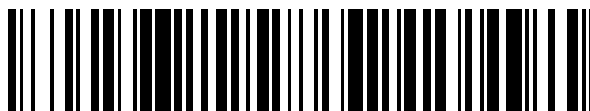


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 727 343**

51 Int. Cl.:

B01J 20/08	(2006.01)	B01D 53/14	(2006.01)
B01J 20/22	(2006.01)	B01D 53/18	(2006.01)
B01D 53/34	(2006.01)	B01D 53/06	(2006.01)
F25J 3/08	(2006.01)	B01J 20/34	(2006.01)
B01D 53/62	(2006.01)		
B01D 53/02	(2006.01)		
B01J 20/28	(2006.01)		
B01J 20/10	(2006.01)		
B01D 53/047	(2006.01)		
B01D 53/04	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.05.2013 PCT/US2013/039534**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **07.11.2013 WO13166432**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.05.2013 E 13785210 (9)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2019 EP 2867600**

54 Título: **Sistema y método de captura y secuestro de dióxido de carbono**

30 Prioridad:

04.05.2012 US 201261643103 P
02.05.2013 US 201313886207

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.10.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

EISENBERGER, PETER

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 727 343 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

Sistema y método de captura y secuestro de dióxido de carbono

5 La solicitud reclama el beneficio o la prioridad conforme a 35 USC 119 (e) de una Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. que tiene la Solicitud N.º 61/643.103 presentada el 30 de abril de 2010; de una Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. que tiene la Solicitud N.º 61/330.108 presentada el 30 de abril de 2010; de una Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. que tiene la Solicitud N.º 61/351.216 presentada el 3 de junio de 2010 y de una Solicitud de Patente Provisional de EE.UU. que tiene la Solicitud N.º 61/443.061 presentada el 15 de febrero de 2011 y de la Solicitud de EE.UU. en tramitación N.º 13/098.370, presentada el 29 de abril de 2011.

Antecedentes

15 La presente invención se refiere a sistemas y métodos para eliminar gases de efecto invernadero de la atmósfera y en particular a sistemas y métodos para eliminar dióxido de carbono de una corriente de gas, Incluyendo el aire ambiental.

20 Como una mejora adicional al sistema descrito en la solicitud de EE.UU. en tramitación con N.º de serie 13/098.370, presentada el 29 de abril de 2011, se presenta un sistema y proceso adecuados que ahora se reconoce que pueden utilizarse para un abanico de usos más amplio que el descrito en esa solicitud anterior, especialmente cuando se modifica adicionalmente.

25 Actualmente se presta mucha atención a tratar de lograr tres objetivos algo conflictivos relacionados con la energía: 1) proporcionar energía asequible para el desarrollo económico; 2) lograr la seguridad energética; y 3) evitar el cambio climático destructivo causado por el calentamiento global. Sin embargo, No hay una forma factible de evitar el uso de combustibles fósiles durante el resto de este siglo si queremos tener la energía necesaria para la prosperidad económica y evitar los déficit de energía que podrían generar conflictos.

30 En su mayor parte es indiscutible por los científicos que un aumento en la cantidad de los llamados gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (el metano y el vapor de agua son los otros gases de efecto invernadero principales) aumentará la temperatura promedio del planeta.

35 También está claro que no hay una solución que solo reduzca las contribuciones humanas en curso a las emisiones de dióxido de carbono que pueden eliminar con éxito el riesgo del cambio climático. Eliminar CO₂ adicional de la atmósfera también es necesario. Con la extracción de aire y la capacidad de aumentar o disminuir la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, uno puede compensar en principio otros gases de efecto invernadero como el metano (tanto de origen natural como de la actividad humana) que puede aumentar sus concentraciones y causar el cambio climático.

40 Hasta los recientes inventos del presente solicitante, fue una creencia generalmente aceptada entre los expertos en el campo que no era factible capturar dióxido de carbono directamente de la atmósfera debido a la baja concentración de ese compuesto. Posteriormente se demostró por la solicitud anterior pendiente que en realidad era práctico y eficiente realizar tales reducciones de CO₂ en las condiciones especificadas.

45 Se demostró que en condiciones ambientales el CO₂ puede extraerse eficientemente del aire utilizando un sistema sorbente regenerable adecuado y un proceso de decapado o regeneración a baja temperatura.

El documento US 2011/296872 A1 describe un sistema de este tipo.

50 Sumario de la presente invención

La presente invención proporciona sistemas y métodos nuevos y útiles para eliminar el dióxido de carbono de una masa de aire cargado de dióxido de carbono.

55 Esta invención ahora se ha mejorado además al descubrir que el mismo sistema de baja temperatura también se puede aplicar a la captura de CO₂ de una mezcla de gases que tienen una mayor concentración de dióxido de carbono mediante la mezcla de aire con gases derivados de los humos que contienen CO₂ relativamente concentrado diluidos con una cantidad predominante de aire ambiental; como otra sorpresa, esto mejora aún más la eficiencia. Esto puede resultar en un evento de sistema negativo de CO₂ para las fuentes de otra manera "sucias" tales como plantas de energía, refinerías o plantas de fabricación de cemento. En tales circunstancias, por lo general es preferible tratar previamente el gas de combustión para eliminar partículas y ciertos compuestos destructivos, tales como azufre y compuestos de óxido de nitrógeno, antes de entrar en contacto con el sorbente de dióxido de carbono, por ejemplo cuando el gas deriva de la quema de carbón.

65 En general, con la extracción directamente de la atmósfera y la capacidad de aumentar la concentración de dióxido de carbono en el aire ambiental que se está tratando, mezclando con una mezcla de gas de alto contenido de CO₂,

tales como los gases originados en la combustión, se pueden reducir las concentraciones de CO₂ previamente existentes, en la atmósfera, proporcionando así un proceso negativo de carbono combinado y compensar otros gases de efecto invernadero, tales como el metano, añadiéndose a la atmósfera que de otra manera puede aumentar sus concentraciones. Ahora es posible por lo tanto reducir, o incluso revertir, el cambio climático.

5 En el trabajo anterior de los presentes inventores, se dieron cuenta de que se podría lograr un sistema altamente eficiente para eliminar CO₂ de la concentración relativamente baja en el aire ambiental sin requerir un uso significativo de energía para regenerar el sorbente cargado con CO₂, utilizando vapor de proceso saturado. Ahora se ha descubierto que se obtiene un resultado mejorado utilizando una matriz del sustrato relativamente fino, de gran superficie, monolítico, poroso, como el soporte para los sitios absorbentes activos, en tándem entre sí. Para tal sistema, se pueden mezclar cantidades sustanciales de gases originados en el humo con el aire ambiental, para aumentar la concentración de CO₂ en el aire que se va a tratar, en un orden de magnitud, y posiblemente incluso más, sin dejar de mejorar la eficiencia a baja temperatura alcanzada anteriormente para el aire ambiental solo, variando las condiciones y funcionando en tándem con otro sistema monolito.

15 En tal sistema mejorado, los pares en tándem se escalonan de manera tal que cuando uno de los pares se está completando regenerarse en su caja de regeneración, el segundo miembro acaba de entrar en su caja de regeneración. La segunda caja de regeneración está sellada, como se describe en la solicitud de copendiente y de nuevo a continuación, y la atmósfera atrapada se agota desde el segundo cuadro de regeneración, por debajo de 0,4BarA y preferentemente por debajo de 0,3BarA y de manera óptima hasta entre 0,1 y 0,2 BarA. La primera caja de regeneración, que también había tenido su aire agotado, se ha regenerado con vapor saturado, cuyo condensado dentro de los poros del monolito tal como el CO₂ se despojó del sorbente. Cuando la regeneración había alcanzado su punto final deseado, el monolito contenía agua caliente condensada y la atmósfera circundante en la caja sellada, que contenía algo de vapor y CO restante, se había aumentado a al menos aproximadamente 0,7 BarA. Los interiores de las dos cajas de regeneración en tándem se interconectan, para que haya un cambio agudo rápido en las presiones hacia la igualdad; el agua caliente condensada en el primer monolito se vaporiza a la presión más baja y cuando el vapor encuentra el segundo monolito, que se calienta y se libera algo de CO₂, mientras que el vapor se condensa en el segundo monolito; de esta manera enfriando rápidamente el primer monolito y lo prepara para que salga de la primera caja y entre en contacto con la mezcla de gases cargados con CO₂. Esta función en tándem continúa para todos los miembros de la matriz con el fin de lograr un tratamiento sustancialmente continuo de la mezcla de gases cargados con CO₂ y se repite continuamente.

20 Debe entenderse que un 'sustrato poroso' es uno que tiene poros abiertos, donde un gas o vapor puede entrar en un poro en la superficie frontal y salir de la superficie trasera, de modo que el gas o vapor pueda pasar completamente a través del espesor del sustrato a través de los poros abiertos. El espesor del monolito es preferentemente al menos un orden de magnitud menor que cualquiera de las dimensiones de la superficie del monolito transversalmente a la dirección de flujo de la mezcla de gases cargados con CO₂ a tratar.

25 La frase "aire ambiental", tal como se usa en la presente memoria descriptiva, significa e incluye aire no cerrado bajo las condiciones y concentraciones de materiales presentes en la atmósfera en una ubicación geográfica particular. La frase "gases originados por el humo" se refiere a los gases que contienen una alta concentración de CO₂ y que salen de la combustión de materiales que contienen carbono, tales como los denominados combustibles fósiles, incluyendo los gases que pueden haber sido tratados previamente después del escape del punto de combustión.

30 Se ha descubierto que este proceso es exitoso con casi cualquier mezcla con aire ambiental que comprende al menos una cantidad predominante de aire ambiental, en volumen, para diluir los gases originados en la combustión. Los gases originados en la combustión aumentarán considerablemente la concentración de CO₂ en la mezcla, en comparación con el aire ambiental y están completamente mezclados con el aire por un sistema, por ejemplo, como se muestra en las Figuras 25 y 26 de la solicitud anterior en tramitación, para formar una mezcla de gases sustancialmente uniforme de alto contenido de CO₂.

35 La mezcla de gas cargada con CO₂, a temperatura ambiente, se trata dirigiéndola a través de una estructura sorbente que comprende un monolito relativamente fino, de alta superficie, poroso, que soporta sitios sorbentes de CO₂ activos, que puede unir (capturar) CO₂ y después regenerando el sorbente provocando la liberación del CO₂ sorbente del sorbente, tratando la estructura sorbente con vapor de proceso a baja temperatura, preferentemente saturado, a una temperatura no superior a aproximadamente 120 °C y retirando el CO₂ liberado (de esta manera regenerando efectivamente la estructura sorbente) y obteniendo CO₂ de alta calidad. El sorbente preferentemente absorbe exotérmicamente el CO₂ lo que permite la eliminación a temperatura relativamente baja del CO₂ del sorbente.

40 En esta solicitud, la estructura del sustrato comprende preferentemente una amina que se une al CO₂ y que es portada por la estructura del sustrato. El sorbente se mantendrá preferentemente en las superficies del sustrato, incluyendo las superficies dentro de los poros. Anteriormente se pensaba que cuando la concentración de dióxido de carbono estaba muy por encima de la del aire ambiental, la temperatura del sorbente de CO₂ sería demasiado alta debido al calor exotérmico de la adsorción del CO₂, lo que elevaría la temperatura del monolito. Se sabe que la eficacia del sorbente, en presencia de aire, se degradaría, a temperaturas tan altas. Se esperaba que la eficacia para la captura de CO₂, disminuiría y requeriría una temperatura más alta para regenerar el sorbente.

Se sabe que la fracción capturada por adsorción depende de la temperatura del sorbente exotérmico, de una manera dada por su isoterma Langmuir; para los sorbentes de aminas primarias disponibles. La isoterma es exponencial con la temperatura, debido al alto calor de reacción del adsorbente con el CO₂, es decir, aproximadamente 84 kJ/mol. Por ejemplo, un aumento de temperatura de 25 °C a 35 °C reduce el porcentaje de sitios de aminas que pueden capturar CO₂, en equilibrio, en aproximadamente e⁻¹. Como resultado, la temperatura ambiente en clima frío, es decir, invierno en las latitudes medias o altas o elevaciones, reduce este problema, o permite que se trate una mayor concentración de CO₂. Por ejemplo, si la temperatura ambiente es de 15 °C, un aumento de 10 °C produciría el mismo rendimiento que la ubicación ambiental del caso de 25 °C al tratar una concentración más baja de CO₂. La isoterma de Langmuir para una amina primaria es cercana a la óptima a aproximadamente 15 °C en términos de la fracción de sitios de aminas en equilibrio y el calor sensible necesario para extraer y recoger CO₂ del sorbente, para regenerar eficazmente el sorbente a aproximadamente 100 °C. Un diseño conceptual se muestra en la Figura 27 de la solicitud de copendiente anterior, donde el gas efluente se mezcla completamente con el aire a través de un aparato adecuado, y se analiza el aumento de temperatura.

Una realización particularmente eficiente de esta invención se logra si se integra en un proceso generador de CO₂, tal como una planta de energía, que incluye un proceso de tratamiento de la técnica anterior, que al menos elimina partículas y venenos del sorbente, tales como los óxidos de azufre y nitrógeno. En general, la mayoría de las plantas que queman carbón en América del Norte o Europa proporcionan un tratamiento posterior a la combustión utilizando un proceso generalmente denominado tecnologías CSS. Uno de estos procesos generalmente utilizado es el denominado "proceso MEA posterior a la combustión", según lo practicado por el Costain Group PLC, de Inglaterra, y como se muestra esquemáticamente en la Figura 3, mostrando su uso en una central eléctrica de carbón, y su efluente tratado pasa al proceso de la presente invención. El efluente del Proceso CSS, que está libre de partículas y los venenos habituales del sorbente utilizado en el proceso de la presente invención, se mezcla con aire ambiental para tratarlo con el presente proceso para capturar el CO₂ combinado. El coste en aumento por tonelada de eliminación de CO₂ por el Proceso CSS aumenta de forma aguda a medida que uno aumenta el porcentaje de CO₂ retirado de la mezcla de gases y se vuelve muy costoso a medida que uno va del 90 % al 95 % de eliminación. Por otro lado, a medida que se reduce el porcentaje capturado por el Proceso CSS, solo, a menudo se vuelve costoso porque la multa por el CO₂ no capturado aumenta en situaciones donde las emisiones de CO₂ están reguladas, reduciendo así el valor de todo el proceso. Por estas razones, la diana del CSS suele ser del 90 %.

