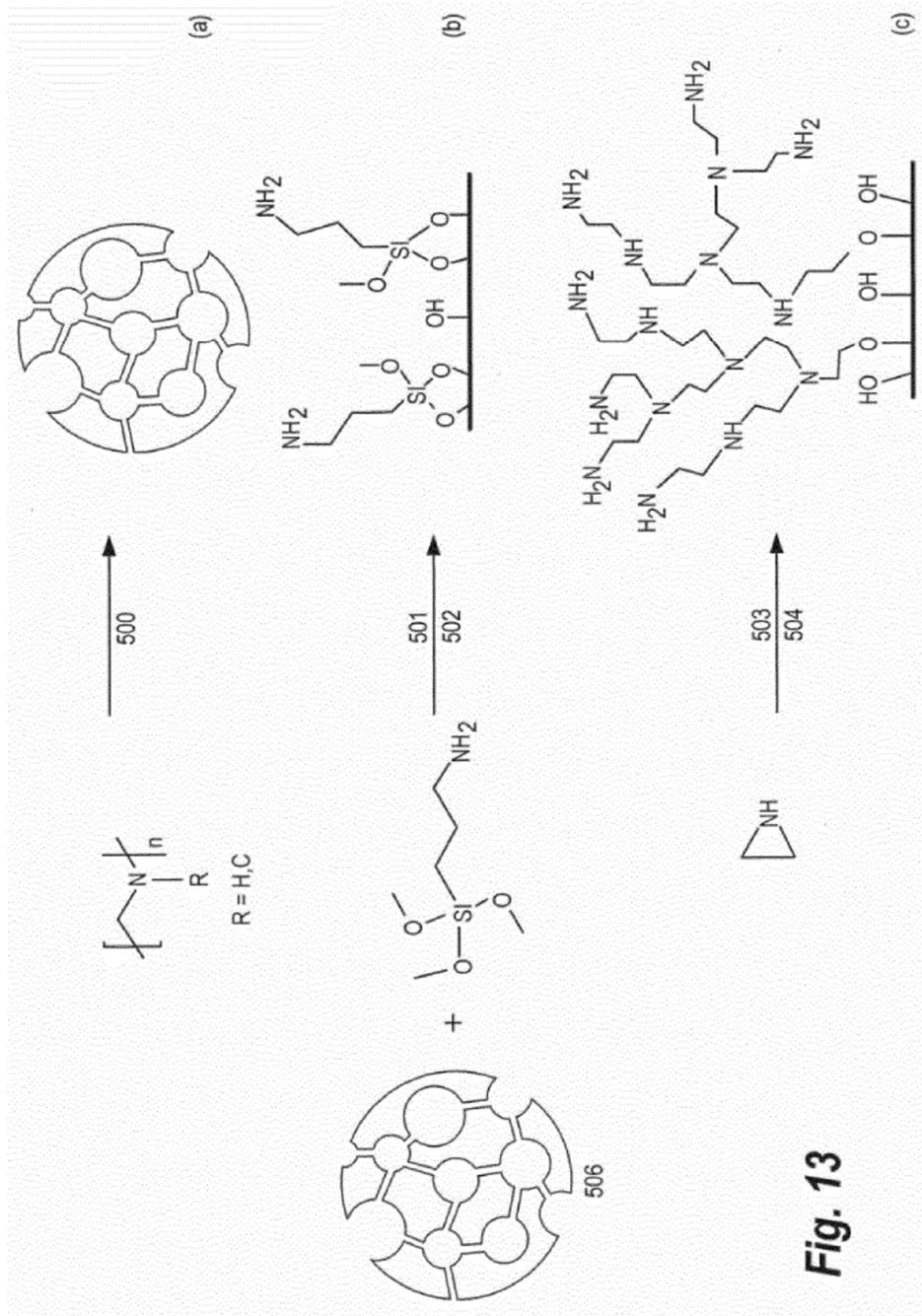


FIG. 12



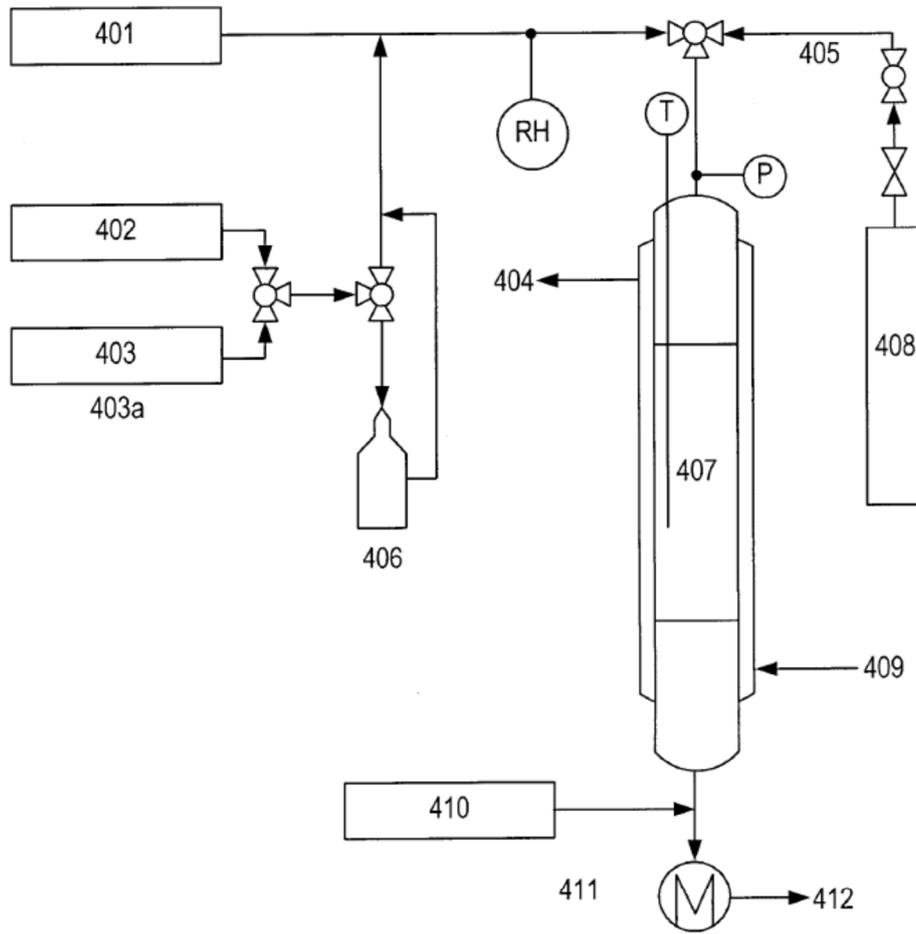


