

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 578 604**

51 Int. Cl.:

C10L 9/08 (2006.01)

C10B 53/02 (2006.01)

G05B 13/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2012 E 12808390 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.03.2016 EP 2794821**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de torrefacción rápida de biomasa**

30 Prioridad:

21.12.2011 FR 1162215

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.07.2016

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)**

**25, Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"
75015 Paris, FR y**

**CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE
EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE
DEVELOPPE (CIRAD) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**NOCQUET, TIMOTHEE;
COMMANDRE, JEAN-MICHEL y
DUPONT, CAPUCINE**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 578 604 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de torrefacción rápida de biomasa

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere al campo de la valoración de la biomasa por vía termoquímica.

10 Se refiere a un procedimiento de tratamiento térmico de las partículas de biomasa, del tipo conocido con el nombre de torrefacción. Un tratamiento de ese tipo permite preparar una carga de biomasa para facilitar su fraccionamiento mediante trituración como preparación para:

- la gasificación en un reactor con arrastre de flujo;

15 - la combustión simultánea con carbón.

Por "partículas", se entiende todo tipo de trozos, granos, recortes, fragmentos o residuos de biomasa natural en estado sólido.

20 El término biomasa designa cualquier tipo de material de origen vegetal, animal o fúngico, que se pueda convertir en una fuente de energía para combustión.

La invención se refiere especialmente, pero no de forma exclusiva, a la torrefacción de biomasa lignocelulósica, como la madera.

25 Se refiere en particular a un procedimiento de gestión de una unidad de torrefacción de partículas de biomasa en el que las partículas se torrefactan durante un período de torrefacción t_r en un fluido, preferentemente un gas, llevado a una temperatura de torrefacción T_g .

30 La presente invención se refiere también a un procedimiento de torrefacción usando este procedimiento de gestión, un dispositivo de gestión que permite poner en práctica dicho procedimiento de gestión, así como una unidad de torrefacción que comprenda dicho dispositivo.

Estado de la técnica anterior

35 En un procedimiento clásico de gasificación, la biomasa se pretrata (se seca y se tritura en grueso, hasta un tamaño de aproximadamente centímetros), y a continuación se convierte en gas de síntesis en un gasificador, principalmente en H_2 y CO . A continuación, este se puede transformar mediante una reacción catalítica en un combustible líquido del tipo Diesel Fischer Tropsch, metanol/DME o alcoholes, dihidrógeno, o en un combustible gaseoso del tipo conocido con el nombre inglés *Synthetic Natural Gas* [gas natural sintético].

40 Un reactor de gasificación especialmente interesante es el reactor con arrastre de flujo. Con su funcionamiento a temperatura elevada, normalmente entre 1000 y 1600 °C, y tiempos de permanencia de algunos segundos, permite obtener un gas prácticamente exento de alquitrán en el gas de síntesis. En estas condiciones, las transferencias de calor y materia son muy importantes, y la conversión completa de la biomasa implica la inyección en forma de partículas con una dimensión inferior a 1 mm, y preferentemente de aproximadamente 100 μm a 500 μm .

45 Sin embargo, es difícil y por tanto caro reducir las partículas de biomasa a un tamaño inferior al centímetro, especialmente en el caso de la biomasa lignocelulósica, debido a la naturaleza fibrosa de esta biomasa. Esta naturaleza fibrosa se traduce especialmente en la presencia de microfibrillas, de forma que se favorece la aglomeración, no deseable, de las partículas trituradas.

50 Una solución consiste en pretriturar la biomasa de forma que se obtengan partículas cuya dimensión característica es de aproximadamente centímetros, torrefactar dichas partículas, y después triturarlas hasta obtener partículas de forma prácticamente esférica y lisa cuya dimensión característica es de aproximadamente 100 μm a 500 μm , para inyectarlas en el reactor con arrastre de flujo.