Por otro lado, los costes por unidad de cantidad de CO₂ puro capturado por el proceso de la presente invención se reducen a medida que el porcentaje de CO₂ en la corriente de proceso que entra al proceso de la presente invención aumenta; esto es especialmente eficaz cuando se combina con el efluente de un Proceso CSS tal, u otro tratamiento previo de gases de combustión. A medida que la concentración de CO₂ en la corriente de suministro aumenta, sin embargo, el proceso de la presente invención debe proporcionar los medios de enfriamiento necesarios para asegurar que el aumento de temperatura de la captura exotérmica del CO₂ mezclado no provoque la degradación de la eficacia del sorbente. Por lo tanto, existe la oportunidad de optimizar el coste por tonelada de CO₂ capturado calibrando el efecto relativo de la combinación del Proceso CSS y la presente invención al reducir el porcentaje de CO₂ eliminado en la etapa CSS - es decir si uno retrocede al 80 % de eliminación de CO₂ en el Proceso CSS de la técnica anterior y mezclando el efluente CSS de contenido de CO₂ relativamente alto restante (que contiene, por ejemplo, 2 % de CO₂) con aire ambiental. En este caso, por cada 1 % de esa corriente de efluente CSS mezclada con el aire, se aumentaría aproximadamente en un 50 % la concentración de CO₂ en la mezcla de gas de suministro en el proceso de la presente invención.

Pueden determinarse los aumentos de temperatura asociados, porque el aumento de temperatura depende de la tasa de adsorción de CO₂ y por lo tanto la concentración de CO₂ en la corriente de suministro del proceso mixto. Si se mezcla en el 5 % del efluente CSS, se reducirían los costes de capital para el proceso de la presente invención en un factor de 3 (debido a que la concentración es tres (3) veces mayor en la corriente mixta que en el aire solo) sobre un proceso independiente de captura de aire ambiental puro. El aumento de temperatura para ese caso es cercano al aumento cuando se mezcla la versión de flujo de gas de combustión completa del carburador, o aproximadamente 3,5 °C. De manera más importante, si el proceso de captura de aire de la presente invención se ajustara para eliminar solo el 70 % del CO₂ de la corriente mixta, los procesos combinados eliminarían más del 100 % del CO₂ emitido por la central eléctrica. Por lo tanto, produciría energía eléctrica u otro producto sin carbono de carbono negativo, habiendo utilizado la quema de combustibles fósiles como fuente de energía. En la eliminación del 75-80 % del CO₂, usando el proceso de la presente invención, a partir de los gases mezclados, el resultado sería un proceso de generación de energía de carbono negativo.

Además de lograr beneficios directos al reducir el costo por tonelada de CO₂ recogido, al tener cada proceso optimizando el costo del otro, también hay otros beneficios de la integración de procesos. Estos beneficios incluyen que la corriente de escape del procesamiento de gases de combustión está limpia, eliminando ese problema/coste para la etapa de mezcla, y un uso más eficiente y económico de la energía. Hay muchos tipos diferentes de procesos de eliminación de CO₂ pre-combustión y post-combustión que se están llevando a cabo, distintos del Proceso CSS, y otros nuevos podrían surgir en el futuro. Los detalles de la cantidad mezclada del aire ambiental y el efluente de CSS, y el posible procesamiento adicional de los gases de escape del proceso de gases de combustión de la primera fase, variará en detalle pero las ventajas básicas del proceso combinado son cualitativamente las mismas.

Para permitir la captura de una mayor concentración de CO₂, el presente avance se basa en el descubrimiento de que permitir que el vapor condensado, como el agua, permanezca en los poros del monolito después de completar la extracción del CO₂, la rápida evaporación de una porción del líquido condensado caliente es una herramienta altamente útil para enfriar rápidamente el monolito. El monolito enfriado despojado se devuelve a la estación de captura de CO₂ y para una etapa de absorción adicional, conservando el calor precalentando el sorbente cargado con CO₂ de forma preliminar al desprendimiento. El monolito y el sorbente de otra manera se calentarían de manera indeseable durante la etapa de sorción y, por lo tanto, serían más susceptibles a la degradación cuando se exponen al aire cargado con CO₂. Este efecto se logra más fácilmente en un monolito que tiene un espesor o longitud en la dirección del flujo de aire entrante, preferentemente de no más del 10 % de la otra dimensión más grande del monolito, por ejemplo, un espesor de quince (15) centímetros y una longitud o anchura de al menos dos (2) metros, por 0,5 metros, es decir, un área superficial, transversal al flujo de aire, de al menos 1 metro cuadrado.

La velocidad de enfriamiento del sustrato regenerado también se puede mejorar bombeando la presión de la caja de regeneración hacia abajo, por ejemplo, preferentemente a menos de 0,3 BarA, y lo más preferentemente entre 0,1 y 0,2 BarA, para eliminar la mayor parte del aire antes de iniciar el flujo de vapor de proceso a través del sustrato. Esto también mejorará la eficiencia de la eliminación de CO de alta pureza₂ eliminando la mayoría de los gases no condensables antes del desprendimiento del CO₂.

En uno de sus aspectos básicos, esta invención proporciona estructuras y técnicas adicionales para capturar dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono, y usar el calor del proceso para separar el dióxido de carbono de un sorbente y regenerar el sorbente.

Además, en otro de sus aspectos, esta invención proporciona algunas estructuras y técnicas adicionales que permiten la captura eficiente de dióxido de carbono de concentraciones más altas de dióxido de carbono en el aire, sin perder el uso de calor de proceso a baja temperatura para separar el dióxido de carbono del sorbente y regenerar el sorbente. Esta invención permite además la captura, por sorción, de dióxido de carbono de mezclas de aire con gases de combustión y la separación y regeneración. Esto permite que un sistema primario de generación de CO₂ se vuelva CO₂ negativo neto, y así reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera.

Además, esta invención proporciona un costo relativamente bajo y una fuente de CO₂ relativamente pura para usos tan beneficiosos como alimentar granjas de algas para la producción de biocombustibles, donde los costes de captura representan el coste total del suministro de CO₂.

En otra realización, destinado a mejorar adicionalmente el rendimiento y la eficiencia del sistema, la caja de la cámara de regeneración se construye de manera que la pared posterior (el lado de colección de gas opuesto al lado de inyección de vapor) de la Caja de regeneración 3051 actúe como un condensador de cualquier vapor que pase a través del monolito en forma de vapor. Si la pared se enfría haciendo circular agua o tiene suficiente masa térmica para eliminar el calor, y luego enfriarla con aire, entonces el vapor se condensará en la superficie fría, formando agua, transfiriendo su calor latente a la pared. Se logran ahorros adicionales al eliminar un intercambiador de calor adicional. Si la pared posterior se mantiene a 40 °C o menos, enfriando su masa térmica, entonces la pared posterior funcionará como una bomba, reduciendo la temperatura en la caja de regeneración cerrada. La superficie interior de la pared posterior puede estar provista de costillas inclinadas hacia abajo, para dirigir el agua condensada a los bordes laterales de la caja, para evitar una gran acumulación de agua condensada en la pared posterior; tal acumulación ralentizaría el enfriamiento. Dicho sistema proporciona una manera eficiente de enfriar los monolitos por las siguientes razones: 1) se puede hacer rápidamente; 2) no se requiere un gasto de capital adicional para el condensador separado; y 3) no hay necesidad de bombear vapor de agua para enfriamiento por evaporación, ahorrando mucha energía.

Aunque los procesos de la presente invención se utilizan mejor en climas más fríos, para optimizar la regeneración efectiva del sorbente, limitando cualquier pérdida potencial de eficacia, la dificultad es que en los climas más fríos, es decir, en las latitudes más altas, hay muy pocas instalaciones de plantas preexistentes a las que puede unirse el proceso de captura de CO₂. Se ha dado cuenta ahora, sin embargo, que debido a las mayores eficiencias en dichos lugares existe una base para proporcionar una planta independiente donde no hay otras instalaciones para proporcionar una concentración mejorada de CO₂ o para proporcionar el calor de proceso necesario. Un sistema, de acuerdo con esta realización, proporciona una unidad independiente que no tiene acceso al calor del proceso externo ni a la electricidad y existe en un clima más frío con temperaturas extremadamente bajas tales como la región ártica. Cuanto más baja sea la temperatura, sustancialmente sin límites, resultará en un sistema operativo más eficiente. Como el sistema está totalmente contenido, incluso las condiciones en un área tal como en el Ártico, susceptibles al frío extremo y la precipitación congelada, no deben interferir con el funcionamiento de este sistema. Esto será especialmente cierto cuando el sistema esté funcionando adyacente a o cerca de una tubería de larga distancia que transporta, por ejemplo, aceite bruto o gas natural procedente de, por ejemplo, el lejano norte, a aquellas áreas de la habitación humana donde generalmente sería más útil.

De acuerdo con una realización de la presente invención, un sistema que incluye un generador de calor tal como una caldera está conectado a un generador eléctrico para hacer funcionar los sistemas auxiliares necesarios, por ejemplo, un sistema de elevador, los dispositivos de control necesarios, válvulas y bombas de compresor, para el CO₂ altamente puro. El calor a alta temperatura se utiliza para generar vapor a alta presión para hacer funcionar los generadores

eléctricos y el escape de los gases de combustión se utiliza mediante la mezcla con aire ambiental para proceder de acuerdo con el sistema descrito anteriormente. De esta manera, El calor y otras energías se proporcionan para hacer funcionar el sistema y, sin costo adicional, el aire ambiental se enriquece aún más con CO₂, para permitir una captura más eficiente del CO₂ combinado. Dicho sistema puede ser casi neutral en cuanto a ingresos (pero casi siempre CO₂ negativo) incluso cuando hay costes de energía, siempre que exista un mercado o un uso para el CO₂ puro que se genera. Por ejemplo, en la circunstancia de una tubería de larga distancia, el CO₂ purificado puede almacenarse al menos parcialmente adyacente a la tubería. En caso de incendio o fuga accidental, El CO₂ puede usarse para apagar la mayoría de las llamas que pueden estallar.

Se observa que puede haber situaciones en donde el valor del CO purificado de hecho, es mayor que el coste del combustible para la generación de electricidad en un lugar en particular. En esa circunstancia, por ejemplo, inmediatamente adyacente a una tubería o un pozo de gas natural de alta latitud, cuanto más energía se utiliza y más gas de combustión se genera, mayor será el valor del proceso final para la generación del dióxido de carbono puro. En este caso, la mayor sorpresa ocurre cuando es más valioso usar tanta energía como sea posible y, por lo tanto, generar más CO₂, en lugar de ahorrar energía en lo que sería una situación más común. Es poco probable que tal situación exista alguna vez fuera de la latitud más alta, pero, en ese caso (como los inviernos en latitudes medias), esta realización sería de gran utilidad.

El sustrato para el sorbente puede ser un monolito, formado, por ejemplo, por un material de sílice, tal como cordierita, o una estructura de alúmina, o de un material polimérico que tiene sitios de adsorción intrínsecos, tales como un polímero que tiene grupos laterales de amina primaria. En general, se espera que el monolito de cordierita requiera más calor que el sustrato de alúmina. En la situación donde el CO₂ tiene el valor mejorado, entonces se obtendría un mayor beneficio.

En funcionamiento, un sistema que incorpore este proceso mejorado de energía utilizará una fuente de calor de alta temperatura y una micro turbina para generar la electricidad necesaria. El calor de baja temperatura descargado de la turbina se utilizará para regenerar el sorbente de CO₂. El material de suministro al sorbente de CO₂ comprendería una mezcla de aire ambiental más el escape de la fuente de calor. Cuando la fuente de calor es el gas natural, puede haber muy poca necesidad de tratar previamente el escape antes de introducirlo en el adsorbente. Sin embargo, si se utiliza carbón o aceite de combustible, sería necesario algún tratamiento previo de mitigación inicial para eliminar el material particulado, que de otro modo obstruiría los poros del sustrato, así como para eliminar ciertos subproductos como el azufre y el óxido nitroso, que de otra manera podría envenenar al sorbente.

Al computar la rentabilidad de cualquier sistema de esta invención, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones, donde

CE/T es igual al coste de energía por tonelada de CO₂

CE/MMBTU es igual al coste de energía por millón de BTU, es decir, $1,055 \times 10^9$ julios $\times \frac{1}{CE}$

E/T es igual a la energía necesaria por tonelada de CO₂, medida en MMBTU

CO₂/MMBTU es igual a la cantidad de CO₂ emitido por millón de BTU.

REV es igual a los ingresos por tonelada de CO₂

Al computar los costes de funcionamiento del sistema, los costes de capital de la caldera y la generación eléctrica se ignorarán y se asumirá que no hay gastos de capital adicionales para el combustible CO₂ generado, solo el coste del combustible. Suponiendo que el caso de que SH/HR es igual a 1,2, que se traduce en E/T es igual a 4 MMBTU y REV es igual a \$ 40,00 por tonelada de gas natural, CE / MMBTU es igual a \$ 3,00; CO₂/MMBTU es igual a 53 kg, de modo que CE / T es igual a 4 x 3 menos 40 x 4 x 0,053 es igual a \$ 3,50 por tonelada.

Para el carbón, por otro lado, el coste de energía por millón de BTU es altamente variable pero se puede suponer igual a \$ 2,50; El CO₂/MMBTU es igual a, 092 de nuevo, de modo que la CE / T es igual a 4 x \$ 2,50 menos 40 x 4 x 0,092 es igual a \$ 7,60 por tonelada. De forma interesante, El coste de la electricidad sería igual al porcentaje de CO₂ añadido de la combustión, es decir, 21 % en el caso del gas natural y 37 % en el caso del carbón.

Además, para ubicaciones remotas para EOR y mercados de gas comercial, los ingresos deben ser mucho mayores que \$ 40,00 por tonelada, de este modo, se reduce aún más el coste neto de la energía suministrada, asumiendo que el coste marginal para producir el CO adicional₂ es bajo. Utilizando la energía de alta temperatura para producir electricidad y el calor de proceso para eliminar CO₂ del sorbente, la economía se vuelve extremadamente favorable.

Estas y otras características de esta invención se describen en, o son evidentes a partir de, la siguiente descripción detallada y los dibujos adjuntos.

Breve descripción de las figuras y tablas

La Figura 1 es un diagrama de bloques de un sistema para eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera de acuerdo con una realización a modo de ejemplo de esta invención;

La Figura 2 es un mapa que ilustra un sistema global de unidades múltiples, adecuado para actuar como un sistema global de modificación del clima, según una realización a modo de ejemplo de la presente invención;

5 La Figura 3 es una ilustración esquemática de un sistema de tratamiento previo de la técnica anterior para gases de combustión, y conectado a este sistema de esta invención;

10 La Figura 4 ilustran esquemáticamente la versión tándem preferida de un sistema y técnica para eliminar el dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono y regenerar el sorbente que absorbe o se une al dióxido de carbono, de acuerdo con los principios de la presente invención; donde el Tiempo de absorción es aproximadamente igual al Tiempo de regeneración para lograr la mayor eficiencia;

15 La Figura 5 es una ilustración esquemática de una versión vertical de un medio monolítico para eliminar el dióxido de carbono de una atmósfera y para eliminar el dióxido de carbono del medio, utilizando un sistema de movimiento vertical o elevador para mover el monolito entre la posición de contacto de aire superior y la posición de regeneración inferior, donde el movimiento del aire es ayudado por un soplador mecánico;

La Figura 6 es una ilustración esquemática de una versión vertical de un medio monolítico para eliminar el dióxido de carbono de una atmósfera y para eliminar el dióxido de carbono del medio, utilizando una pista horizontal; y

20 La Figura 7 muestra esquemáticamente una vista lateral recortada de una de las estructuras de elevador de sistemas en tándem de la FIG. 4, mostrando el monolito en la cámara de regeneración.