Fig. 14

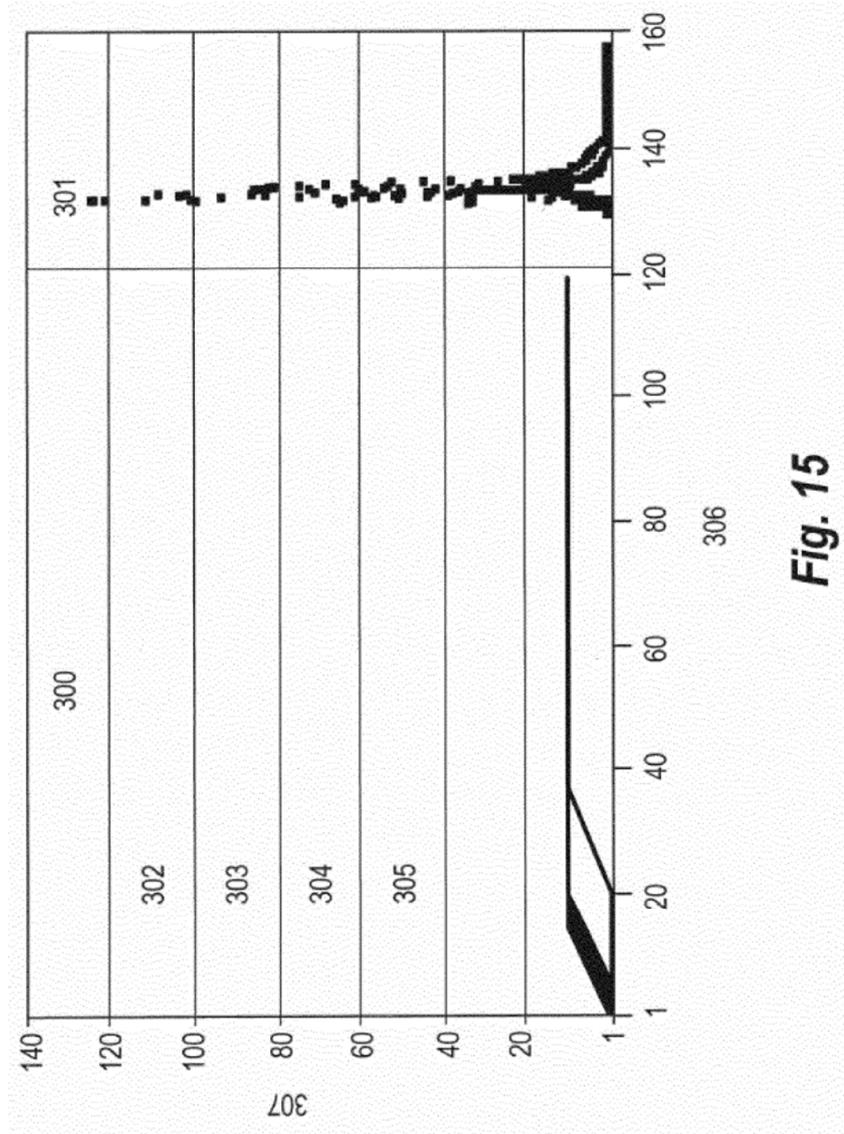


Fig. 15

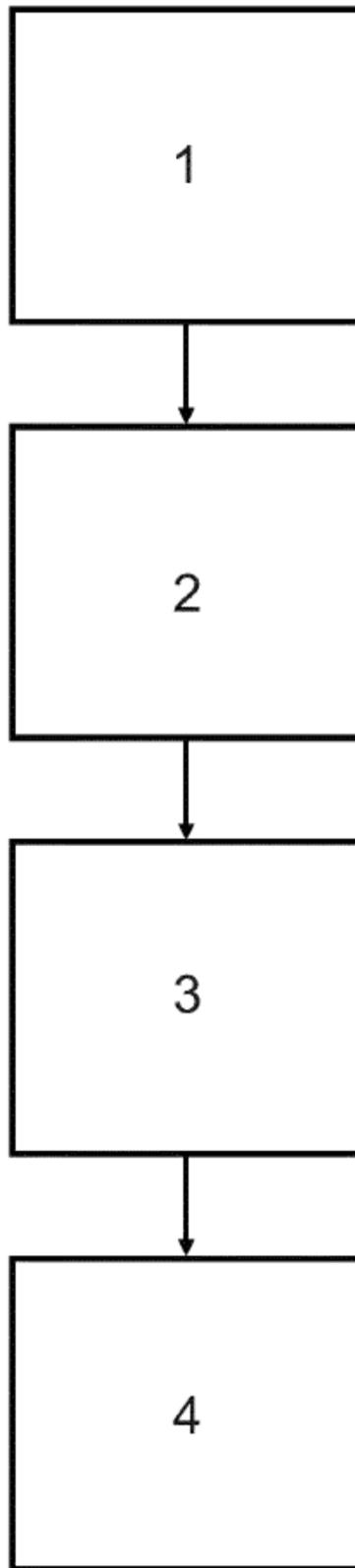