55 En la segunda aplicación propuesta, la biomasa se puede valorizar en las centrales térmicas mediante combustión simultánea con carbón. Las dificultades técnicas actuales se parecen a las encontradas con el reactor con arrastre de flujo, ya que la biomasa debe inyectarse junto con el carbón en forma pulverizada. El torrefactado de la carga de biomasa permite su inyección en el reactor, así como la armonización de sus propiedades con las del carbón, lo que permite utilizarlas en las centrales térmicas dimensionadas para el carbón. La torrefacción constituye de esta manera una solución de pretratamiento de la biomasa para este procedimiento.

65 La comunidad científica suele considerar la torrefacción como un tratamiento térmico suave de la biomasa, entre 200 °C y 300 °C, aproximadamente, en atmósfera, y en ausencia o defecto de oxígeno, y que suele durar

normalmente de varias decenas de minutos a varias horas. Durante este tipo de transformación térmica, las partículas de biomasa pierden peso a volumen casi constante a medida que avanza la reacción. Esto vuelve las partículas en más frágiles desde el punto de vista mecánico, y aumenta de esta forma su triturabilidad. También altera la naturaleza fibrosa de esta biomasa, y vuelve las partículas torrefactadas más lisas y más esféricas, lo que facilita su inyección en el reactor de gasificación.

Por otra parte, durante la torrefacción se emiten gases. Entre estos gases aparecen especies que no se pueden condensar, es decir, que son gaseosas a temperatura ambiente, así como especies condensables que se liberan en forma gaseosa durante el tratamiento térmico y que posteriormente condensan a temperatura ambiente: se trata principalmente de vapor de agua, dióxido de carbono, y ácido acético. Esto ocasiona una disminución en las relaciones O/C e H/C del sólido, y un aumento de su densidad energética.

La torrefacción permite la obtención de un material que se transporta y almacena de una forma más sencilla: la biomasa torrefactada tiene mayor densidad energética que la biomasa en bruto, es más hidrófoba, y resiste mejor a la degradación biológica.

Sin embargo, la duración de los tratamientos de torrefacción convencionales induce costes industriales cuya reducción sería deseable.

Esta duración disminuye cuando se aumenta la temperatura de torrefacción T_g , es decir, la temperatura del fluido que rodea las partículas de biomasa en el interior de un reactor de torrefacción.

Sin embargo, dicho aumento de la temperatura de torrefacción T_g suele ocasionar una reducción en la homogeneidad de las dimensiones de las partículas obtenidas después de la torrefacción y tras la trituración. Dicho de otra forma, un aumento de ese tipo de la temperatura de torrefacción T_g induce en general un escalonamiento de la distribución de tamaños de las partículas torrefactadas y trituradas. De este modo, la obtención de partículas de dimensiones suficientemente pequeñas para su aplicación en uno de los tipos anteriormente citados requiere una trituración más intensa y, por tanto, es más costosa.

30 **Exposición de la invención**

La invención tiene especialmente por objeto aportar una solución sencilla, económica y eficaz a este problema, y en particular tiene por objeto un procedimiento de torrefacción de partículas de biomasa a una temperatura optimizada para reducir al máximo la duración del procedimiento conservando al mismo tiempo una triturabilidad adecuada de las partículas de biomasa torrefactada.

La invención propone a tal fin un procedimiento de gestión de una unidad de torrefacción para la torrefacción de partículas de biomasa durante una duración de torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g , caracterizándose dicho procedimiento en que comprende las etapas sucesivas de:

- 40 - medida de un diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa;
- en función del diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa, cálculo de una temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} para la que la relación H entre un tiempo característico de la reacción de torrefacción y un tiempo característico de transferencia térmica para las partículas de biomasa es igual a un valor mínimo H^{min} predefinido;
- 45 - regulación de la temperatura de torrefacción T_g de dicho fluido a un valor inferior o igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} ;
- 50 - regulación de la duración de la torrefacción t_r a un valor tal que el rendimiento másico final R de la torrefacción sea igual a un valor diana predefinido.

Se entiende por "tiempo característico" un tiempo necesario para que se considere que el parámetro se ha alcanzado en un determinado porcentaje de su valor máximo. Este porcentaje se selecciona normalmente igual al 63,2 %.