25 La Figura 8 es una ilustración esquemática de un sistema de eliminación de dióxido de carbono, originalmente mostrado en la solicitud previa N.º 13/098.370, que muestra uno de los pares en tándem agregados de estructuras de eliminación de dióxido de carbono que forman parte de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

Descripción de antecedentes del sistema y conceptos del método de la solicitud de número de serie 13/098370

30 - Siguiendo el sistema mostrado en la solicitud copendiente (publicación de patente de EE.UU. 2011/0296872), se ha encontrado que las siguientes realizaciones preferidas de la presente invención permiten el tratamiento de mezclas de gases de CO₂ más altamente concentradas. Siguiendo el proceso descrito en el presente documento, asegurando que el sustrato cumple con los requisitos establecidos en esta descripción, una mezcla de CO₂ concentrada puede tratarse de forma exitosa, eficientemente y a bajo coste, para que no solamente los gases de efecto invernadero de, por ejemplo, una central eléctrica, se eliminen completamente de la atmósfera, pero el presente proceso resultará en un efecto neto negativo de carbono, retirando más CO₂ de la atmósfera que las emisiones de la planta, lo que resulta en una reducción general de CO₂ en la atmósfera.

40 El aire cargado con CO₂ se pasa a través de la estructura sorbente, la cual, preferentemente, tiene una forma tal que la dimensión en la dirección del flujo de aire es mucho más pequeña, por ejemplo, al menos uno y preferentemente al menos dos órdenes de magnitud más pequeña que las otras dos dimensiones que definen las superficies que se enfrentan en la trayectoria del flujo de aire. Los sitios de unión de CO₂ en las superficies de la estructura del sustrato, por ejemplo, sitios de aminas primarias, debe poder unir espontáneamente el CO₂, lo que significa por lo general que es una reacción exotérmica en condiciones ambientales, hasta que la estructura sorbente alcance casi el nivel de saturación; esto puede determinarse, por ejemplo, midiendo la concentración de CO₂ del aire que sale de la estructura sorbente, conocido como la cantidad de avance.

50 Cuando se alcanza la cantidad de avance deseada de CO₂, la estructura sorbente se elimina de la corriente de aire cargada de dióxido de carbono y se aísla de la atmósfera, en una cámara de regeneración sellada, y el CO₂ se quita y se regenera la estructura sorbente, de la manera que se describe más adelante, al estar expuesto al calor del proceso en forma de baja temperatura, el vapor saturado (a presión ambiente) pasó a través de la estructura del sorbente. El vapor inicialmente se condensará y transferirá su calor latente de condensación a la estructura sorbente, calentando la estructura hasta alcanzar la temperatura a la cual el CO₂ se elimina de los sitios adsorbentes y se expulsa de la estructura del sustrato por el vapor, a medida que pasa desde y a través de la parte frontal de la estructura absorbente hasta que toda la estructura absorbente alcance una temperatura de saturación elevada uniforme. A medida que el vapor entra en contacto y calienta el sorbente, se condensa en el monolito, por cada aproximadamente dos (2) moles de vapor que se condensa, proporciona el calor latente necesario para liberar, o eliminar, un (1) mol de CO₂ del sorbente de amina primaria y expulsar el CO₂ de la estructura sorbente; también se puede usar un extractor de aire/bomba para recolectar y eliminar el CO₂ desde la cámara de regeneración, conforme se desprende el CO₂. Esta técnica se conoce como "extracción con vapor" y también se describe más adelante. Por razones de eficiencia energética y coste, es deseable minimizar la cantidad de vapor usado y que se mezcla con el CO₂ efluente, y para recuperar el condensado caliente para recalentarlo al vapor. Por consiguiente, lo que sea (o pueda ser) condensado, al salir de la cámara de regeneración, el condensado puede añadirse al generado en la cámara de regeneración y reciclarse para calentarlo y convertirlo nuevamente en vapor para su uso posterior.

65 El proceso de desmonte por lo general terminará al inicio del avance de vapor, cuando la cantidad de vapor no

condensado que emerge del extremo trasero de la estructura del sorbente se hace grande en comparación con el CO₂ desprendido recientemente. Las condiciones exactas para terminar la inyección de vapor nuevo se determinarán mediante el equilibrio del aumento de la fracción de CO₂ eliminado con el aumento del costo de la energía a medida que el proceso de vapor se vuelve menos eficiente en términos de la relación de CO₂ liberado por cantidad de vapor utilizado. Esa energía necesita ser reemplazada cuando el vapor y el condensado se recalientan para el siguiente ciclo de extracción, es decir, el requerimiento energético para mantener la igualdad del tiempo de captura de CO₂ y el tiempo de arranque y enfriamiento de CO₂.

El Sistema

Al diseñar la estructura del sistema que incorpora la presente invención a comercializar, se deben considerar los siguientes parámetros de diseño. En general, a medida que aumenta la carga de los sitios absorbentes en el sustrato, también se desea una alta eficiencia de la amina según lo definido por la fracción de sitios de amina presentes que están disponibles para unirse al CO₂. Esta es la razón para preferir las aminas primarias y también para ajustar la carga a fin de minimizar el bloqueo de los poros por el exceso de sorbente. Los resultados experimentales indican que la carga óptima que equilibra la eficiencia de la amina con la carga incrementada es de entre el 40-60 % en volumen del contenido de amina orgánica en relación con el sustrato/esqueleto poroso al que está unida o sobre qué superficie de poro se deposita. Esto puede ser determinado por el siguiente cálculo, donde:

Pcm = Densidad del material del esqueleto (por ejemplo, sílice o alúmina), en kg/metro cúbico
 PORc = Porosidad, la relación entre el área de la pared abierta y el área de la superficie total perpendicular a la dirección del flujo de aire
 PUR = Ratio de CO₂ liberado al aire atrapado, pureza de CO₂,
 RH = calor de reacción;
 SH/RH = Relación de calor sensible a calor de reacción RH durante la regeneración
 Savc = Área de superficie por volumen del esqueleto, en 1/metros cuadrados de superficie/metros cúbicos
 SH = calor sensible
 TA = Tiempo para llenar hasta saturación con CO₂, tiempo de adsorción,
 TS = Tiempo de regeneración utilizando la extracción por vapor,
 w = espesor de la pared del poro del esqueleto
 d = tamaño medio de poro/canal

Estos son parámetros de diseño importantes a considerar en el diseño de este proceso. En este modelo, para facilitar el cálculo, PORc es igual a la relación entre el área de canal abierto promedio y el área promedio total, ignorando la naturaleza tortuosa de las curvas en los canales de las paredes del medio poroso. Por consiguiente, $PORc = d^2/(d + w)^2$. El área de superficie por volumen viene dada por $Savc = 4 d/(d + w)^2 = 4 PORc/d$. La caída de presión depende del tamaño de las aberturas en el canal, la fracción vacía del monolito, la longitud y velocidad del flujo de aire a través de los poros.

Estructura sorbente y funcionamiento general del sorbente

Un ejemplo de un tipo de sustrato que se puede usar es un monolito de sílice, producido por Corning, bajo la marca registrada CELCOR.RTM. Ese monolito se puede utilizar como soporte para una estructura sorbente, de acuerdo con los principios de la presente invención. El sorbente (por ejemplo, una amina primaria, tal como) es transportada por (por ejemplo, recubierta o inmovilizada de otra manera) en el interior de uno o más de los CELCOR.RTM. sustratos cerámicos celulares, lo que proporciona una alta área de superficie y baja caída de presión, conforme el aire cargado con CO₂ fluye a través del sustrato. La estructura monolítica sorbente puede comprender, por ejemplo, una pluralidad de la CELCOR.RTM. celular, sustratos cerámicos, apilados como ladrillos, o un solo sustrato monolítico, descritos, por ejemplo, en relación con las solicitudes en tramitación. Otros ejemplos incluyen el sustrato y el sorbente descritos en la solicitud publicada US2011/0179948, o como se describe en un artículo de revista de Choi et al., Amine- Tethered Solid Adsorbents Coupling High Adsorption Capacity and Regenerability for CO₂ Capture From Ambient Air, por Sunho Choi et al, CHEMSUSCHEM 2011, 4, 628 - 635 (2011 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim).

El aire cargado de CO₂ se dirige a través de los poros de la estructura sorbente. También se contempla que la estructura sorbente pueda formarse incrustando el material sorbente en un, por ejemplo, revestimiento de alúmina en las paredes de la estructura cerámica celular CELCOR.RTM. para formar una estructura sorbente monolítica.

También se observa que una estructura aún más preferida está formada por ladrillos de alúmina porosa, en lugar de la sílice de cordierita. Aunque la estructura de alúmina no es física y/o térmicamente tan robusta como la estructura de sílice, las condiciones menos rigurosas cumplidas en este proceso de captura de temperatura ambiente y el proceso de extracción de temperatura relativamente baja, permiten el uso de la estructura menos robusta. Además, cabe señalar que el sustrato, además de las estructuras cerámicas anteriores de materiales inorgánicos, la estructura sorbente puede ser un material orgánico tal como se forma a partir de una poliamina polimerizada mediante la reticulación del polímero de amina para formar un polímero sólido, siendo el polímero sólido capaz de extruirse a una temperatura lo suficientemente baja como para que el polímero no se volatilice, ni ablandarse a la temperatura del vapor de desprendimiento, es decir, a hasta 120 °C, usado para la regeneración del sorbente.

ES 2 727 343 T3

En general, a medida que aumenta la carga, también se desea una alta eficiencia de la amina según lo definido por la fracción de sitios de amina presentes que están disponibles para unirse al CO₂. Esta es la razón para preferir las aminas primarias y también para ajustar la carga a fin de minimizar el bloqueo de los poros. Los resultados experimentales indican que la carga óptima que equilibra la eficiencia de la amina con la carga incrementada es de entre el 40-60 % en volumen del contenido de amina orgánica en relación con el sustrato/esqueleto poroso al que está unida o en cuyos poros se deposita.

Si N_s es el número de sitios de unión de CO₂ por metro cuadrado de superficie de poro, A_v es el número de Avogadro, y si la densidad del material de la estructura esquelética es P_{cm}, el esqueleto poroso tendrá una densidad P_c dada por P_c = (1-POR_c) P_{cm}; entonces la carga L en moles por kilogramo de estructura absorbente está dada por

$$L = N_s \text{Savc}/A_v P_c = 4 N_s \text{PORc}/A_v d P_{cm} (1-\text{PORc})$$

Si uno resuelve la expresión anterior para POR_c, uno encuentra

$$L = (4 N_s/A_v P_{cm}) (1/(2w + w^2/d))$$

Dado que es deseable maximizar la carga de CO₂ adsorbido por la estructura, los sorbentes de poliamina proporcionan los altos N_s deseados. En cualquier caso, el análisis anterior deja claro que es preferible tener paredes lo más finas posible, entre los poros/canales en el soporte poroso. La carga en moles/kg es de primer orden, Independiente del tamaño de los poros, con la disminución en Save, a medida que aumenta la porosidad al aumentar el tamaño de los poros, cancelado a primer orden por la disminución de 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 de cuarzo y sílice fundida) y convertir N_s a N_{sn}, que es el número de sitios de conexión por nanómetro cuadrado, donde w y d están en nanómetros, para encontrar: L = 1,33 (N_{sn}/w (1 + w²/d)) moles/kg, de la estructura del esqueleto. Para N_{sn} = 5 sitios por nanómetro cuadrado y w = 2 nanómetros, una porosidad de aproximadamente 0,5 da como resultado un área de superficie por gramo de 400 mm², o 160.000 mm² y L = 2,5 moles/kg de la estructura del esqueleto.

La capacidad de carga real de CO₂, como kg/m³ de entrada de aire, L_d/a, donde el grosor de la pared de soporte es W_e y la longitud (en la dirección del flujo de aire) del monolito es L_m viene dada por L_d/a = L (0,044) (P_{cm} (1-POR_c)) Savm W_c L_m, que sustituyendo a L,

$$L_d/a = (N_s \text{Savc}/A_v P_{cm} (1-\text{PORc})) \times (0,044) (P_{cm} (1-\text{PORc})) \times \text{Savm} \times W_e \times L_m;$$

$$L_d/a = N_s (0,044)/A_v (\text{SavexSavm} \times W_e \times L_m),$$

Sustituyendo por Save,

$$L_d/a = N_s (0,044)/A_v \times (\text{Savm} W_e L_m) \times (4/d (1 + w/d)^{sup.2}).$$

En un ejemplo, utilizando el monolito Corning de 230 celdas CELCOR, la longitud de flujo de poro L_m es 0,146 metros, el área superficial por volumen del monolito Savm es de aproximadamente 2000 m²/m³ y el grosor de la pared del poro del monolito W_m es 0,265 mm, determinado a partir de L_d/a = L (0,044 kg/mol) (P_c Savm 0,146 W_m), para una cantidad de CO₂ en kg/m² área de entrada de aire. Un criterio general de diseño es hacer que L y L_d/a sean lo más grandes posible, restringido por la restricción de caída de presión, es decir, limitado por la fuerza del viento y/o la serie de ventiladores, que se cumple en la primera realización de la presente invención usando resultados de modelado para el Savm del monolito de Corning de 230 células, y la longitud de poro, en la dirección del flujo de aire, de 0,146 m y una velocidad de flujo de aire de entrada de 2,5 m/s.

Las paredes del monolito deben tener el POR_c deseado y el número de sitios de unión para proporcionar un N_{sn} alto. W_m se determina en función de la optimización (minimización) de la caída de presión/Savm, lo que a su vez estará limitado por un límite de cuán pequeño puede hacer que W_m tenga una carga aceptable, basado en otras restricciones (ver abajo). Cabe señalar que L aumenta a medida que w disminuye, y d aumenta, pero L_d/a disminuye, con el aumento de tamaño de poro para un w fijo, Porque a medida que aumenta la porosidad el PC disminuye. 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 a continuación. Debe recordarse que el compuesto de amina se puede impregnar como un líquido en los poros del monolito, así como, o en lugar de, apoyándose en las paredes de la estructura porosa.