Fig. 16

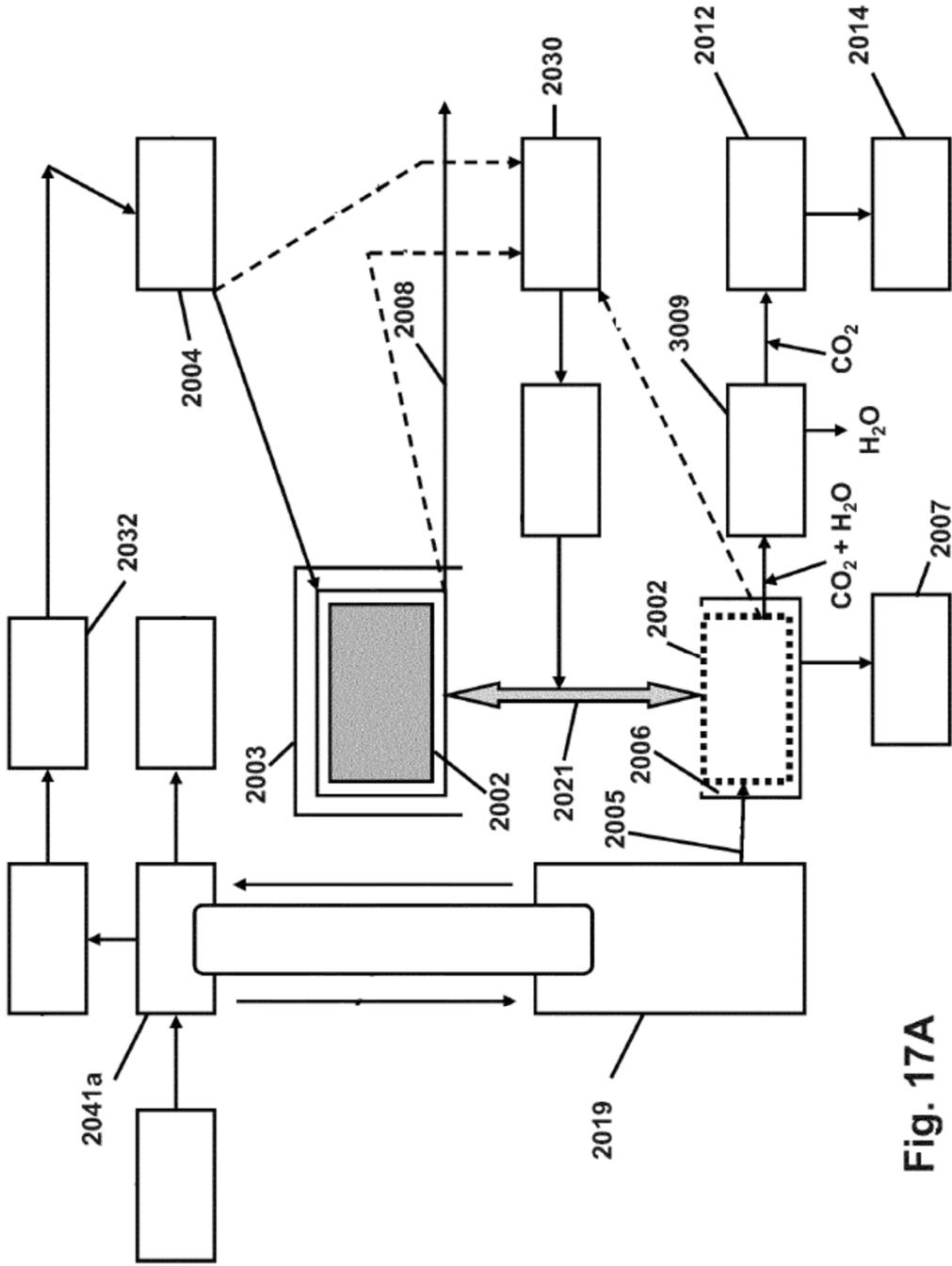


Fig. 17A

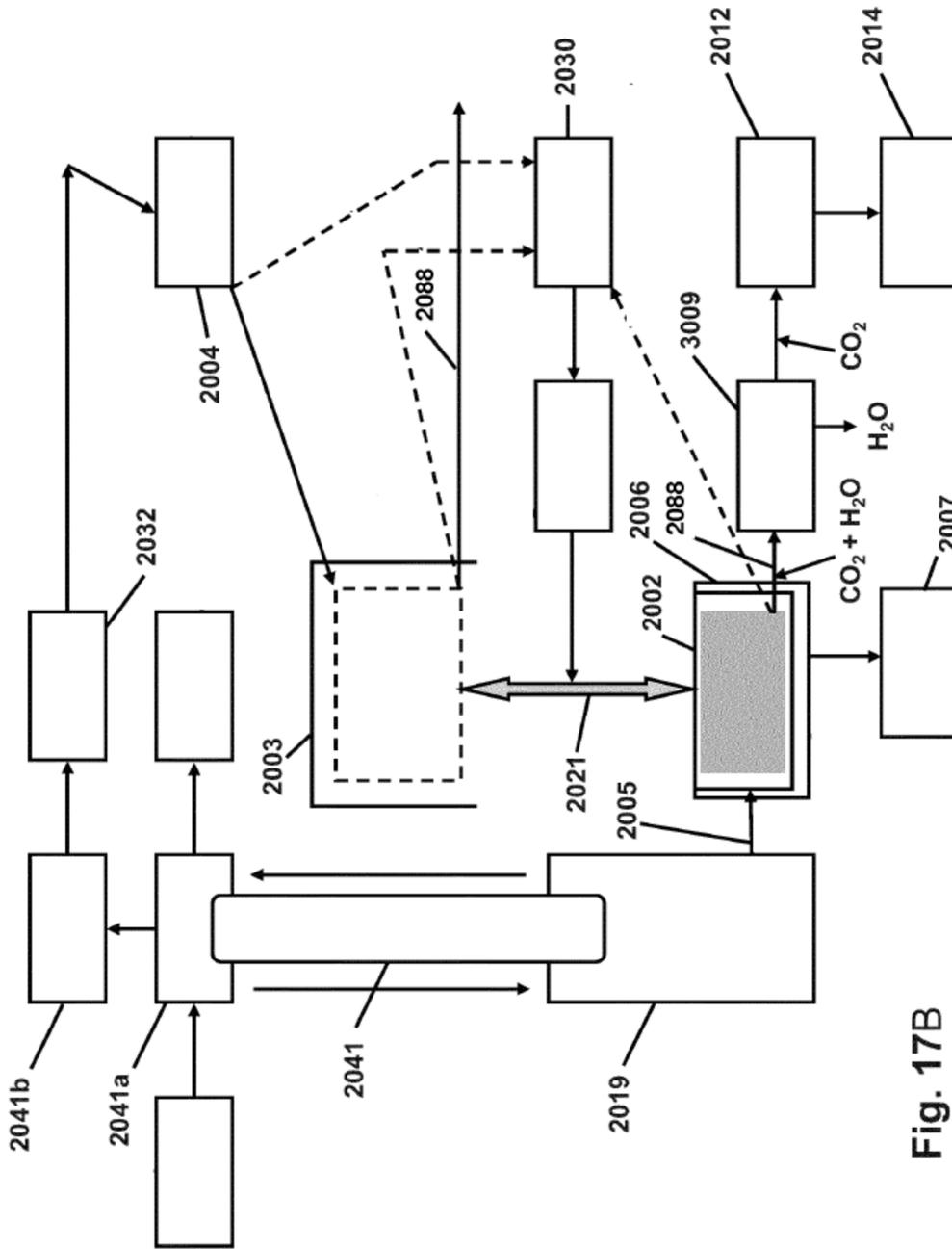