Se entiende por "rendimiento másico final" la relación entre la masa de las partículas tras la torrefacción y la masa de las partículas antes de torrefacción, estando secas dichas partículas hasta peso constante (peso seco), por ejemplo, según la norma XP CEN/TS 14774-1. Por tanto, este rendimiento disminuye con el avance de la reacción de torrefacción.

Se ha constatado que un aumento de la homogeneidad de la reacción de torrefacción dentro de cada partícula de biomasa permite reducir la dispersión de la distribución de los correspondientes tamaños de las partículas torrefactadas, y después trituradas.

65

5 El procedimiento de gestión de acuerdo con la invención permite determinar la temperatura de torrefacción más elevada que sea compatible con un nivel mínimo de homogeneidad de la reacción de torrefacción en el interior de las partículas. Esta homogeneidad es, sin embargo, mucho mejor si la transferencia térmica en el interior de las partículas de biomasa es rápida si se compara con la reacción de torrefacción. Por tanto, la homogeneidad de esta reacción se puede estimar a partir del valor de la reacción H anteriormente indicada.

Una vez determinada esta temperatura, se determina la duración de torrefacción que permite obtener un rendimiento másico final predeterminado.

10 El procedimiento de acuerdo con la invención permite, de este modo, maximizar la temperatura de torrefacción y, por tanto, reducir al máximo la duración de este tratamiento térmico, garantizando al mismo tiempo una buena eficacia de este tratamiento. Esta reducción en la duración se puede traducir en una reducción notable del coste de este tratamiento.

15 Se debe destacar que el procedimiento de acuerdo con la invención comprende, además, ventajosamente las etapas posteriores sucesivas de:

- inicio de la torrefacción a la temperatura de torrefacción T_g establecida anteriormente;

20 - detención de la torrefacción al cabo de un tiempo igual a la duración de la torrefacción t_r establecido anteriormente.

Además, la temperatura de torrefacción T_g se establece ventajosamente igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} .

25 Esto permite optimizar la velocidad de la reacción de torrefacción, y, por tanto, maximizar el ahorro de tiempo y la reducción de costes permitidos por la invención.

El valor mínimo H^{min} predefinido de dicha relación H es ventajosamente superior o igual a 2, preferentemente superior o igual a 5, y aún más preferentemente superior o igual a 10.

30 Como se explica a continuación, la elección del valor mínimo de esta relación H determina el grado de homogeneidad de la reacción de torrefacción y, por tanto, el nivel de triturabilidad de las partículas torrefactadas.

35 El valor diana del rendimiento másico final R de la torrefacción es, preferentemente, superior o igual al 60 %, preferentemente del 70 %, y aún más preferentemente del 80 %.

Estos valores de rendimiento másico final permiten garantizar la viabilidad de la torrefacción en términos de balance energético.

40 La temperatura de torrefacción T_g está comprendida en el intervalo 300 °C-400 °C, preferentemente en el intervalo 300 °C - 350 °C, y aún más preferentemente en el intervalo 325 °C - 350 °C.

Dichas temperaturas permiten de forma general conseguir una torrefacción relativamente rápida conservando al mismo tiempo un nivel satisfactorio de triturabilidad de las partículas torrefactadas.

45 La duración de la torrefacción t_r es inferior a 15 minutos, preferentemente inferior a 10 minutos, aún más preferentemente inferior a 5 minutos.

50 Estas duraciones permiten conseguir los niveles de rendimiento indicados anteriormente para temperaturas de torrefacción comprendidas en los intervalos anteriormente indicados.

En una realización preferida de la invención, la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} se determina en función del valor mínimo H^{min} de dicha relación según la fórmula:

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}}}$$

55 en la que:

60 - k_t es una constante de la reacción de torrefacción, que se considera como una reacción de primer orden;

- ρ_p es la densidad de la biomasa;

- Cp_p es el calor másico de la biomasa;

5 - $\lambda_{eff,p}$ es la conductividad térmica eficaz de la biomasa;

La fórmula anterior traduce la relación del tiempo característico de la reacción de torrefacción y el tiempo característico de la transferencia térmica interna por conducción y radiación en el interior de las partículas de biomasa.