La captura de aire siguiendo la presente invención, es una condición relativamente suave. Esta característica de la presente invención permite el uso de una estructura mucho menos robusta para el monolito. En particular, esto permite el uso de paredes relativamente finas hechas de material con alta porosidad sobre las cuales se deposita el sorbente; Uno de estos materiales es la alúmina. Esto ahorrará en coste, utilizando materiales que generalmente son menos robustos y, por lo tanto, menos costosos de fabricar. Para evitar la degradación del sorbente, es necesario enfriar el monolito regenerado a menos de 70 °C antes de exponerlo al aire (oxígeno), durante la fase de sorción. El enfriamiento debe hacerse rápidamente para maximizar el tiempo en que el monolito está adsorbiendo CO₂. La gran cantidad de

calor (alrededor de 10^9 julios para el sistema actual (aproximadamente 2/3 tanto para el caso de alúmina) que se deben eliminar en poco tiempo, es decir, 10 a 20 segundos, en presencia de no condensables, es muy desafiante; como un reto adicional, la economía requiere evitar la necesidad de un condensador grande con flujo de agua rápido. Aunque esto podría compartirse con varias unidades, extendiendo su coste, tendría un impacto en los costes y no sería tan eficiente para la recuperación del calor. Además, la siguiente solución también tiene impactos positivos en el uso de vapor y agua y la pureza de CO_2 . Adicionalmente, este concepto funciona para sistemas sorbentes que actúan en tándem, cuando se utilizan mezclas de gas de mayor concentración, pero también se puede adaptar para los sistemas de sorción individuales que funcionan solo con aire ambiental.

En este sistema, como se muestra en la Figura 4, la caja sellada 3051 contiene una matriz de monolitos 3041 que acaba de completar la regeneración de vapor y captura de CO_2 y tiene una presión de vapor de aproximadamente 0,7 a 0,8 BarA, habiendo sido retirada la mayor parte del CO_2 a través de la línea 3021, cuya línea se ha cerrado. En ese momento, La caja 3052 contiene una matriz de monolitos 3042, que se ha disminuido (después de sorber CO_2 de la mezcla de aire) en la caja de regeneración 3052 y la caja 3052 se bombea hacia afuera para disminuir la presión en la Caja 3052 a 0,1 BarA, lo que permite una temperatura de vapor saturada de 45 °C. Al bajar la presión de la caja, el resultado final será mayor pureza del CO_2 despojado del sorbente regenerado debido a la cantidad de aire, por supuesto, es solo el 10 % de la atmósfera original de 1 BarA. El coste de bombear la caja de aire hasta la presión deseada cuando se usa electricidad es menos del 10 % del coste de mover el aire a una caída de presión de 100 pascales.

Se puede añadir una cantidad adicional de vapor a la caja 3051 para expulsar la mayor parte del CO restante.² en la caja usando la fuerza del vapor, lo que también obliga a que se acumule algo de condensado adicional en los poros del conjunto 3041 de monolitos. Cuando la caja 3051 está expuesta a la baja presión de la caja 3052, a través de la línea 3014, cualquier vapor y condensado caliente en la Caja 3051 se expandirá y se evaporará repentinamente, creando una ráfaga de vapor inicial en la caja 3052. La línea de salida 3014 de la Caja 3051 (cuando la Caja 3051 y la Caja 3052 alcanzan el equilibrio) se cierra y la caja 3052 se conecta al tubo de entrada del distribuidor de vapor 3012. Esta ráfaga de vapor de la caja 3051, añadiéndose a la caja 3052 se condensa en el conjunto de monolitos más frío en la caja 3052, elevando su temperatura. La ráfaga de vapor también sirve para enfriar rápidamente la matriz 3041 del monolito, a medida que el condensado se evapora y el vapor se expande. La velocidad de esta ráfaga de vapor inicial del agua que se evapora de la matriz de monolitos Box 3051 está diseñada para alcanzar una velocidad de al menos 10 veces más rápida que la velocidad del flujo de aire o 0,5 mps. Las dos cajas conectadas, Caja 3051 y Caja 3052, alcanzar un equilibrio a una temperatura inferior a $T_{\text{regen}} - T_{\text{aire}}/2$, Porque una porción del calor se eliminará por el CO_2 eliminado de la Caja 3052.

La conexión 3014 entre la Caja 3051 y la Caja 3052, cuando la temperatura más baja se alcanza en la Caja 3051, luego se cierra y el vapor de proceso se introduce a través de la línea 3012 en la Caja 3052 y se permite que la presión aumente a 0,7 - 0,8 BarA, el proceso de vapor quita el CO_2 de la matriz de monolitos 3042. El proceso de vapor calienta el conjunto de monolitos a la temperatura T_{regen} y, cuando la colecta de CO_2 cae a una tasa menor indica la finalización de la regeneración del sorbente en la Caja 3042. Después de la ráfaga de vapor inicial de la caja 3051, la presión más baja en la Caja 3051, que resultó de la evaporación del agua caliente condensada en el conjunto de monolitos 3041, también reduce rápidamente la temperatura del conjunto de monolitos 3041 a menos de 70 °C, que permite la introducción de aire para enfriar aún más la matriz de monolito 3041 hasta su temperatura de funcionamiento de adsorción, que es sustancialmente la temperatura ambiente. La matriz de monolitos enfriada 3041 se está elevando, ya que es refrigerado por aire, a la posición de adsorción, recibiendo aire cargado con CO_2 fresco o gases mixtos de alta concentración. Este ciclo se repite a la inversa, a medida que la matriz de monolitos 3042 se elimina completamente y la matriz de monolitos 3041 regresa de la zona de captura de aire a la caja sellada 3051.

Además del tiempo de enfriamiento muy reducido, Las ventajas en el uso del agua y el calor son claras, guardando ambos por al menos un factor de 2. Los sustratos proporcionan un disipador de calor muy bueno debido a su gran área de superficie y paredes de poros delgados. El dióxido de carbono concentrado y el vapor condensado en la caja 3052 de la caja 3051 se retiran de la caja 3052 a través de la línea 3022 a un recipiente de captura y la válvula en la línea 3022 se cierra y el vapor pasa a la caja 3052 desde la línea 3012.

Aunque la presente matriz monolítica a base de sílice, es decir, cordierita, tiene suficiente conductividad térmica, una matriz de monolito de alúmina tendrá una conductividad mejorada y, por lo tanto, resultará en un enfriamiento aún más rápido cuando se combina con la evaporación del agua condensada en la Caja 3051 y la condensación de la explosión de vapor en la Caja 3052. Se ha demostrado que el efecto del cambio de calor es de 10^9 julios, dando como resultado el enfriamiento de la matriz de monolitos 3041 en 10 segundos a una temperatura inferior a 70 °C. Este método evita cualquier costo adicional para un condensador separado enfriado por agua, y agua, por supuesto, más allá de lo utilizado para el proceso de vapor, es innecesario.

Es deseable minimizar tanto como sea posible el tiempo durante el cual no está ocurriendo adsorción de CO_2 , ya sea en la matriz monolítica 3041 o en la matriz monolítica 3042 de caja. Esto se logra al hacer funcionar dos conjuntos de matrices de monolitos en tándem, preferentemente de lado a lado, para que los ciclos de las dos cajas se puedan colocar en fase, de modo que cuando una se esté adsorbiendo, la otra se esté regenerando, para permitir que el enfriamiento de uno cree el calentamiento del otro, como se explicó anteriormente. Esto da como resultado el período

más corto durante el cual no se produce adsorción en ambas matrices de monolitos y, de hecho, los miembros de la pareja están limitados preferentemente a poco más de 10 segundos, por ciclo para el paso de enfriamiento. El tratamiento de la mezcla de gases de una concentración de CO₂ más alta puede ser más exitoso cuando este ciclo de doble tándem está en uso.

5 Como un ahorro adicional de energía y aparatos, tal como se muestra en la Figura 4, los pares en tándem pueden actuar como contrapesos de elevadores entre sí, reduciendo así las cantidades de energía necesarias para cada ciclo de subida y bajada, mientras que también reduce el número de sistemas de elevador, incluyendo motores y contrapesos, necesarios si se utilizara un sistema de contrapeso más convencional. Tal sistema, sin embargo, requiere una ecualización cuidadosa del tiempo necesario para cada uno de los ciclos de captura y desprendimiento, incluyendo el calentamiento y enfriamiento de la matriz de monolitos, y la captura y extracción del CO₂.

15 Se ha demostrado que los combustores de combustibles fósiles, especialmente instalaciones de co-generación de gas natural (Cogen), puede pretratarse eficazmente, pero mínimamente, para eliminar parte del CO₂ y cualquier impureza potencialmente bloqueante o venenosa, con respecto a la matriz de monolitos del proceso de esta invención. Posteriormente, el efluente de pretratamiento puede diluirse con aire ambiental y usarse como material de suministro para las matrices de monolitos. Aunque ciertos quemadores de gas requieren solo un tratamiento previo mínimo para eliminar las impurezas problemáticas, en general, el gas de combustión de una caldera que quema carbón requiere un tratamiento previo extenso para eliminar las partículas y cualquier compuesto que pueda ser venenoso para el sorbente o que pueda degradar el sustrato. En una realización, el gas de combustión pretratado del proceso de co-generación se inyecta en el sistema de sorción de esta invención, junto con el aire ambiental adicional. En este proceso de mezcla, la concentración de CO₂ en el aire aumenta significativamente (incluso con una pequeña proporción del gas de efluente adicional), para que la etapa de adsorción se pueda realizar en un período de tiempo más corto, comparable a la de una etapa de regeneración. En una realización preferida, un conjunto paralelo de módulos de adsorción/regeneración funciona en tándem con la instalación existente. Es decir, uno estará adsorbiendo CO₂ mientras que el otro se está regenerando, y viceversa. Esto imita una captura continua de CO₂. El proceso está representado por dos fases, adsorción de CO₂ y regeneración de, por ejemplo, escape de la turbina, como se describe en la Figura 1 de los dibujos adjuntos. En un sistema preferido, dos pares se hacen funcionar juntos para que cada par atado pueda actuar como contrapeso entre sí, de esta forma ahorrando costes de capital para los elevadores.

30 En la Fase 1, el aire atmosférico se mezcla con el gas de escape co-generado y la mezcla se pasa a través del módulo de adsorción de CO₂. Este proceso utiliza un sustrato cerámico de alta porosidad (monolito) de bajo costo, como los utilizados en los convertidores catalíticos para automóviles, por ejemplo, cordierita, un producto de sílice. El CO₂ se captura en el sorbente sólido que está unido y apoyado por el sustrato. El sorbente no se vaporiza ni se disuelve bajo las condiciones de funcionamiento durante la sorción y la separación, o la regeneración. De nuevo, la base para la efectividad de esta invención es el funcionamiento de la separación y la adsorción a temperaturas relativamente bajas.

40 Como antes, La Fase 2 proporciona la regeneración del sorbente mediante la eliminación del CO₂ adsorbido, utilizando procesamiento a baja temperatura (vapor) en una cámara de regeneración separada, preferentemente ubicado en una elevación diferente, preferentemente más baja, que la posición del alojamiento de adsorción. Esto permite que un sistema de elevador simple mueva el adsorbente de matriz monolítica 3041 entre los dos niveles. En regiones desarrolladas, donde la tierra tiene valor, la disposición de compensación vertical ha reducido el área. En regiones menos desarrolladas, tales como las zonas polares, una disposición de lado a lado puede ser preferida cuando las situaciones y los movimientos laterales, por ejemplo, a lo largo de los carriles, se puede utilizar preferentemente en lugar del elevador.

50 El CO₂ y el condensado de vapor son los únicos efluentes del regenerador de la Fase 2. En general, se ha demostrado que cuando se hace funcionar a las temperaturas establecidas en este documento, el líquido de condensado de vapor no tiene material absorbente substancialmente eliminado con él. El proceso adsorbe CO₂ a partir del aire ambiental y puede producir una corriente de gas de producto de CO₂ relativamente pura adecuada para el secuestro o, más significativamente, para su uso industrial adicional. Un ejemplo de tal uso es la generación de nuevo combustible usando CO₂ como material de suministro a un sistema biológico. La eficiencia de captura de CO₂ tiene una medida del uso de energía y los parámetros de adsorción se determinan en función de la concentración de CO₂ en la corriente de alimentación, y cualquier velocidad de aire naturalmente disponible proporcionada al sistema de adsorción, es decir, los vientos predominantes. La eficiencia también está determinada por la disponibilidad de vapor saturado, de temperatura relativamente baja de un proceso de co-generación, para el desprendimiento del CO₂ del sorbente y la regeneración del sorbente. Proporcionando un gas de salida de CO₂ relativamente puro, el coste de tal eliminación de CO₂ se minimiza o incluso puede hacerse rentable cuando se utiliza el CO₂, por ejemplo, para cultivar algas capaces de proporcionar nuevo combustible, en yacimientos petrolíferos para la recuperación mejorada de petróleo u otras aplicaciones comerciales o industriales ahora presentadas o que estén disponibles en el futuro. Se espera que el cultivo de algas para biocombustibles sea un centro de ganancias importante para el uso del producto de dióxido de carbono de este proceso.

Funcionamiento en tándem:

65 Como una mejora adicional a este proceso se ha encontrado que se pueden lograr ahorros de capital y energía de

una cantidad significativa mediante la integración de módulos adyacentes de las unidades de sorción/regeneración para optimizar el rendimiento de cada una de las unidades.

5 Se ha encontrado que el funcionamiento y los aspectos económicos del sistema pueden optimizarse enfriando rápidamente el monolito regenerado por debajo de la temperatura a la que se degradaría en contacto con el aire ambiental. Aunque la temperatura específica dependería de la naturaleza del sorbente y monolito utilizado, para un sustrato de cordierita y un sorbente de amina, este límite de temperatura está por debajo de 70 °C, para evitar una degradación excesiva del monolito en presencia de aire ambiental. Además, esto debe lograrse como parte de un régimen para minimizar en la mayor medida posible, la cantidad de calor provisto externamente que se necesita
10 agregar al proceso mientras se recoge CO₂ de alta pureza eliminado del sorbente.

Para optimizar la efectividad general de este sistema y obtener un sistema operativo eficiente, el enfriamiento del monolito después de la regeneración debe realizarse muy rápidamente, para que las etapas de captura de CO₂ por el sorbente en el monolito puedan sincronizarse con la etapa de regeneración. Más ventajosamente, el enfriamiento debe
15 lograrse preferentemente en no más de 10 segundos para minimizar el tiempo en que el monolito no adsorbe el dióxido de carbono. Basado en la presente invención, este efecto es alcanzable de acuerdo con el uso de los siguientes parámetros de proceso:

20 Se ha descubierto que al combinar el funcionamiento de una pluralidad de módulos en tándem, se proporciona un sistema altamente eficiente cuando se trata de una mezcla uniforme de aire ambiental con efluentes gaseosos derivados del humo agregados para aumentar la concentración de CO₂ en el gas de alimentación varias veces por encima de la que se encuentra en el aire ambiental. Además, obteniendo la pureza deseada de CO₂ desde la etapa de desmontaje requiere que la caja de regeneración tenga la mayor parte del aire agotado antes de que se el CO₂ se despoja del sorbente. El primer conjunto monolito 3041 acaba de pasar por un ciclo completo de regeneración de vapor y la presión
25 del gas de dióxido de carbono es de aproximadamente 0,7 a 1 BAR. La segunda matriz de monolitos 3042, funcionando en tándem, se ha disminuido a la cámara de regeneración después de completar la etapa de adsorción de CO₂ y el aire en la cámara de regeneración 3042 se bombean hasta entre 0,2 y 0,1 BAR (lo que proporciona una temperatura de saturación de vapor de entre 60 °C y 45 °C, respectivamente). La evacuación del aire permite mejorar la pureza del CO₂ eliminado retirado de la cámara de regeneración después de la regeneración y el coste de expulsar el aire
30 después de que el conjunto de monolitos haya entrado en la cámara y la cámara haya sido sellada, es una cantidad de energía relativamente pequeña (generalmente en forma de electricidad).