Fig. 17B

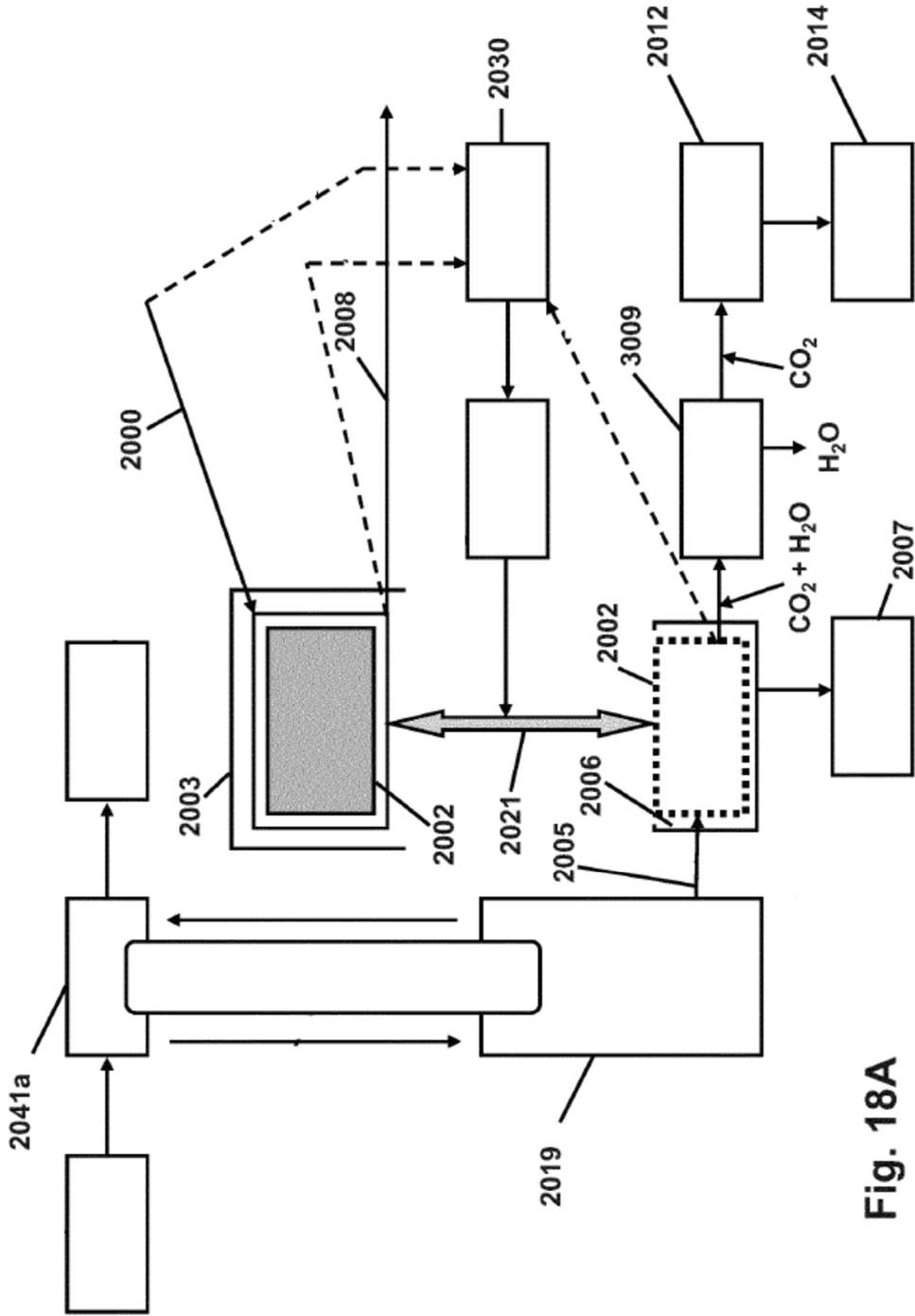


Fig. 18A