10 En una segunda realización preferida de la invención, la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} se determina en función de dicho valor mínimo H^{min} de dicha relación según la fórmula:

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p Cp_p d_p^2}{36\lambda_{eff,p}} + \min\left(\frac{\rho_p Cp_p d_p}{6h_{conv}}; \frac{\rho_p Cp_p d_p}{6\omega_p \sigma (T_g^{max} + T_p)(T_g^{max^2} + T_p^2)}\right)}$$

15 en la que:

- k_t es una constante de la reacción de torrefacción, que se considera como una reacción de primer orden;

20 - ρ_p es la densidad de la biomasa;

- Cp_p es el calor másico de la biomasa;

25 - $\lambda_{eff,p}$ es la conductividad térmica eficaz de la biomasa;

- ω_p es la emisividad de la biomasa;

- h_{conv} es el coeficiente de transferencia térmica externa entre la biomasa y dicho fluido;

30 - σ es la constante de Stefan-Boltzmann;

- T_p es la temperatura inicial de las partículas de biomasa antes de la torrefacción.

35 La fórmula anterior traduce la relación entre el tiempo característico de la reacción de torrefacción y la suma del tiempo característico de la transferencia térmica interna por conducción y radiación en el interior de las partículas de biomasa y el mínimo de los tiempos característicos respectivos de las transferencias térmicas externas, es decir, con el fluido, por convección y radiación.

40 Esta fórmula permite, por tanto, una mejor estimación que la fórmula utilizada en la primera realización de la invención.

En esta segunda realización de la invención, el coeficiente de transferencia térmica externa h_{conv} se determina preferentemente a partir de la correlación de Ranz-Marschall, según la fórmula:

$$45 \quad h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

en la que:

50 - Re_p es el número de Reynolds determinado por la fórmula: $Re_p = \frac{\rho_g \times v_g \times d_p}{\mu_g}$;

- Pr es el número de Prandtl determinado por la fórmula: $Pr = \frac{\mu_g \times Cp_g}{\lambda_g}$;

donde:

55 - ρ_p es la densidad del fluido;

- μ_g es la viscosidad del fluido;

- λ_g es la conductividad térmica del fluido;

5 - C_{p_g} es el calor másico del fluido;

- V_g es una velocidad media del fluido.

10 Por otra parte, la constante de reacción k_r se determina a partir de un modelo cinético de la reacción de torrefacción, y depende del tipo de biomasa torrefactada.

De una manera general, la duración de la torrefacción t_r se determina ventajosamente en función de la temperatura de torrefacción T_g y el valor diana del rendimiento másico final R de la torrefacción, mediante datos experimentales de correlación ya establecidos.

15 La duración de la torrefacción puede determinarse, en particular, a partir de una extrapolación de los datos experimentales anteriormente citados.

20 La invención se refiere así a un procedimiento de torrefacción de las partículas de biomasa, de preferencia lignocelulósica, para una duración de la torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g en el interior de una unidad de torrefacción, que comprende la gestión de la unidad de torrefacción mediante un procedimiento de gestión del tipo indicado a continuación.

25 Este procedimiento se aplica ventajosamente a partículas de biomasa cuyo diámetro promedio dp es inferior a 40 mm, preferentemente inferior a 20 mm, aún más preferentemente inferior a 10 mm.

En una aplicación especialmente ventajosa de este procedimiento, la biomasa está compuesta por madera. El procedimiento de acuerdo con la invención permite evitar, de esta forma, el uso de aditivos tales como el aceite.