Las dos matrices en tándem están sincronizadas para que se cumplan estas condiciones, a T = 0. En este punto, las salidas de la primera caja de matriz regenerada 3041 se cambian al tubo de entrada de la Caja 3042, de modo que
35 cualquier vapor atrapado en la Caja 3041 y creado por el enfriamiento por evaporación de la matriz de monolitos en la Caja 3051 se bombea hacia la caja 3042, cuando se abre la línea 3014, como resultado de las grandes diferencias de presión (0,7 - 1 a 0,2 - 0,1 BAR), y el vapor se condensa en la matriz de monolitos relativamente fría 3042 en la Caja 3052, elevando su temperatura como se requiere para la regeneración. De esta manera, el calor eliminado de la primera matriz monolito, cuando se enfría, se transfiere directamente a la segunda matriz de monolitos para
40 proporcionar al menos un calor inicial para aumentar su temperatura. La ráfaga de vapor de la Caja 3051 a la Caja 3052 se está produciendo a una velocidad de flujo rápida, y preferentemente a una velocidad de flujo de al menos aproximadamente 0,5 metros por segundo, con el fin de alcanzar la diana de diez segundos. La gran caída de presión entre las dos cámaras de regeneración debería hacer esto factible. Cuando el proceso se completa, el sistema está en un momento fresco (T_{enfriamiento}).

45 La caja 3052 se bombea preferentemente a 0,1 BARA, pero la Caja 3051 se apaga de la Caja 3052 cuando la Caja 3052 alcanza una presión de 0,15 BARA. Esto dará como resultado una reducción deseable de aire en la Caja 3052 y, por lo tanto, una mejora adicional en la pureza del CO₂ para ser eliminado en última instancia. Después de que la conexión entre Box 3051 y Box 3052 se cierre, se permite que el vapor para la regeneración entre en la Caja 3052 e inicialmente se condensa en la matriz de monolitos 3042 que se ha precalentado en cierta medida. La admisión del vapor da como resultado una acumulación de presión de entre aproximadamente 0,7 y 1 BarA, conforme el CO₂ se
50 retira del absorbente en la matriz de monolitos y se pasa a la Caja 3052 y se empuja hacia afuera por el vapor final. Al permitir que la presión en la Caja 3052 aumente a de 0,7 a 1 como resultado del CO₂ y recogida de vapor, la caja 3052 termina como la caja 3051, en T = 0, que incluye la colección de CO₂ a medida que se elimina del sorbente en la matriz de monolitos. El tiempo para llegar a este punto es igual a T_{enfriamiento} + T_{recogida} (El momento de recoger el CO₂ regenerado).

Mientras tanto, la matriz de monolito enfriada 3041 está expuesta al aire y a la temperatura ambiente, ya que se eleva a la posición de adsorción. El tiempo para que la matriz 3041 del monolito regrese a la posición de adsorción es igual
60 a T_{enfriamiento} (el tiempo para enfriar la matriz de monolitos 3041) + T_{elevador} (el tiempo para elevar la matriz de monolitos a la posición de adsorción). La matriz de monolitos 3041 está expuesta a un flujo de aire y, durante un período de T_{ad}, hasta que la adsorción alcance la extensión deseada, como porcentaje de saturación, o equilibrio. Se indica que, para hacer funcionar esto de la manera más eficiente, la adsorción no continúa en equilibrio, sino, más bien, termina con la eliminación de la posición de adsorción en un nivel inferior, generalmente en el intervalo del 80 % al 90 % de la cantidad
65 de equilibrio, para la concentración de CO₂ en el gas de alimentación.

Para enmarcar este resultado como una ecuación matemática, se puede afirmar que $T_{\text{enfriamiento}} + T_{\text{recoger}2}$ es igual a $T_{\text{enfriamiento}} + 2T_{\text{elevador}} + T_{\text{ad}1}$. Se observa que T_{recoger} y T_{ad} se puede ajustar de forma independiente para alcanzar este resultado deseado. Como generalmente es deseable maximizar T_{ad} , generalmente $T_{\text{enfriamiento}}$ y T_{recoger} debe minimizarse en la medida de lo posible, y T_{elevador} debe mantenerse en un número bajo.

5 Cuando se trata de la mezcla de gases de alta concentración de CO_2 , sería deseable que los dos módulos en tándem tengan cada uno dos matrices modulares y las dos cajas frontales de cada uno de los módulos en tándem y las dos cajas posteriores de los dos módulos en tándem se vinculen de manera que el ciclo de tratamiento y eliminación de CO_2 desde el aire estaría solo $\frac{1}{2}$ ciclo desfasado entre sí; donde el aire ambiental, sin CO_2 añadido está siendo tratado, un diseño en tándem es innecesario pero T_{ad} puede ser tan alto como diez veces T_{recoger} , de modo que si uno fuera a la fase diez unidades, donde la unidad N proporcionaría $\frac{1}{2}$ del calor sensible para la unidad $N + 1$, en principio, el calor de N10 se puede volver a conectar a N1, pero el aumento de la eficiencia puede no ser suficiente para justificar el coste. Este tipo de sistema tándem resulta en poder reducir el consumo de agua y calor casi a la mitad, y se omite el uso de condensadores u otros dispositivos de enfriamiento, junto con la necesidad de agua de refrigeración separada.

15 Los sustratos monolíticos proporcionan un gran disipador de calor. Como resultado de su gran superficie, paredes delgadas porosas y, en muchos casos, buena conductividad térmica, para proporcionar un enfriamiento rápido por el vapor de condensación cuando el vapor pasa a través del monolito poroso.

20 Se ha encontrado que al crear este sistema de integración de procesos, se puede aumentar la vida útil del sorbente, el requerimiento de calor y el uso de agua pueden reducirse, mientras que la pureza del producto de CO_2 puede aumentarse. También se ha descubierto que los ahorros de capital y energía se obtienen mediante la integración de módulos vecinos. Además, resulta que también tiene un impacto significativo en el rendimiento de los módulos individuales. Los siguientes tres objetivos de proceso son, por lo tanto, abordados de forma rentable:

25 **Objetivo 1.** Para enfriar la realización actual, es decir, cordierita, el monolito por debajo de 70°C antes de exponerlos al aire, para prevenir la degradación. Se debe tener en cuenta que los futuros sorbentes pueden ser más resistentes al oxígeno, por lo que la temperatura no debe reducirse tanto; sin embargo, cuanto más baja es la temperatura del monolito, más rápida es la adsorción de CO_2 .

30 **Objetivo 2.** Usar el menor calor posible en el proceso; y

Objetivo 3. Recoger un CO_2 de alta pureza.

35 El objetivo 1 se ha vuelto cada vez más importante debido a la necesidad de enfriar el monolito muy rápidamente después de la eliminación, ya que las matrices de monolitos, en general, tienen una gran cantidad de calor sensible en ese punto del proceso. La diana de diseño para la refrigeración es de 10 segundos, con el fin de minimizar el tiempo empleado en no adsorber CO_2 . La técnica anterior creía que los condensadores separados eran necesarios para lograr este resultado. Sin embargo, se han explorado muchas opciones de usar condensadores, pero, ya que todos requieren superficies muy grandes y una gran cantidad de agua de refrigeración, debido a la gran cantidad de calor y el corto tiempo permitido para su eliminación, no se han encontrado ser prácticos. Esto es cierto independientemente de la naturaleza del sustrato de monolito que esté en uso; aunque la cordierita requiere la mayor cantidad de retirada de calor, otro tipo, por ejemplo, un monolito de alúmina, requiere una cantidad menor, en un grado sustancial. Sin embargo, incluso para esos tipos, los condensadores separados no se encontraron ser prácticos. Otros monolitos que soportan adsorbentes pueden requerir incluso menos calor para eliminarse, pero, en cualquier caso, se ha demostrado que el uso de condensadores es ineficiente en casi cualquier circunstancia factible.

50 El objetivo 2 tampoco se cumple con el uso de condensadores porque, transferir calor a agua fría, donde la temperatura del agua debe mantenerse a una temperatura baja para una transferencia eficaz de calor, hace prácticamente imposible recuperar económicamente el calor y, por lo tanto, no se pueden reducir los requerimientos de energía neta para el sistema.

55 Por último, el Objetivo 3 requiere que el aire atrapado se retire de la caja de regeneración 3052 antes de recolectar CO_2 . Además, diseñando el sistema para el flujo pistón, para que el CO_2 que se desprende expulse el aire antes de que los sistemas pasen a recoger el CO_2 , el aire restante se elimina primero de la cámara de regeneración. Para lograr la pureza diana de al menos el 95 %, es deseable un alto grado de flujo pistón. El flujo pistón requiere que no exista una diferencia de concentración radial de componentes con la temperatura y que no haya mezcla axial en la dirección del flujo de los gases. Esto se puede lograr al tratar el aire ambiental en un solo módulo o al tratar gas concentrado con alto CO_2 en un sistema de módulos tándem. El siguiente texto solo considera dos moléculas tándem vecinas para ilustrar el proceso. Las etapas del proceso son las siguientes:

60 **Caja 3051/Matriz de monolito 3041:** la matriz de monolitos está en la caja de regeneración sellada 3051 y acaba de completar la regeneración de vapor y la recolección de CO_2 ; la presión de salida del vapor es aproximadamente 0,7-1,0 BarA. Esto podría incluir la introducción de un poco de vapor adicional después del avance para eliminar cualquier CO_2 restante (véase a continuación).

La caja 3052/matriz de monolito 3042 se acaba de bajar a la caja de regeneración sellada 3052, después de capturar el CO₂. La caja 3052 se bombea hasta 0,2 a 0,1 bar que proporciona una temperatura de 60 °C y 45 °C, respectivamente, la temperatura de saturación de vapor a esas presiones. Esta evacuación del aire será, por supuesto, una gran ayuda para la pureza del producto de CO₂, debido a que la cantidad de aire es solo del 20-10 % del aire ambiental, y el coste de bombear una caja de aire usando electricidad es menos del 10 % del costo de mover aire a una caída de presión de 100 pascales y solo el 5 % en la realización actual.

Antes de este proceso los presentes inventores anticiparon que solo se bombearía para enfriarse después de la regeneración y se habría tenido que hacer dos veces si también se quisiera bombear para mejorar la pureza antes de la regeneración. Esta integración de dos módulos vecinos cumple ambas tareas al mismo tiempo con una sola evacuación. Uno puede programar dos módulos vecinos, que tienen ciclos independientes, para que ambos alcancen su condición descrita anteriormente al mismo tiempo. Uno puede llamar a esto T = 0.

La eliminación del dióxido de carbono y el vapor condensado de la captura de dióxido de carbono se realiza junto con parte del vapor de agua condensado y condensado en una cámara de separación antes de que la tubería de salida 3021 de la caja 3051 se cierre y la caja 3051 se abra hacia la tubería de entrada del distribuidor de vapor 3014 de la caja 3052, tras finalizar el desprendimiento y el agotamiento de CO₂ del monolito 3041. El vapor restante atrapado en la Caja 3051 y creado por evaporación (enfriamiento) de la matriz de monolitos 3041 se "bombea" a la Caja 3052 por las grandes diferencias iniciales de presión (-0,7-1: 0,2-0,1 BarA) y se condensa en la matriz de monolitos fríos en el recuadro 3052, elevando su temperatura. Así que el calor eliminado de la matriz de monolito 3041 para enfriarlo, se transfiere directamente a la matriz del monolito 3042, para calentarla. La velocidad de esta ráfaga de vapor inicial del agua que se evapora de la matriz de monolitos debe ser al menos 10 veces más rápida que la velocidad actual de 5 cm utilizada para la regeneración de vapor, o 0,5 m/s, para cumplir con la diana designada de 10 segundos. Dada la gran diferencia de presión cuando hay un gran flujo de masa y una baja caída de presión en la matriz de monolitos, esto debería ser fácil de lograr. Las dos cajas alcanzarían el equilibrio a la temperatura de vapor saturado del vapor a 0,2- 0,1 BarA, que es 60-45 °C.

Para asegurar que el proceso es suficientemente rápido, es preferible reducir la presión en la Caja 3052 a 0,1 BarA, pero la válvula de salida de la caja 3052 está cerrada a 0,15 Bar. La temperatura buscada dependerá de qué temperatura máxima es el límite para minimizar la degradación. La bomba tendrá una válvula de retención y solo bombeará después de que la bomba inicial haya bajado si hay una acumulación de CO₂ en la caja 3052, que es poco probable porque a la baja temperatura la presión parcial de CO₂ es inferior al 15%, que es lo que representaría 0,15 BarA. Así que el sorbente probablemente mantendrá la presión parcial de CO₂ por debajo del 1 por ciento. Uno puede ajustar esto por la cantidad de CO₂ que sale de la caja 3051 antes de abrir la válvula 3014, que a su vez puede expulsar el aire restante aumentando aún más la pureza incluso antes de que comience el proceso de regeneración. El tiempo de enfriamiento más el tiempo de conmutación y tránsito de vapor = T_{enfriamiento}: Uno luego cierra la conexión 3014 entre las cajas 3051 y 3052 e introduce la fuente de vapor normal, a través de la línea 3012, en la caja 3052; el vapor se condensa en el conjunto de monolito precalentado 3042 y permite que la presión se acumule hasta 0,7-1 por la presencia de CO₂ antes de comenzar la recogida de CO₂ y la finalización del proceso de regeneración de vapor y recogida de CO₂ a un ritmo más lento para completar la regeneración de la Caja 3052, que va hacia arriba con la Caja 3052 donde comenzó la Caja 30511. Esto lleva tiempo T_{recoger} así que el tiempo total transcurrido para la Caja 3052 es T_{enfriamiento} + T_{recoger}.

La caja enfriada 3051 se devuelve a la presión ambiente, a medida que la matriz monolítica enfriada 3041 se eleva a la posición de adsorción. Tarda un tiempo total T_{enfriamiento} + T_{elevador}, y se adsorbe durante un período de tiempo T_{ad} y luego se baja por un tiempo total transcurrido de T_{enfriamiento} + 2 T_{elevador} + T_{ad}.

Para obtener las dos cajas en fase para que puedan intercambiar su calor de un lado a otro, uno necesita

$$T_{\text{arrullo}} 1 + T_{\text{recoger}} = T_{\text{arrullo}} 1 + 2 T_{\text{elevador}} + T_{\text{ad}}$$

Ya que t_{recoger} y T_{ad} son ajustables independientemente esta condición se puede cumplir fácilmente. Para maximizar t_{ad} uno quiere minimizar T_{enfriamiento} y T_{recoger} y tener una T_{baja}_{elevador}. Para el caso del carburador y diseño tándem, dos módulos vecinos tendrían cada uno dos matrices de módulos y uno uniría las dos cajas frontales de cada una y las dos cajas traseras para que no haya pérdida en el ciclo de trabajo; estarían medio ciclo fuera de fase entre sí.