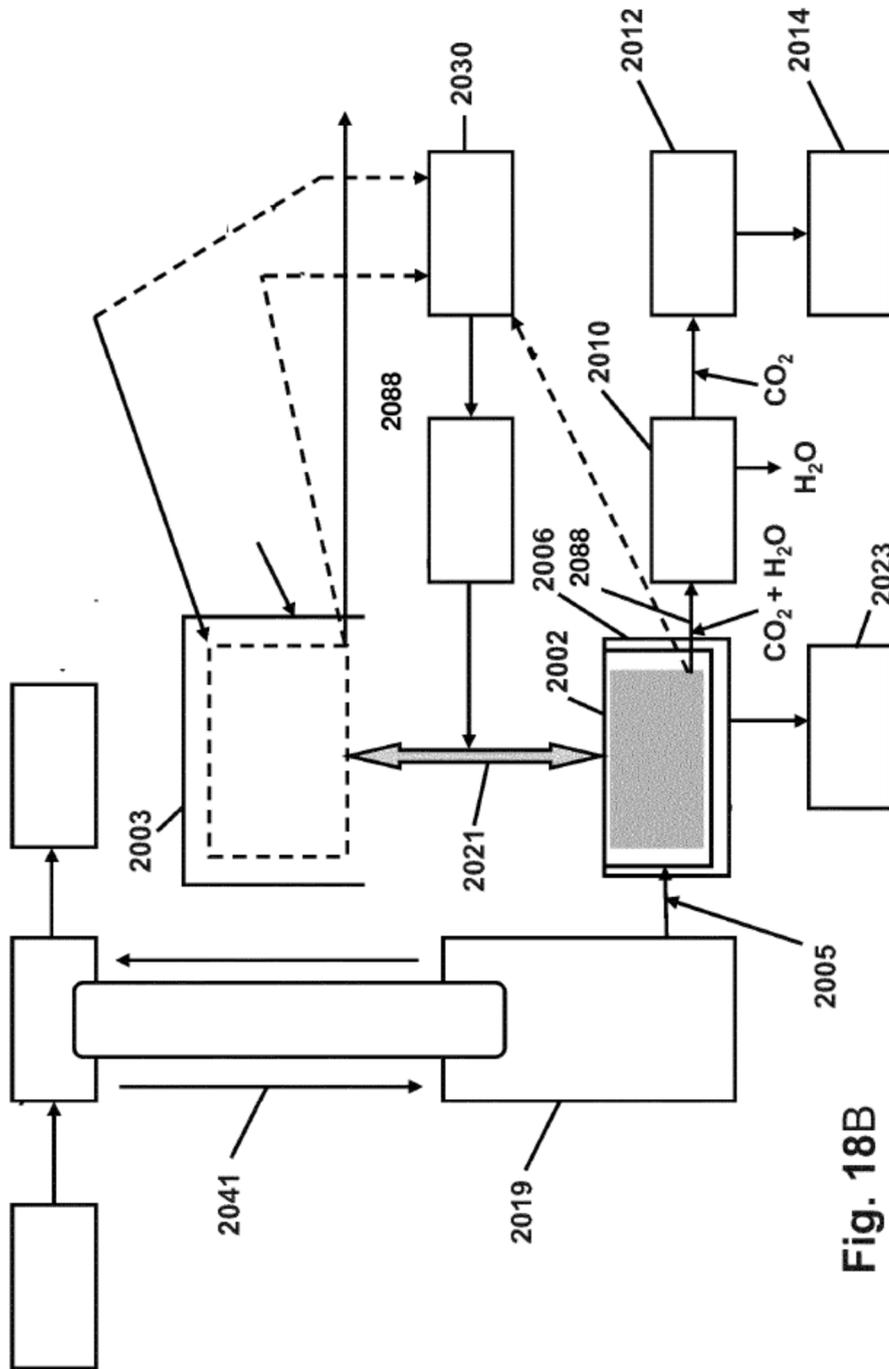


Fig. 18B

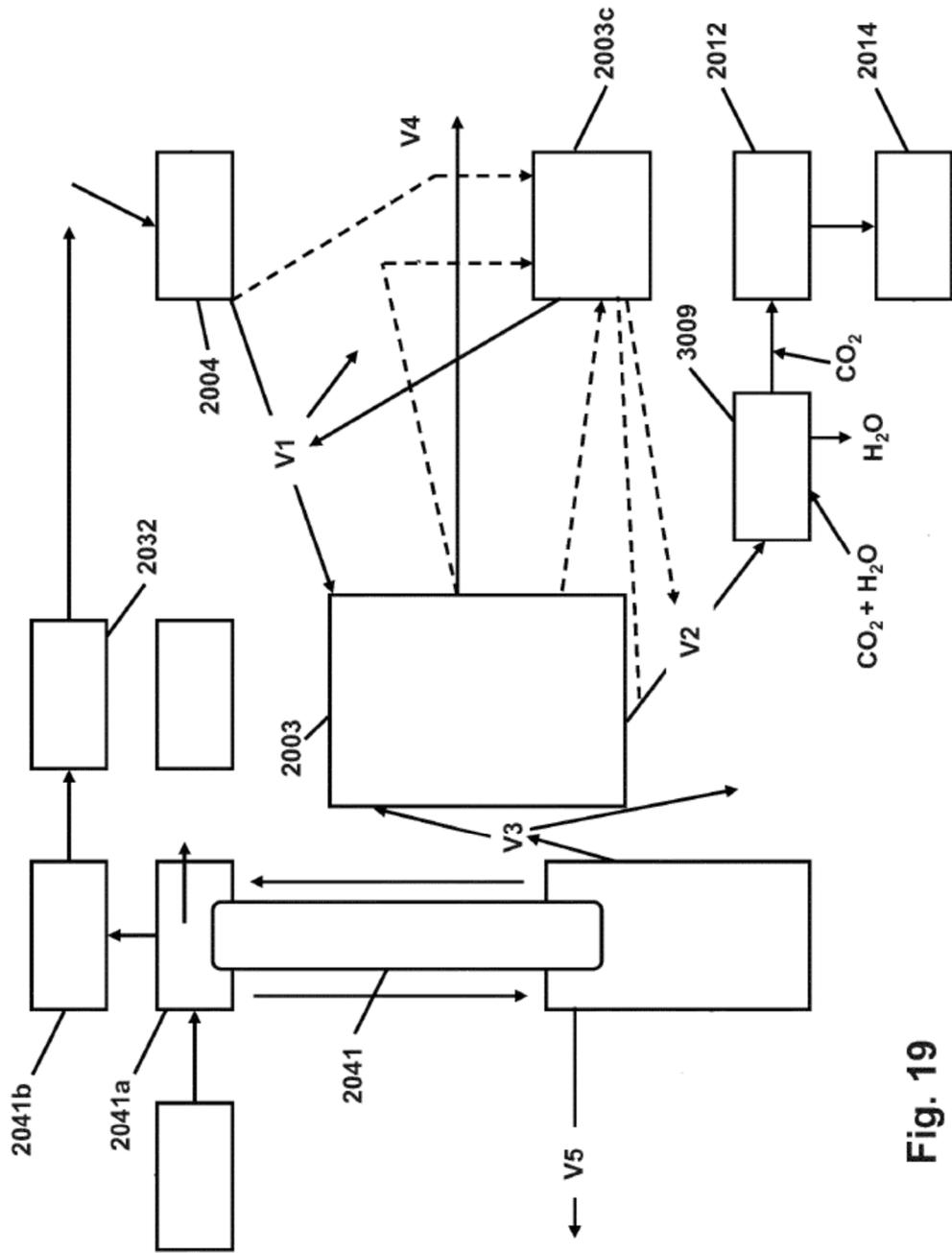


Fig. 19