30 Por otra parte, dicho gas es, preferentemente, un gas inerte, tal como el dinitrógeno N_2 .

La invención se refiere también a un dispositivo de gestión de la unidad de torrefacción para la torrefacción de partículas de biomasa para una duración de la torrefacción t_r en un fluido llevado a una temperatura de torrefacción T_g , caracterizándose el dispositivo de gestión porque comprende:

35 - medios de medición de un diámetro promedio dp de partículas de biomasa;

40 - configurados los primeros medios de cálculo para determinar, en función del diámetro promedio dp medido de las partículas de biomasa, una temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} para la que la relación H entre un tiempo característico de la reacción de torrefacción y un tiempo característico de transferencia térmica en el interior de las partículas de biomasa es igual a un valor mínimo H^{min} predefinido;

45 - primeros medios de gestión configurados para regular dicha temperatura de torrefacción T_g a un valor inferior o igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} ;

- segundos medios de cálculo y de gestión configurados para regular dicha duración de la torrefacción t_r a un valor tal que el rendimiento másico final R de la torrefacción sea igual a un valor predeterminado.

50 Los medios de cálculo anteriormente citados permiten una aplicación del procedimiento de acuerdo con la invención de una forma rápida y fiable.

El dispositivo de gestión anteriormente citado comprende preferentemente medios de prerregulación del valor mínimo H^{min} de dicha relación H y/o medios de prerregulación del rendimiento másico final R de la torrefacción.

55 Estos valores pueden modificarse fácilmente antes de cada tratamiento de las partículas de biomasa mediante torrefacción.

60 La invención se refiere finalmente a una unidad de torrefacción para la torrefacción de las partículas de biomasa para una duración de la torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g , que comprende un dispositivo de gestión del tipo anteriormente descrito, así como los medios de calentamiento para llevar dicho gas a la temperatura de torrefacción T_g fijada por dicho dispositivo, para un tiempo igual a la duración de torrefacción t_r fijada por dicho dispositivo.

Breve descripción de los dibujos

La invención se comprenderá mejor, y aparecerán otras detalles, ventajas y características de la misma aparecerán durante la lectura de la descripción siguiente realizada como ejemplo no limitativo en referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

5 - la figura 1 es una vista esquemática parcial en corte longitudinal de una unidad de torrefacción de acuerdo con una realización preferida de la invención;

10 - la figura 1a es una vista a mayor escala del detalle de la figura 1;

- la figura 2 es un gráfico que ilustra la relación entre la torrefacción máxima T_g^{max} y el diámetro d_p de las partículas de biomasa para tres valores de la relación H ;

15 - las figuras 3 y 4 son gráficos que ilustran, respectivamente para dos valores del diámetro d_p de las partículas de biomasa, la evolución del rendimiento másico final R de la torrefacción en función de la duración de la torrefacción t_r , para tres valores de la temperatura T_g de torrefacción;

20 - la figura 5 es una vista esquemática parcial lateral de un dispositivo de estimación experimental de la homogeneidad de la torrefacción en el interior de las partículas de biomasa torrefactadas;

- la figura 6 es una vista esquemática superior de una partícula de biomasa torrefactada, que ilustra un principio de medición aplicado mediante el dispositivo de la figura 5.

En el conjunto de estas figuras, las referencias idénticas pueden designar elementos idénticos o similares.

25 **Exposición detallada de realizaciones preferidas**

30 La figura 1 representa una unidad de torrefacción 10 de laboratorio, destinada a la torrefacción de partículas de biomasa sólida, por ejemplo de madera, y que comprende un reactor tubular 12, así como un elemento calefactor 14 formado por resistencias eléctricas que rodean el reactor 12 y que pueden alcanzar hasta aproximadamente 1000 °C.

35 El reactor 12 es de tipo doble envoltura, y comprende también un tubo exterior 16 de cuarzo y un tubo interior 18 igualmente de cuarzo y que se extiende por el interior del tubo exterior 16 desde un primer extremo 20 de este último hasta una parte intermedia del mismo, donde el tubo interior 18 tiene un extremo abierto 22. El extremo opuesto 24 del tubo interior sobresale del tubo exterior 16 y está conectado a un dispositivo de análisis 26. El primer extremo 20 del tubo exterior 16 está cerrado alrededor del tubo interior 18. El tubo exterior 16 incluye una primera parte 27a que contiene el primer extremo 20 del tubo 16 y está abierto a su extremo opuesto, así como una segunda parte 27b desmontable que contiene el extremo opuesto 28 del tubo 16. La segunda parte 27b del tubo 16 se puede conectar a la primera parte 27A del tubo mediante un empalme 27 como se ilustra en la figura 1.