En el caso de aire solamente, un diseño no tándem es útil, donde el T_{ad} podría ser 10 veces T_{recoger} en principio, las unidades de fase 10 en donde la unidad n proporcionaría ½ del calor sensible para la unidad n + 1. En principio, también se podría recuperar el calor de N10 a N1, pero eso solo compraría un 5 % adicional en eficiencia de calor, Con gran costo adicional y complejidad.

Las ventajas de este proceso en el uso de agua y calor son claras, un factor de cerca de una reducción por un factor de dos para ambas entradas. No hay un coste de capital adicional para un condensador grande y no se necesita agua de refrigeración. Los sustratos son un gran disipador de calor debido a su gran área de superficie y paredes delgadas, y la alúmina tiene una buena conductividad térmica y, por lo tanto, ofrece un "enfriamiento" extremadamente rápido del vapor de condensación posible.

5 Para demostrar estas ventajas, Los siguientes cálculos ilustran el rendimiento básico de este sistema al poder eliminar el calor de la matriz de monolitos regenerados a una velocidad suficiente para cumplir con el objetivo designado de 10 segundos utilizando el sistema descrito anteriormente. Aunque el uso de monolitos como disipadores de calor, había sido reconocido previamente, usándolos de esta manera y en el contexto de este proceso de captura de CO₂ desde el aire no ha sido conocido ni sugerido.

RENDIMIENTO BASICO

10 Para funcionar en el sistema actual, es necesario evaporar 22 kg de agua/vapor de una matriz de monolitos calientes de 640 monolitos individuales para enfriar el conjunto, tal como la matriz de monolitos 3042, a 55 °C desde 110 °C y condensar el vapor evaporado, en diez segundos, por ejemplo, en la matriz de monolitos 3041 enfriada, para precalentar esa matriz. El calor latente del vapor en este intervalo de temperatura es de $2,3 \times 10^6$ julios por lo que hay que eliminar $HR = 50,6 \times 10^6$ julios en $T =$ diez segundos.

15 El área de superficie en un solo monolito es bastante grande. Hay $6,4 \text{ m}^2$ en cada monolito de $6\text{in} \times 6\text{in} \times 6\text{in}$ (NEC = 230 celda/in², SA = área de superficie/monolito = 4 s Nc L FA) donde s se está abriendo = 1,3 mm, $36,8 \times 10^4$ celdas/m², $L = .15$). Para una matriz de unidades convencional de 640 monolitos, por ejemplo, las unidades 3041 o 3042, la superficie total es $TSA = 4.216 \text{ m}^2$.

20 Por lo tanto, el flujo térmico necesario es $TFN = HR / TSA = 12 \times 10^3$ julios/m² en diez segundos, que es bastante bajo; incluso si quedan gases no condensables, el vapor se condensará lo suficientemente rápido para enfriar la unidad. El único problema es si el calor puede eliminarse lo suficientemente rápido. Si se observa que el agua condensada, que tiende a limitar la transferencia de calor en la mayoría de los sistemas de condensación, es poco probable que sea un problema importante en la transferencia de calor en este caso. Los 22 kg de agua ocupan $22 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, el cual si se divide por la TSA de 4.216 m^2 Produce una profundidad de agua de solo 0,005 mm, Incluso sin considerar que parte del agua estará en los poros de las paredes. Adicionalmente, a estas bajas temperaturas y presiones, el sorbente del monolito eliminará e inmovilizará el CO₂, limitando cualquier acumulación de concentración de CO₂ en la fase gaseosa.

30 La conductividad térmica k de la alúmina es de 18 vatios/m²°K, pero debido a que es poroso, supongamos que $k = 10$ vatios/m²°K. Ahora el TF, flujo térmico/m² en diez segundos en las paredes del monolito = $kT (\Delta\text{Temp} / w)$, donde w es $\frac{1}{2}$ del espesor de la pared de los canales del monolito. Tomando un valor conservador para w de 0,2 mm y para ΔTemp de solo 10 °K, $TF = 5 \times 10^6$ julios/m², que es mucho mayor que TFN. El rendimiento potencial supera los requisitos en una cantidad suficiente para aumentar la posibilidad de hacer la recogida de CO₂ a un ritmo muy rápido. Esto podría permitir un tiempo de ciclo muy corto, lo que podría tener otros beneficios. Lo más notable es permitir que uno use una matriz monolítica corta para capturar CO₂ a concentraciones muy altas en el caso de mezcla de gases. Como alternativa, también se podrían considerar unidades de conjuntos de módulos de menor tamaño para las cantidades menores de gases de combustión, ya que su productividad sería tan alta.

40 En la realización básica, para tratar la matriz de monolitos en la unidad 3051 para enfriarla después de la regeneración y al mismo tiempo transferir el calor a la matriz de monolitos vecina en la unidad 3052, cargado con CO₂, se podría haber asumido que la temperatura de la matriz de monolitos cargada era la misma que la mezcla de gases de combustión del aire ambiental de entrada que tenía una mejora de 8 veces en concentración de CO₂. Se debe tener en cuenta que, en algunas situaciones, puede ser deseable que el conjunto de monolitos en la unidad 3052 se caliente debido a la adsorción de CO₂ almacenando así el calor de reacción. Por ejemplo, reduciendo el agua condensada disponible para enfriar durante la adsorción; esto podría aumentar aún más la eficiencia térmica general del proceso.

En el caso base, la mitad del calor sensible podría ser salvado - En el presente caso, sería la suma de $\frac{1}{2}$ del calor de reacción + $\frac{1}{2}$ del calor sensible.

50 Se puede pensar en esto como un aumento de la eficiencia del calor de mezcla de gas mediante el ajuste de su temperatura de funcionamiento: el óptimo dependerá de la dependencia de la temperatura de la degradación oxidativa del monolito. En general, el calor de reacción del sorbente y la relación entre calor sensible y calor de reacción por tonelada de CO₂ (por ejemplo, la carga y el material y la densidad de las paredes de monolito) se tendrán en cuenta.

55 Una vez que la concentración de gases no condensables se reduce al nivel necesario para alcanzar la tasa de condensación requerida, el siguiente reto es eliminar el calor lo suficientemente rápido. Como lo señalaron Martin y otros, esto es tanto un problema de masa (cuánto calor específico del refrigerante) como un problema de conductividad térmica (qué tan rápido puede eliminarse el calor de la superficie de condensación).

60 En la realización de la Figura 8 (tomada de la solicitud anterior N.º 13/098.370, donde solo se muestra uno de los pares de estructuras de eliminación de dióxido de carbono pero se agrega una conexión a la segunda cámara de regeneración 2006A) las estructuras de eliminación de dióxido de carbono se mueven entre la zona de captura de CO₂ 2003 y la cámara de desprendimiento/regeneración de CO₂ 2006. Cuando un sustrato se mueve a la cámara de desprendimiento de CO₂ 2006, es decir, la posición más baja como se muestra en la Figura 8, el sustrato se encuentra a una temperatura sustancialmente ambiente debido al efecto de enfriamiento del vapor condensado en el sustrato cuando se mueve fuera de la cámara de captura de dióxido de carbono, el calor de reacción de la actividad de sorción

ES 2 727 343 T3

se eliminó por el efecto evaporativo del agua combinado con el efecto convectivo de la masa de aire soplada a partir de la cual el CO₂ fue eliminado, que es mucho mayor que la cantidad de CO₂.

5 Cualquier aire atrapado en el sustrato 2002 y la cámara 2006 se puede bombear, por ejemplo, por una bomba de evacuación de aire 2023, o incluso por un extractor, para formar un vacío parcial en la cámara 2006. A continuación, el calor de proceso, por ejemplo, en forma de vapor saturado del co-generador de vapor 2019, se dirige hacia ya través del sustrato de carga de CO₂ 2002 en la cámara de captura de dióxido de carbono 2006.

10 El dióxido de carbono se elimina del sorbente (se elimina) mediante el flujo de vapor relativamente caliente; el vapor entrante está a una temperatura no mayor que 130 °C, y preferentemente no mayor que 120 °C, y lo más preferentemente no mayor que 110 °C. En la mayoría de los casos, una temperatura de vapor de 100 °C es suficiente. El vapor, compuesto principalmente por dióxido de carbono y algo de vapor, sale de la cámara de captura de dióxido de carbono 2006, a través del conducto de escape 2008 en un separador 3009, donde el agua líquida se separa como se muestra y al menos parte del vapor presente se condensa. El agua condensada líquida se separa del CO₂ eliminado
15 gaseoso. Parte del vapor que se condensa en la propia estructura del sorbente durante el proceso de extracción se recolectará en un drenaje en la parte inferior de la cámara de regeneración (por ejemplo, al inclinar la estructura ligeramente y pasar al recipiente 20) o se evaporará al exponerse a la baja presión en la segunda cámara de regeneración 2006A bombeada del par, después de que la mayoría del CO₂ se retiró a la cámara 3009. El agua condensada que queda en la estructura del sustrato poroso se evaporará cuando el aire ambiental mezclado pase a través de la estructura de eliminación de dióxido de carbono durante la etapa de adsorción.
20

El CO despojado₂ del absorbente regenerado se bombea a su vez a un depósito de almacenamiento 2012, donde se mantiene a presión ligeramente elevada para su uso inmediato, por ejemplo, proporcionar una atmósfera rica en CO₂ para aumentar el crecimiento de algas, o el gas de dióxido de carbono se puede comprimir a presiones más altas, mediante el compresor 2014, para almacenamiento a largo plazo o para ser canalizado a un uso final distante, por ejemplo, secuestro o tratamiento de pozos de petróleo o de gas natural para mejorar la producción. Durante cualquier fase de compresión, El CO₂ se purifica aún más por la condensación de cualquier vapor de agua restante, cuyo condensado de agua se separa a su vez del CO₂, por medios conocidos.
25

30 La idea funciona tanto para el tándem, que es la realización preferida, como también puede ser adaptado para el caso no en tándem también. La caja/monolito 1 ha completado la regeneración de vapor y el cierre de vapor. La caja 3052 se acaba de bajar después de adsorber CO₂, y comienza a bombear fuera del aire desde la Caja 3052, para reducir la presión en la Caja 3052 a de 0,2 a 0,1 BarA. Los tubos de salida de la caja 3051 se cambian a los tubos de entrada del distribuidor de vapor de la caja 3052; el vapor del agua condensada que se evapora en la Caja 3051 se condensa
35 en el monolito relativamente fresco en la Caja 3052, elevando su temperatura. La velocidad de esta ráfaga de vapor inicial del agua que se evapora del monolito debe ser al menos 10 veces más rápida que la velocidad actual, o 0,5 m/s; esto ayudará a extender la calefacción pero aún tendrá un frente más agudo que la caja de aire en 5, por lo que no saldrá vapor por el extremo posterior. Las dos cajas alcanzarán un equilibrio a una temperatura inferior a $(T_{\text{regenerar}} - T_{\text{aire}})/2$ porque parte del calor se elimina por la evaporación de CO₂. La conexión 3051 se cierra y se introduce vapor en la caja 3052 desde la fuente de vapor para completar el calentamiento a $T_{\text{regenerar}}$ y colección de CO₂ a un ritmo más lento para completar la regeneración de la Caja 3052. La caja 3051 que contiene la matriz de monolito enfriada 3041 se expone luego al aire ambiental y se eleva a la posición de adsorción.
40

45 Un proceso negativo es que, durante un breve tiempo, tanto la Caja 3051 como la Caja 3052 no absorben CO₂ desde el aire. En el caso de la captura de aire donde las cajas 3051 y 3050 están una al lado de la otra; los ciclos para las dos cajas pueden ser escalonados para que ambos no tengan una reducción en el ciclo de trabajo. También en otra realización en la aplicación en tándem, si los monolitos estuvieran dispuestos espalda con espalda, Una caja sería la extracción con vapor en la dirección opuesta a la dirección de captura.

REIVINDICACIONES

1. Un método para eliminar y capturar dióxido de carbono concentrado del aire cargado de dióxido de carbono, comprendiendo el método
- 5 mezclar un primer flujo de aire ambiental cargado de dióxido de carbono con no más del 50 % en volumen de un gas de efluente, donde el gas efluente deriva de un gas de combustión de la combustión de hidrocarburos, y dirigir el primer flujo de aire ambiental mezclado a una primera estructura de eliminación de dióxido de carbono; comprendiendo la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono un sorbente soportado sobre un sustrato poroso y capaz de unir de manera liberable el dióxido de carbono para eliminar una porción predeterminada del dióxido de carbono
- 10 de la primera mezcla de aire ambiental mezclada;
pasar la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono a una primera cámara de captura de dióxido de carbono que se puede sellar, que extrae aire de la primera cámara de captura sellada para reducir la presión de aire en la misma, y pasa el vapor, a una temperatura de no más de 120 °C al interior y a través de la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono para eliminar el dióxido de carbono del sorbente y regenerar el sorbente y eliminar
- 15 el dióxido de carbono desprendido de la primera cámara de captura sellada, para capturar el dióxido de carbono concentrado;
mezclar un segundo flujo de aire ambiental cargado de dióxido de carbono con no más del 50 % en volumen de un gas de efluente, donde el gas efluente deriva de un gas de combustión de la combustión de hidrocarburos, y dirigir el primer flujo de aire ambiental mezclado a una segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono;
- 20 comprendiendo la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono un sorbente soportado sobre un sustrato poroso y capaz de unir de manera liberable el dióxido de carbono para eliminar una porción predeterminada del dióxido de carbono de la segunda mezcla de aire ambiental mezclada;
pasar la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono a una segunda cámara de captura de dióxido de carbono que se puede sellar, extrayendo aire de la segunda cámara de captura sellada para reducir la presión de aire en la misma, y pasar el vapor, a una temperatura de no más de 120 °C al interior y a través de la segunda estructura
- 25 de eliminación de dióxido de carbono para extraer el dióxido de carbono del sorbente y regenerar el sorbente, mientras el vapor se condensa y eliminar el dióxido de carbono desprendido de la segunda cámara de captura sellada, para capturar el dióxido de carbono concentrado;
haciéndose funcionar la primera y la segunda estructuras de eliminación de dióxido de carbono en tándem, de manera
- 30 que cuando la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono haya completado un ciclo de regeneración y la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono esté preparada para llevar a cabo su regeneración, el vapor restante en la primera cámara de captura de dióxido de carbono se transfiere rápidamente a la segunda cámara de captura de dióxido de carbono a presión reducida para enfriar la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono y precalentar la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono antes de la regeneración con vapor saturado; y la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono se retira de la primera cámara de captura y se mueve hacia un flujo de aire ambiental mezclado;
- 35 pasar vapor saturado a la segunda cámara de captura de dióxido de carbono para regenerar la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono y eliminar el dióxido de carbono y el vapor condensado de la segunda estructura de eliminación de dióxido de carbono; y
- 40 repetir el funcionamiento en tándem para que la primera estructura de eliminación de dióxido de carbono vuelva a la primera cámara de captura de dióxido de carbono después de adsorber el dióxido de carbono del flujo de aire mezclado y la presión en la primera cámara de captura de dióxido de carbono se reduzca, y se abra a la presión más alta en la segunda cámara de captura de dióxido de carbono.
- 45 2. El método de la reivindicación 1, en donde el dióxido de carbono y el vapor condensado que se eliminan de cada una de las estructuras de eliminación se pasan a un recipiente de separación para eliminar el vapor condensado en forma líquida y para pasar el dióxido de carbono concentrado para su posterior procesamiento.
- 50 3. El método de la reivindicación 2, en donde el dióxido de carbono se procesa adicionalmente comprimiéndolo lo suficiente para eliminar el vapor de agua restante para obtener CO₂ altamente concentrado de al menos un 95 % de pureza.
4. El método de la reivindicación 1, en donde la presión en cada una de las cámaras de captura de dióxido de carbono se reduce a no más de 0,2 BarA.
- 55 5. El método de la reivindicación 1, en donde la presión en cada una de las cámaras de captura de dióxido de carbono se reduce a no más de 0,15 BarA.
6. El método de la reivindicación 1, en donde el aire ambiental mezclado contiene una concentración de CO₂ al menos dos órdenes de magnitud mayor que la concentración de CO₂ en el aire ambiental.
- 60 7. El método de la reivindicación 1, en donde la estructura de eliminación de dióxido de carbono comprende una matriz de monolitos de sustrato poroso formados por un material seleccionado del grupo que consiste en sílice, alúmina y sílice recubierta de alúmina y en donde el sustrato soporta un sorbente de amina.
- 65 8. El método de la reivindicación 7 en donde el sorbente es una amina primaria.