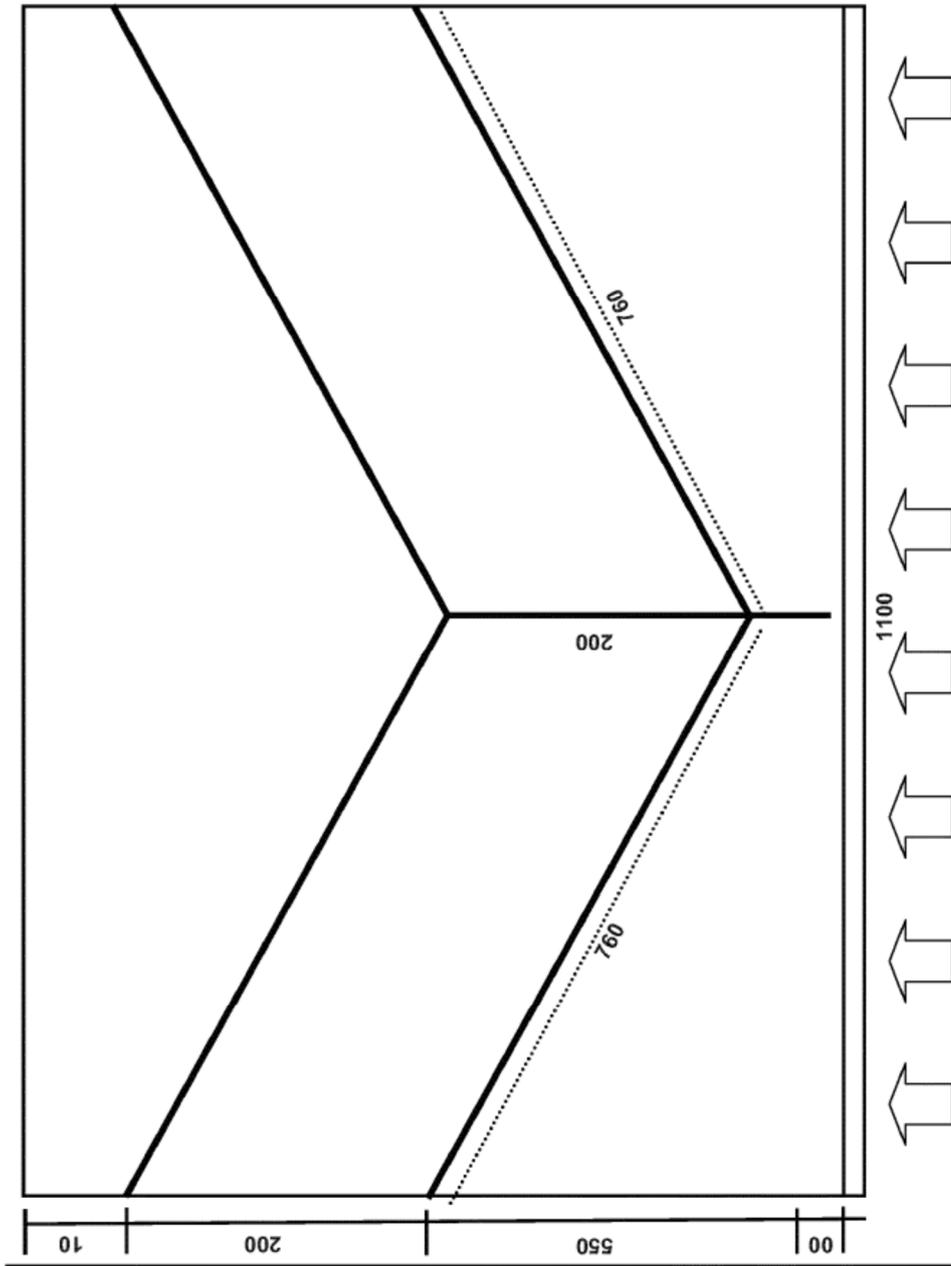


Fig. 21A

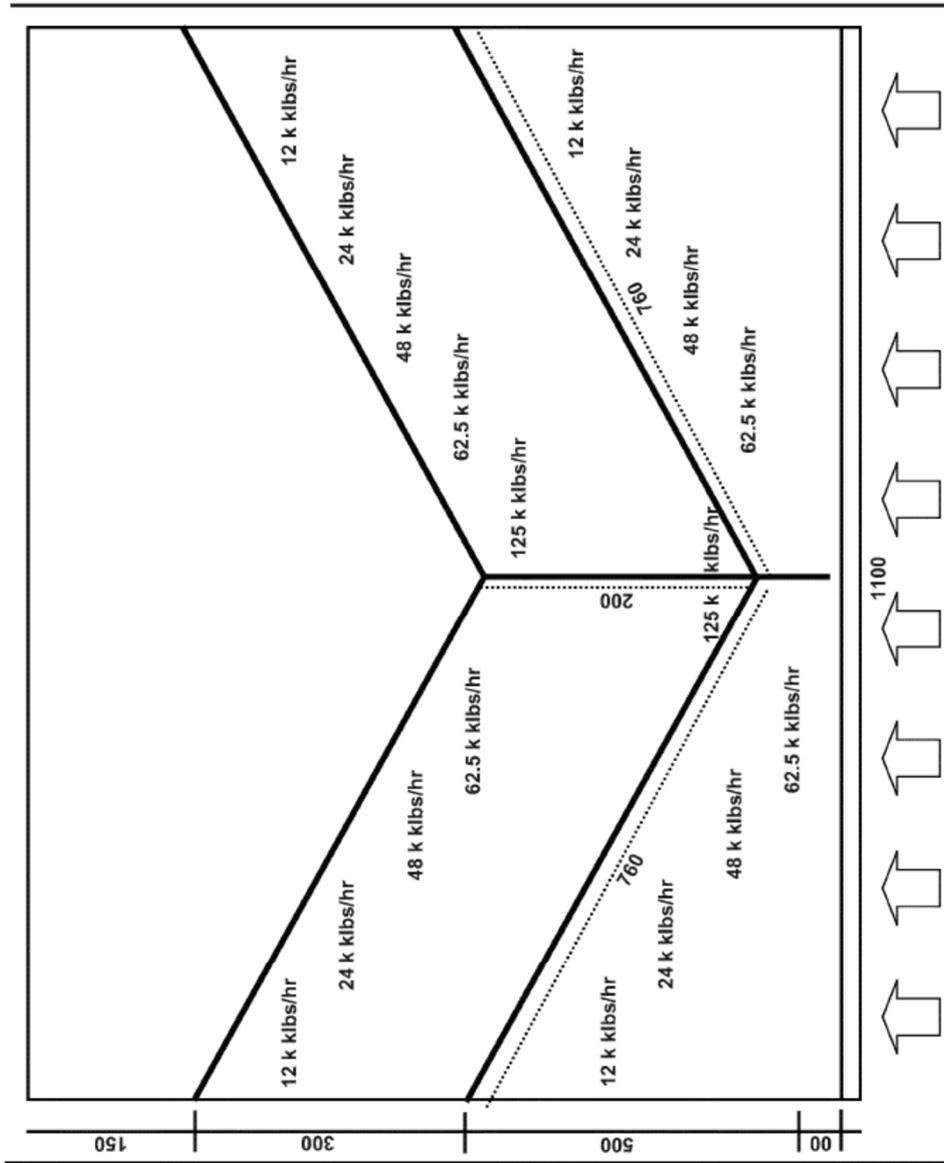