40 El tubo exterior 16 incluye, cerca de cada uno de sus extremos opuestos 20 y 28, un empalme 30, 32 que tiene una fuente 33 de gas inerte a presión, tal como el dinitrógeno N_2 . Cada empalme 30, 32 está conectado a medios 34 de control y a medios 35 de medida del caudal de gas que entra en el reactor 12.

45 El segundo extremo 28 del tubo exterior 16 está provisto de un orificio de paso de una varilla 36 que tiene en su extremo insertado dentro del reactor 12, un portamuestras 40 provisto de un termopar 42. La varilla 36 se puede desplazar con un movimiento de traslación en dirección longitudinal, entre una posición retraída, en la que el portamuestras 40 está cercano al segundo extremo 28 del tubo exterior 16, y se encuentra en el exterior del mandrinado del elemento calefactor 14, y una posición desplegada, en la que el portamuestras está separado del segundo extremo 28 del tubo exterior 16, y se sitúa en el interior del mandrinado del elemento calefactor 14.

50 En el ejemplo ilustrado, la longitud del tubo exterior 16 es de aproximadamente 1290 mm y la del tubo interior 18 es de aproximadamente 850 mm. Además, el diámetro interno del tubo exterior 16 es de aproximadamente 70 mm y el del tubo interior 18 es de aproximadamente 55 mm. La extensión longitudinal del elemento calefactor 14 es de aproximadamente 620 mm.

55 La unidad de torrefacción 10 incluye además un dispositivo de gestión 44, representado muy esquemáticamente en la figura 1, y conectado, en la entrada, a los medios de medición del caudal 35, el termopar 42, tiene medios de medición de temperatura integrados en el elemento calefactor 14, y al dispositivo de análisis 26, y en la salida, a los medios de control del caudal 34 y al elemento calefactor 14.

60 El dispositivo de gestión 44 incluye un dispositivo 46 para medir el diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa. Este dispositivo de medición puede ser de cualquier tipo convencional, que funciona por ejemplo, a partir de mediciones ópticas y de algoritmos de procesamiento de imágenes, o a partir de captadores mecánicos. Este

dispositivo puede, en una variante, tomar la forma de una unidad de entrada que permite capturar un valor del diámetro previamente medido por un operario humano.

5 El dispositivo de gestión 44 incluye igualmente una unidad de cálculo 48 configurada para determinar, en función del diámetro promedio d_p y de la temperatura inicial T_p medidos para las partículas de biomasa, una temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} para la que la relación H entre un tiempo característico de la reacción de torrefacción y un tiempo característico de transferencia térmica en las partículas de biomasa sea igual a un valor mínimo H^{min} predefinido.

10 La relación H se define por la fórmula:

$$H = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}} + \min \left(\frac{\rho_p C p_p d_p}{6 h_{conv}}; \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 \omega_p \sigma (T_g + T_p)(T_g^2 + T_p^2)} \right)}$$

en la que:

- 15 - k_t es una constante de la reacción de torrefacción, que se considera como una reacción de primer orden;
- ρ_p es la densidad de las partículas de biomasa;
- 20 - $C p_p$ es el calor másico de estas partículas;
- $\lambda_{eff,p}$ es la conductividad térmica eficaz de estas partículas, dada por la fórmula:

$$\lambda_{eff,p} = \varepsilon_p \lambda_g + (1 - \varepsilon_p) \lambda_p$$

25 donde

- ε_p es la porosidad de las partículas de biomasa y λ_p es la conductividad térmica de dichas partículas;
- 30 - ω_p es la emisividad de dichas partículas;
- h_{conv} es el coeficiente de transferencia térmica externa entre dichas partículas y el gas inerte;
- 35 - σ es la constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Se debe indicar que el numerador de la fórmula anterior corresponde al tiempo característico de la reacción de torrefacción mientras que el denominador corresponde al tiempo característico de la transferencia térmica en el interior de las partículas de biomasa. El primer término de este denominador corresponde a un tiempo característico de la transferencia térmica por conducción y radiación en el interior de las partículas de biomasa mientras que el segundo término corresponde al mínimo de los tiempos característicos respectivos de las transferencias térmicas externas mediante convección y radiación.