9. El método de la reivindicación 1 en donde el vapor es vapor saturado.
- 5 10. El método de la reivindicación 9 en donde el vapor saturado es vapor de calor de proceso.
11. El método de la reivindicación 5, en donde la presión en cada una de las cámaras de captura de dióxido de carbono se reduce a 0,1 BarA.
- 10 12. El método de la reivindicación 1, en donde el vapor condensado permanece en los poros del sustrato cuando la estructura de eliminación de dióxido de carbono regenerado se retira de la cámara de captura y se devuelve a un flujo de aire ambiental mezclado, a fin de servir para moderar la temperatura del sorbente y del sustrato cuando se adsorbe CO₂ desde el aire mezclado.
- 15 13. El método de la reivindicación 12 en donde el aire ambiental se mezcla con menos del 50 % en volumen del gas efluente.
- 20 14. Un sistema para eliminar el dióxido de carbono del aire cargado de dióxido de carbono, comprendiendo el sistema un par de estructuras de eliminación de dióxido de carbono, comprendiendo cada estructura un sorbente que es capaz de absorber o unirse al dióxido de carbono, para eliminar el dióxido de carbono del aire y un sustrato poroso de masa sólida sobre las superficies en donde se apoya el sorbente, y un soporte estructural móvil para el sustrato; soportando el soporte estructural al sorbente en una posición para ser expuesto a un flujo de aire cargado de dióxido de carbono para permitir la eliminación de CO₂ del aire;
- 25 un par de cámaras de captura de CO₂ sellables, una para cada estructura de eliminación de dióxido de carbono para capturar el dióxido de carbono de la estructura de extracción cargada de CO₂; una bomba de escape y un primer medio de conexión de fluido que se puede abrir entre cada cámara de captura de dióxido de carbono y la bomba de escape para reducir la presión atmosférica dentro de la cámara de captura sellada de dióxido de carbono después de la entrada de una estructura de extracción; un segundo medio de conexión de fluido que se puede abrir entre la cámara de captura de dióxido de carbono y una fuente de vapor de calor de proceso; un tercer medio de conexión de fluido que se puede abrir que une las dos cámaras de captura de dióxido de carbono; y un cuarto medio de conexión de fluido que se puede abrir entre cada cámara de captura de dióxido de carbono y una cámara de recogida de CO₂; y
- 30 aparato para mover una estructura de eliminación de dióxido de carbono hacia dentro y hacia fuera de una cámara de captura de dióxido de carbono.
- 35 15. el sistema como se define en la reivindicación 14, en donde la masa sólida porosa comprende una estructura cerámica monolítica altamente porosa que soporta el sorbente de dióxido de carbono para absorber o unir el dióxido de carbono del aire.
- 40 16. El sistema de la reivindicación 14, que comprende un par de estructuras de eliminación de carbono orientadas verticalmente, cada una de las cuales funciona selectivamente de una manera en donde uno de los pares de estructuras de eliminación de carbono orientadas verticalmente se encuentra alternativa y sucesivamente en la trayectoria de aire cargado con dióxido de carbono mientras que el otro del par de estructuras de eliminación de carbono orientadas verticalmente se está calentando con calor de proceso para separar el dióxido de carbono previamente adsorbido del sorbente y regenerar el sorbente en el soporte poroso.
- 45 17. El sistema de la reivindicación 16, en donde la estructura de eliminación de carbono orientada verticalmente está configurada y funciona de manera que se coloca alternativa y sucesivamente en la trayectoria del aire cargado de dióxido de carbono, para eliminar el dióxido de carbono del aire y exponerlo para que se caliente con calor de proceso, para separar el dióxido de carbono del sorbente y regenerar el sorbente.
- 50 18. El sistema de la reivindicación 16, que comprende un sistema de válvula de funcionamiento automático diseñado y adaptado para pasar alternativa y sucesivamente el aire cargado de dióxido de carbono a la estructura de eliminación de carbono y pasar el calor del proceso a la cámara de captura de carbono para separar el dióxido de carbono del sorbente y regenerar el sorbente.