Fig. 21B

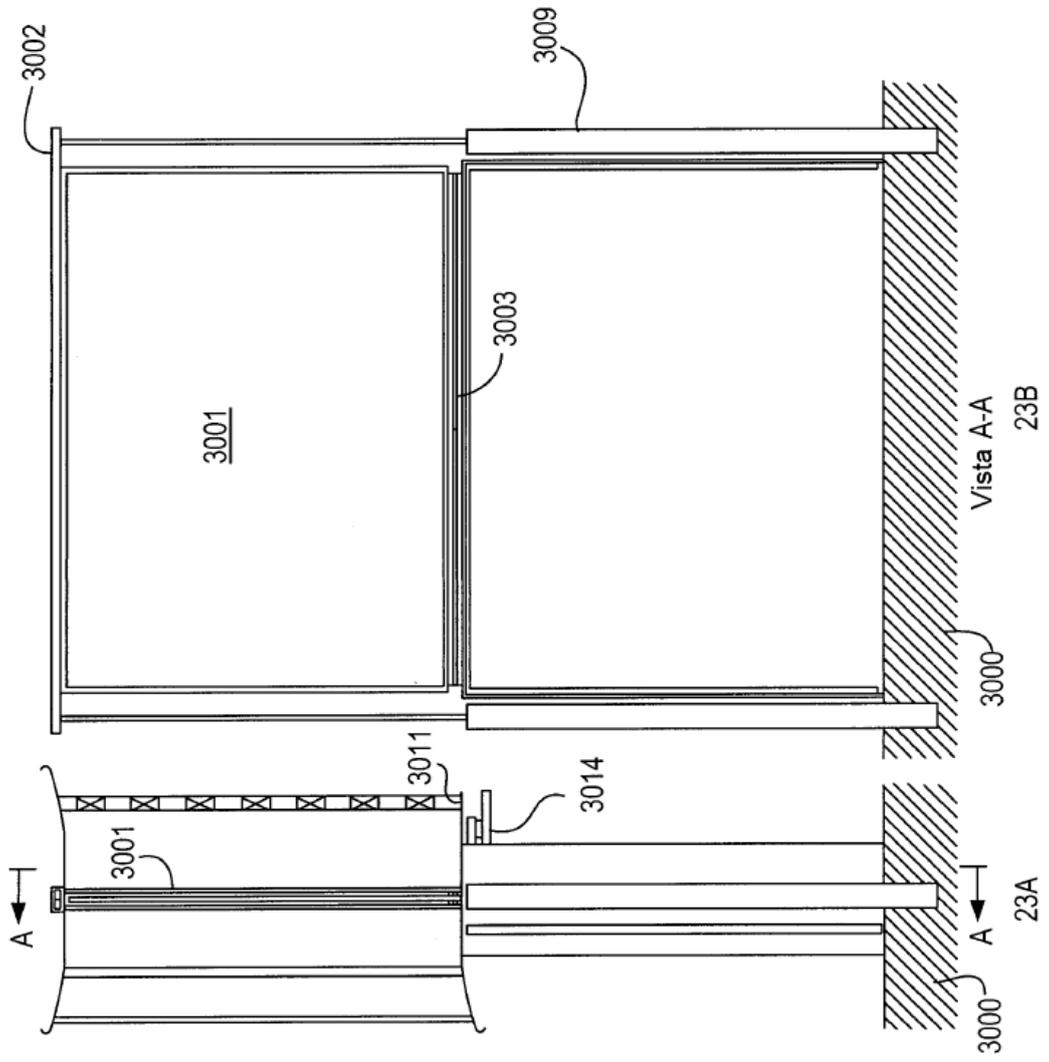
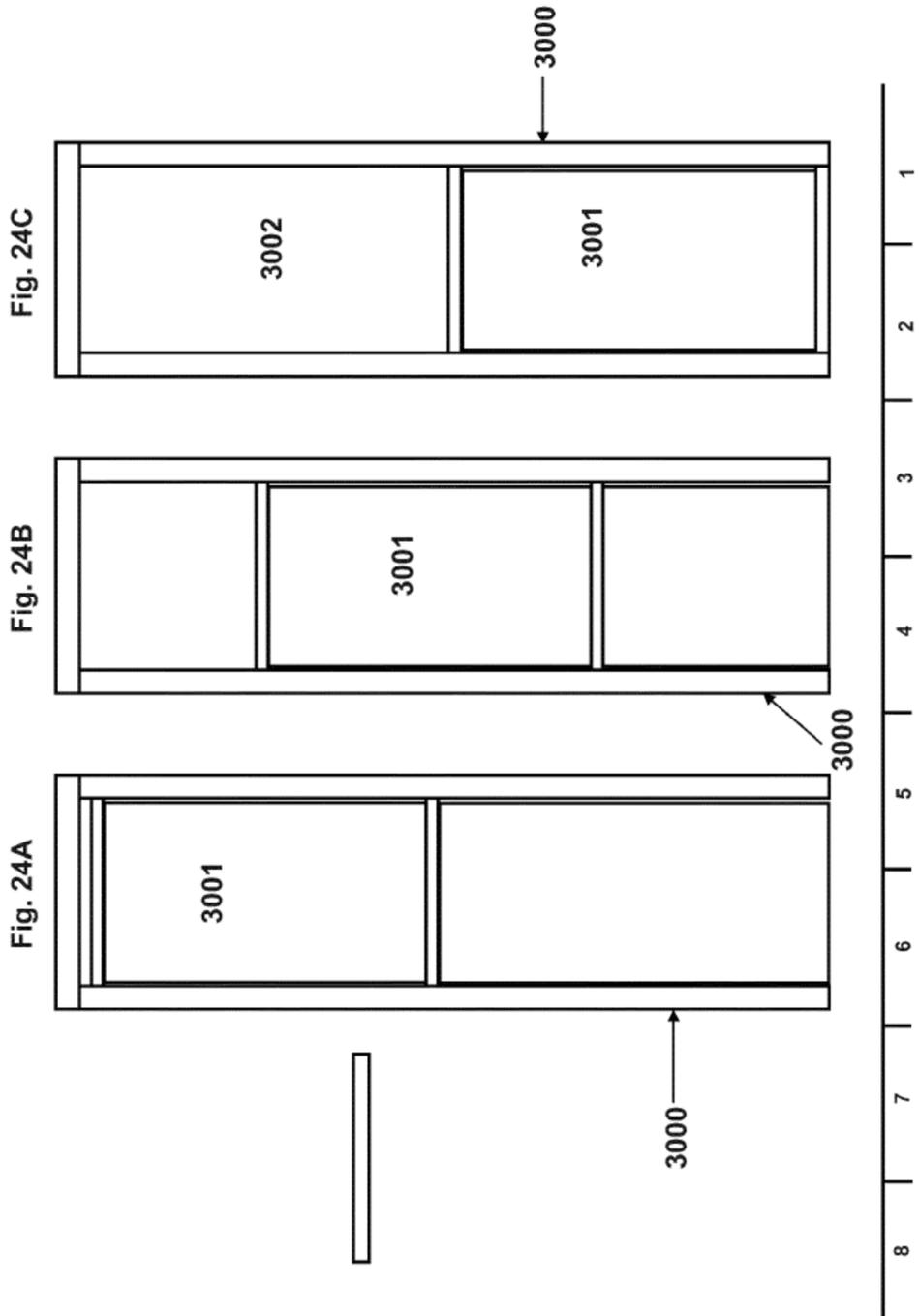