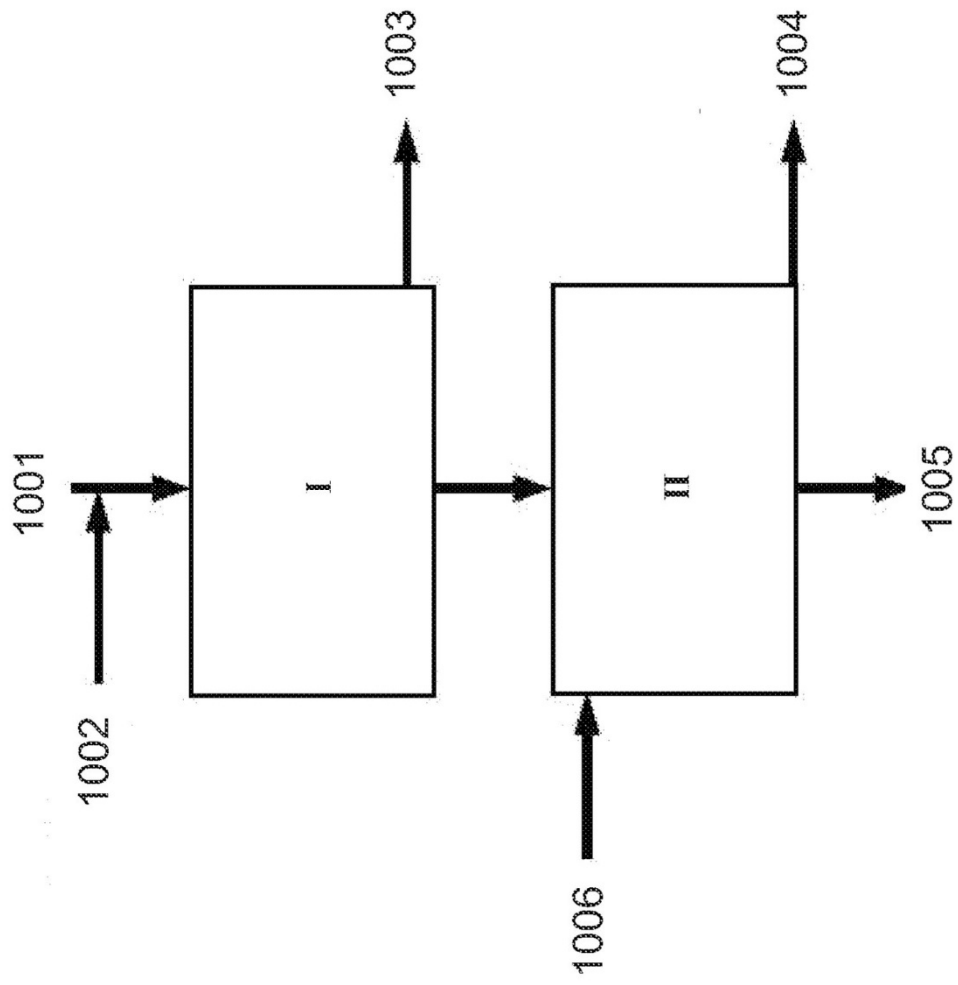


Fig. 1

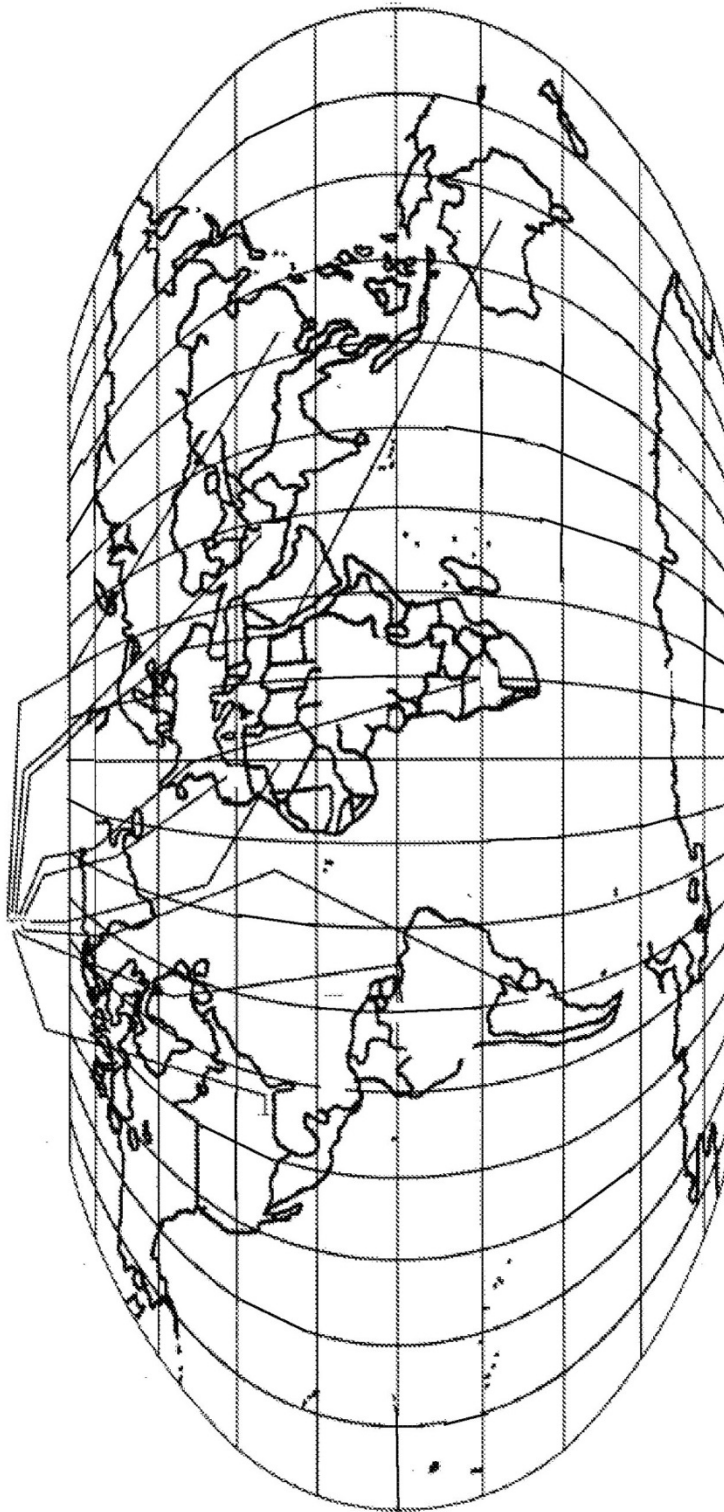


FIG. 2

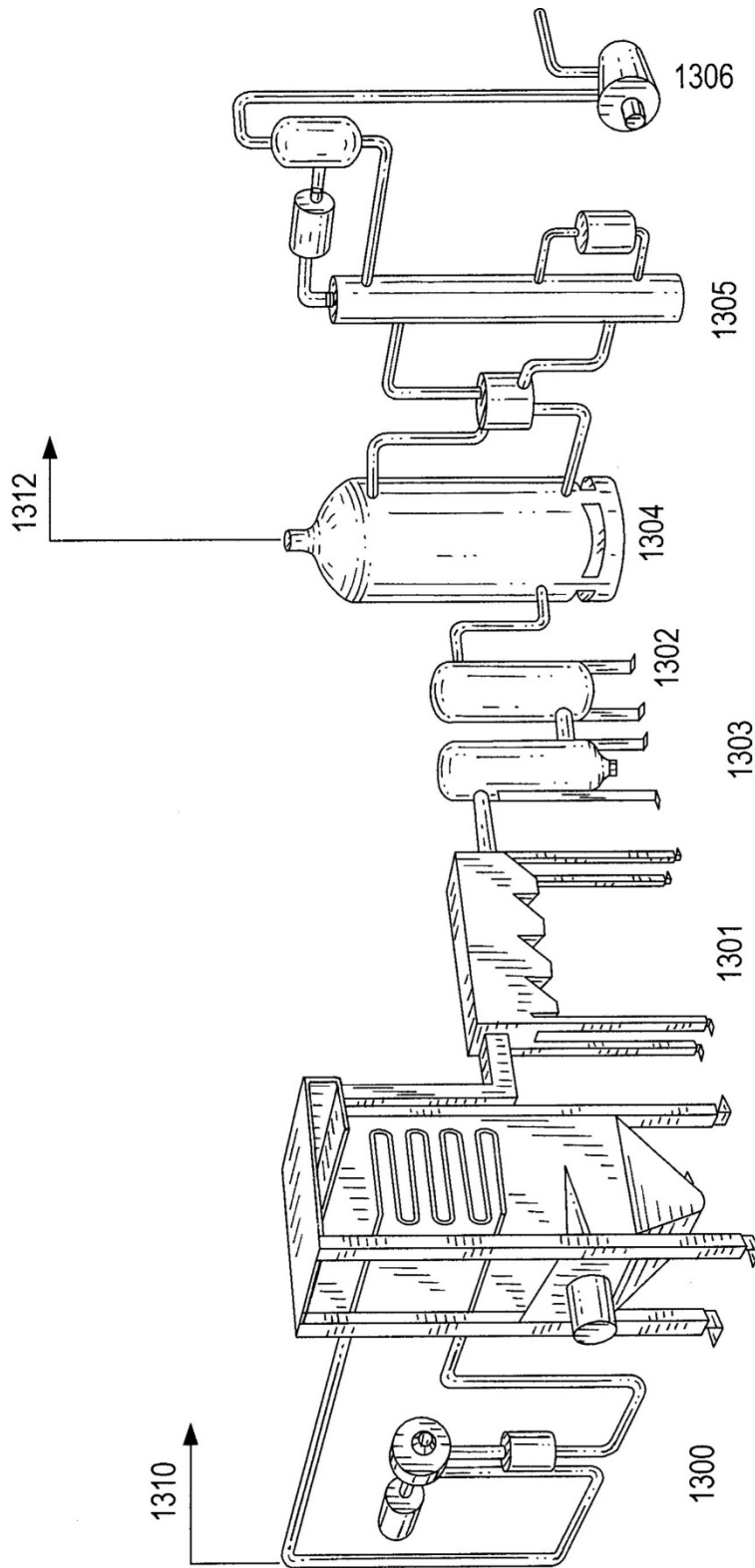


Fig. 3

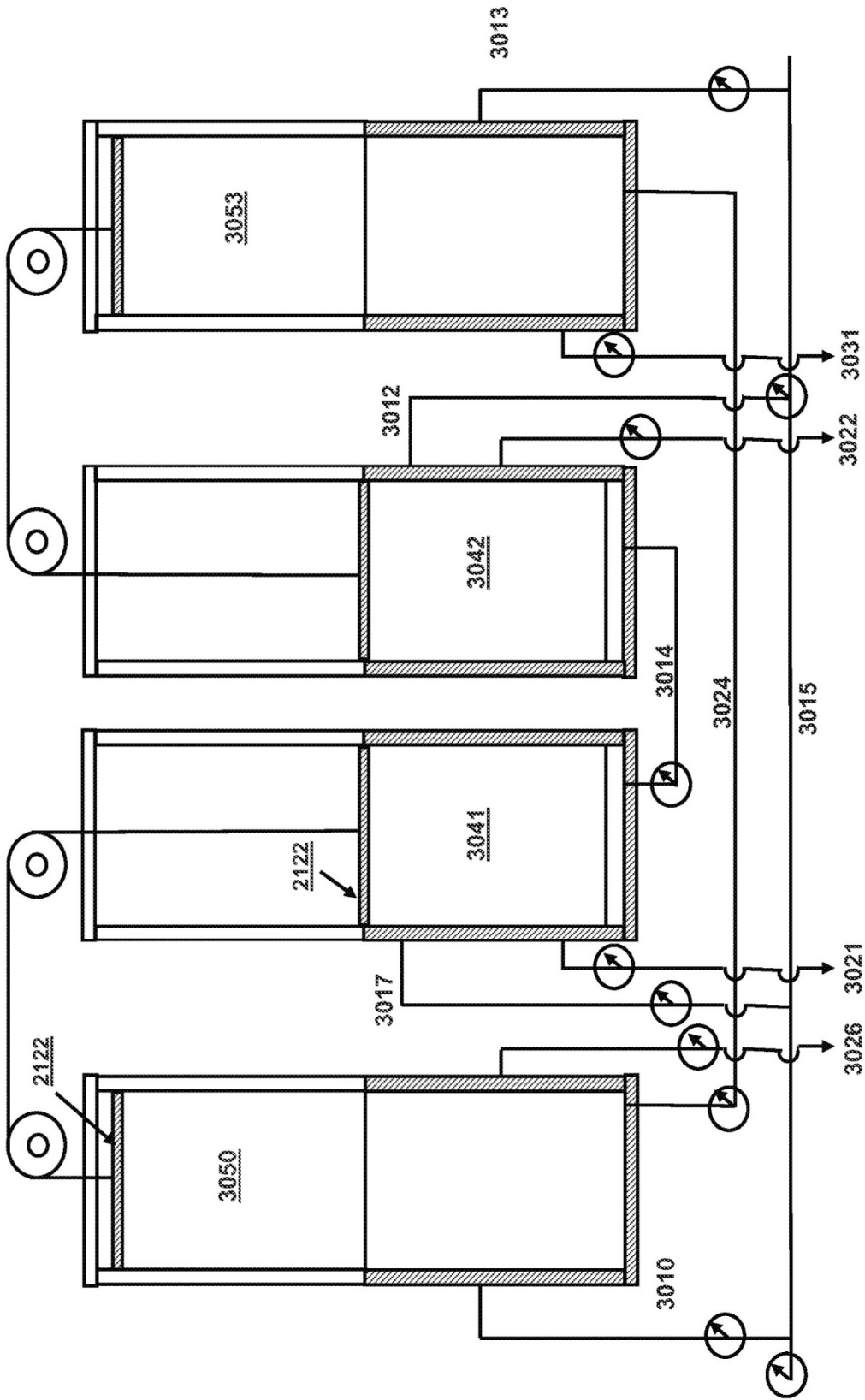


Fig. 4

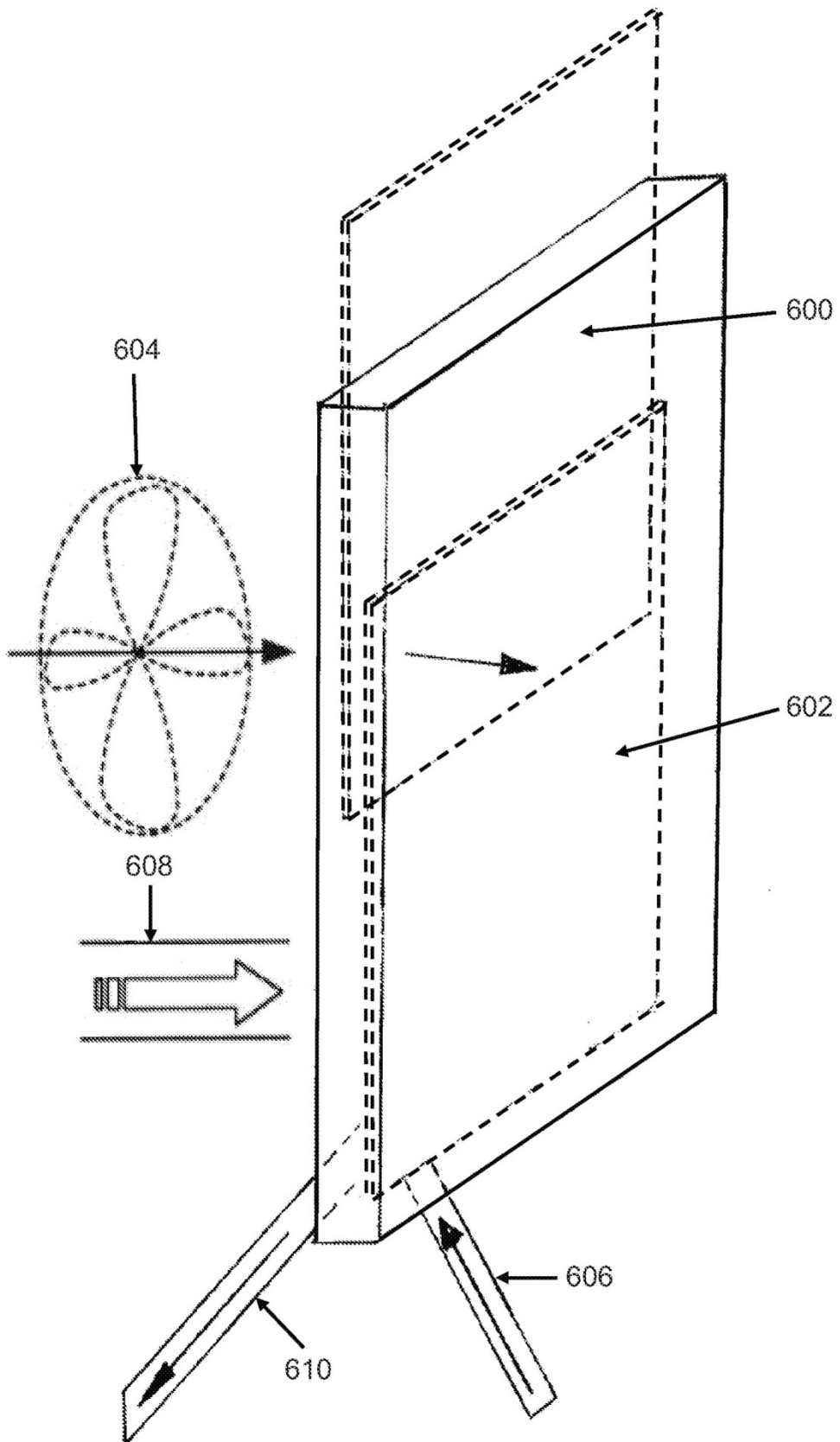


Fig. 5

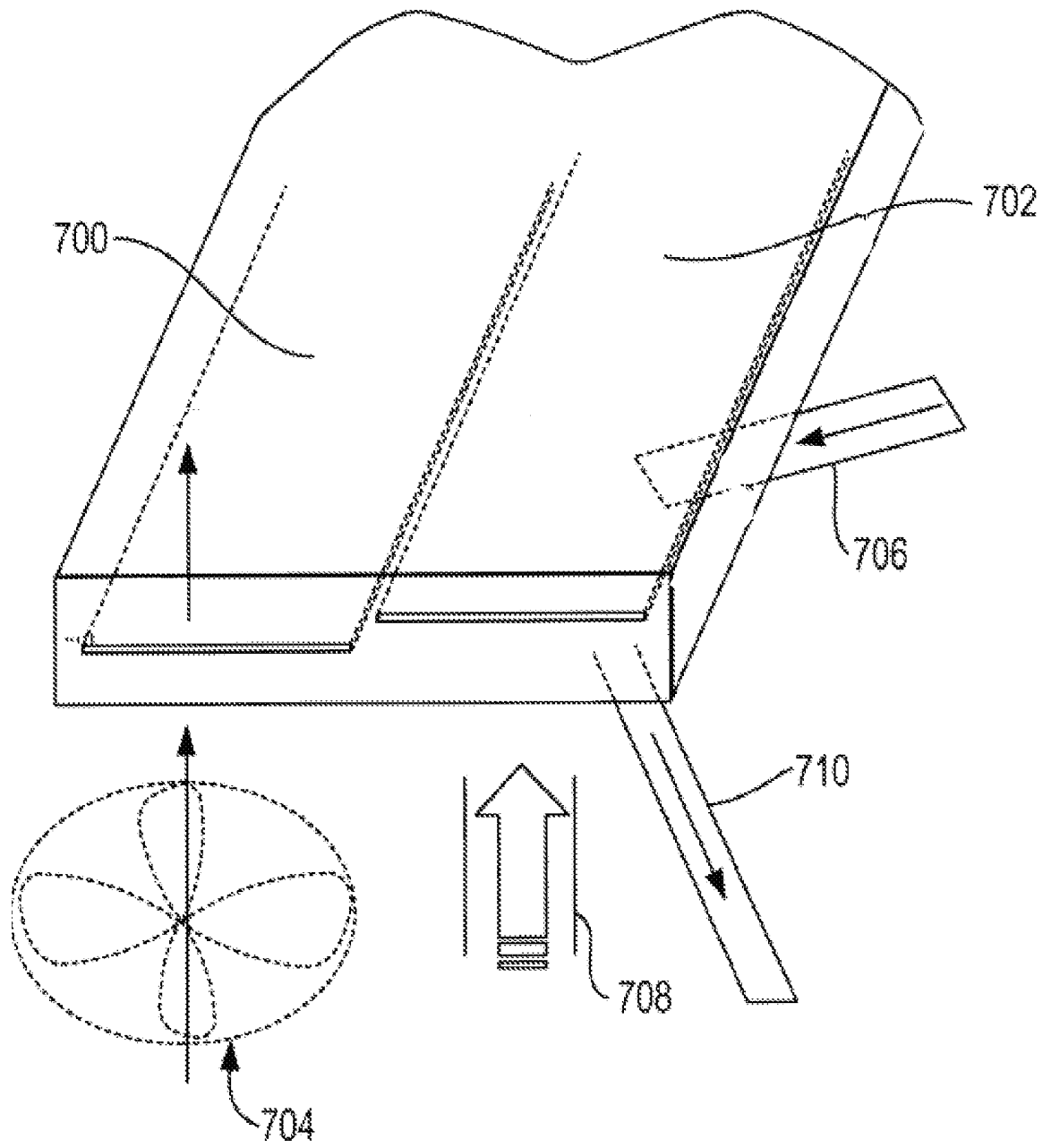


FIG. 6

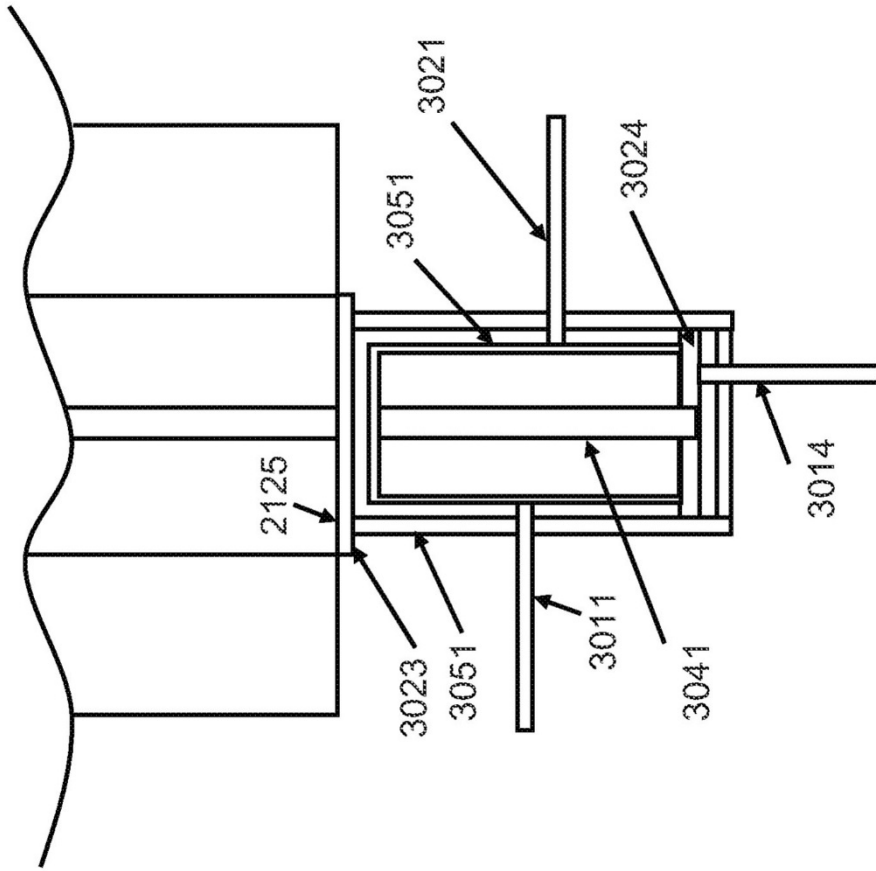


FIG. 7