Fig. 23



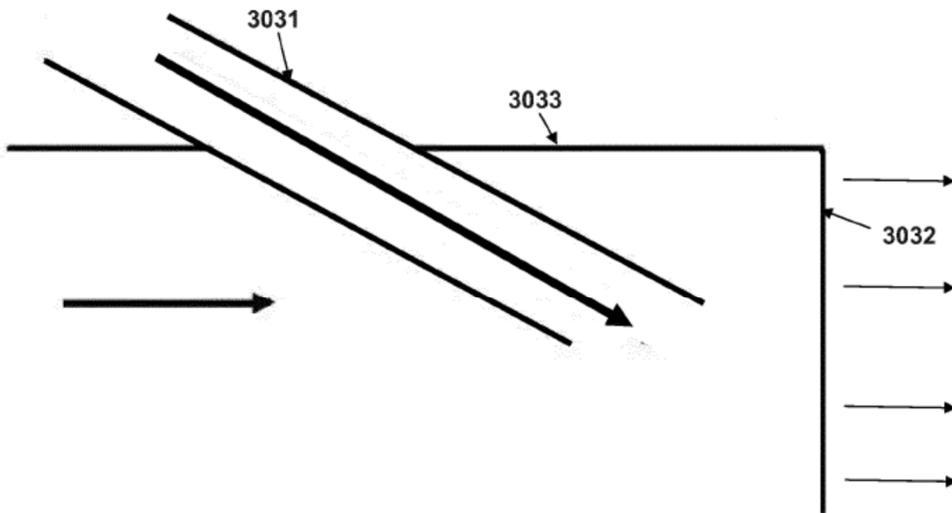


Fig. 25

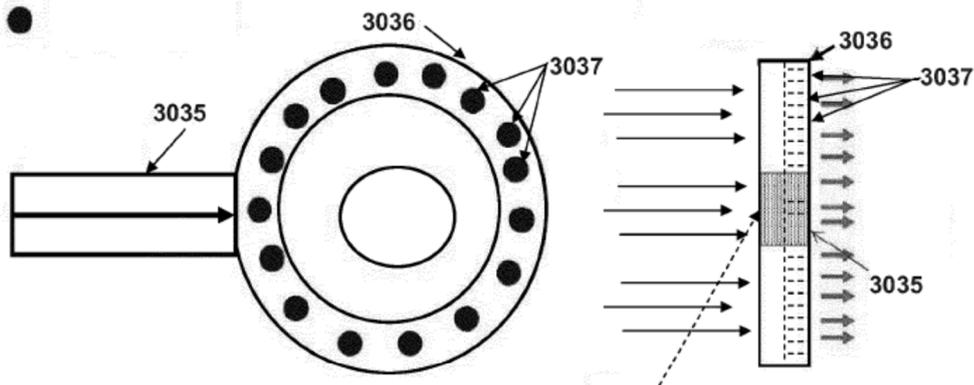


Fig. 26A

Fig. 26B

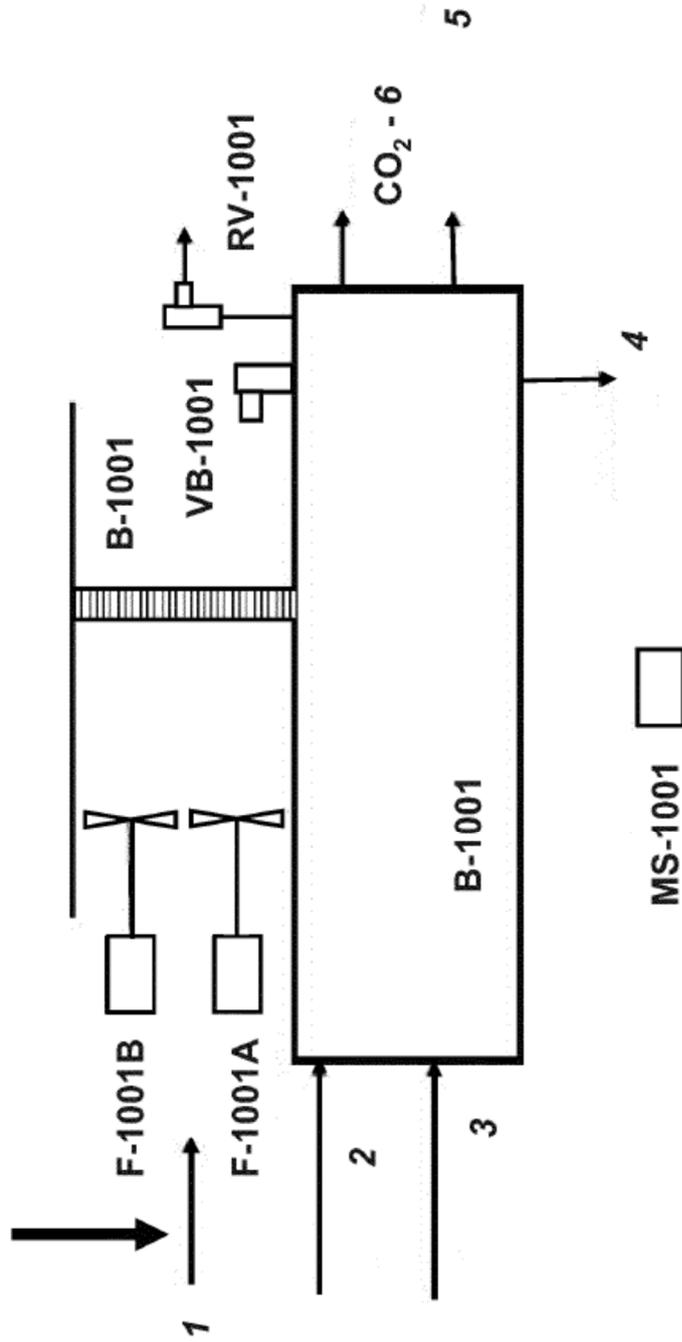


Fig. 27

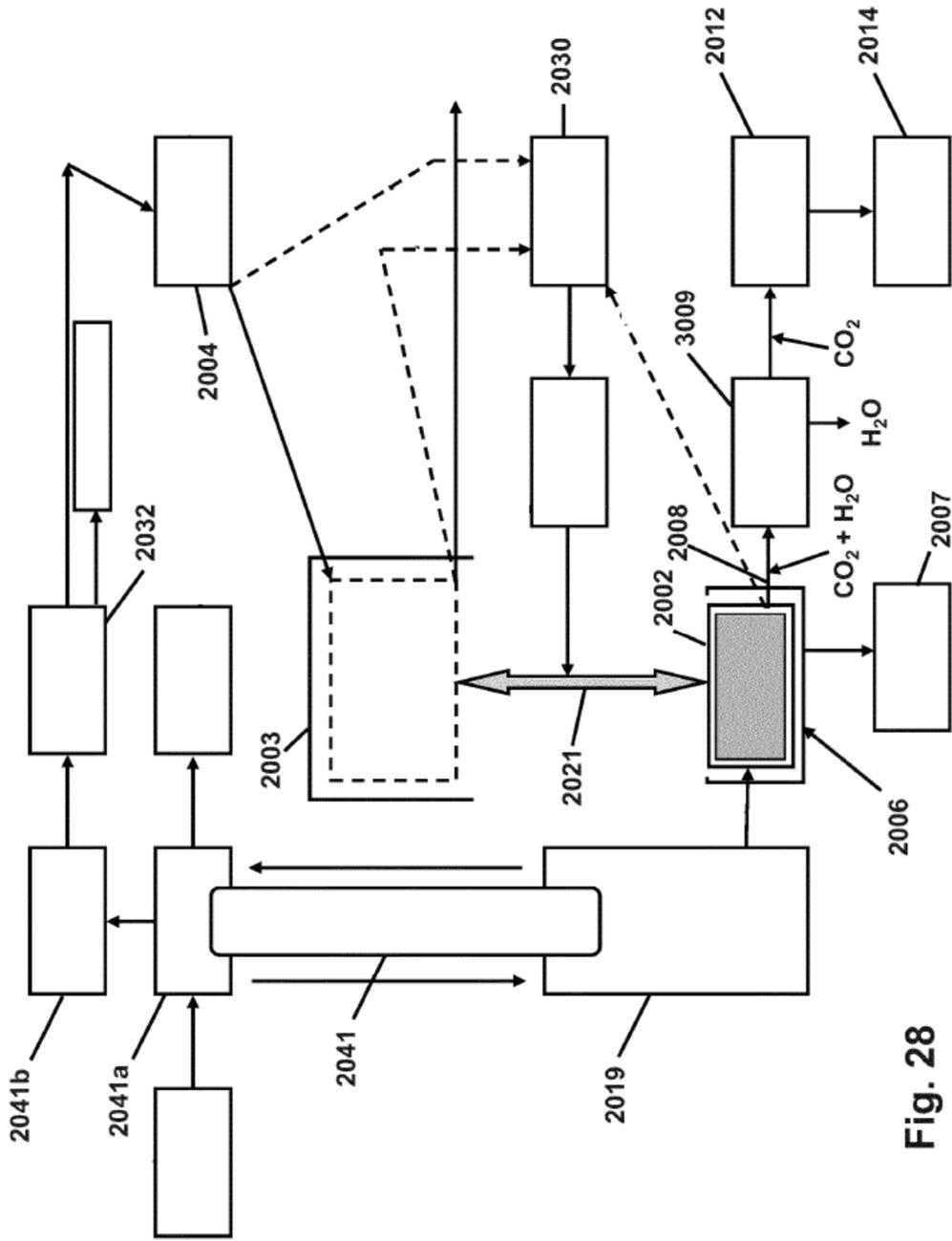


Fig. 28