45 La unidad de cálculo 48 determina la constante de la reacción k_t a partir de datos previamente registrados por uno o varios tipos de la biomasa a torrefactar, como esto parecerá más claro en lo sucesivo.

La unidad de cálculo 48 determina el coeficiente de transferencia térmica externa h_{conv} a partir de la correlación de Ranz-Marschall, según la fórmula:

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

50 en la que:

- Re_p es el número de Reynolds determinado por la fórmula: $Re_p = \frac{\rho_g \times V_g \times d_p}{\mu_g}$;
- 55 - Pr es el número de Prandtl determinado por la fórmula: $Pr = \frac{\mu_g \times C p_g}{\lambda_g}$;

y donde:

- 5 - ρ_g es la densidad del gas inerte;
- μ_g es la viscosidad de dicho gas;
- λ_g es la conductividad térmica de dicho gas;
- 10 - Cp_g es el calor másico de dicho gas;
- V_g es una velocidad de dicho gas con respecto a las partículas de biomasa.

La velocidad V_g se determina mediante la fórmula:

15

$$V_g = D_g / S_{18}$$

en la que D_g es el caudal total del gas inyectado en los empalmes 30 y 32, que puede ser, por ejemplo de aproximadamente 1 l/min, y S_{18} es la sección del tubo interior 18.

20

El dispositivo de gestión 44 incluye además una unidad de control 50 configurada para regular la temperatura de torrefacción T_g a un valor inferior o, preferentemente, igual, a la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} determinada por la unidad de cálculo 48.

25 Además, la unidad de cálculo 48 anteriormente citada está configurada para calcular una duración de torrefacción t_r para la que, teniendo en cuenta la temperatura de torrefacción T_g , el rendimiento másico final R de la torrefacción sea igual a un valor predeterminado.

30 A tal fin, la unidad de cálculo 48 comprende una memoria en la que se registran los datos experimentales que proporcionan el rendimiento másico final R que corresponden a diferentes tripletes {temperatura de torrefacción T_g ; duración de la torrefacción t_r ; diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa}. La unidad de cálculo está configurada, de esta forma, para determinar la duración de la torrefacción t_r por extrapolación a partir de estos datos previamente registrados.

35 La unidad de control 50 está configurada para interrumpir el tratamiento de torrefacción en el interior del reactor 12 al finalizar la duración del tratamiento de torrefacción t_r determinado por la unidad de cálculo 48.

40 El dispositivo de gestión 44 incluye además una unidad de entrada 52 que permite introducir el valor mínimo H^{min} de la relación H anteriormente mencionada y del rendimiento másico final R deseado para la torrefacción.

45 Preferentemente, la unidad de entrada permite obtener además el tipo de biomasa a torrefactar, en cuyo caso, la unidad de cálculo incluye una memoria en la que se almacenan los valores de los parámetros relativos a los diferentes tipos de biomasa, es decir, la constante de la reacción k_r , la densidad ρ_p , el calor másico Cp_p , la conductividad térmica eficaz $\lambda_{eff,p}$, y la emisividad ω_p . En una variante, la unidad de entrada se puede configurar para permitir la introducción directa de los valores respectivos de dichos parámetros, o de los parámetros que permitan su determinación.

50 Esto es análogo para los parámetros relativos al gas inerte, es decir, la densidad ρ_g de este, su viscosidad μ_g , su conductividad térmica λ_g , y su calor másico Cp_g .

55 La unidad de torrefacción 10 anteriormente descrita es una unidad destinada a usarse en un laboratorio con fines experimentales, para volúmenes de biomasa pequeños. Sin embargo, el experto en la materia puede adaptar fácilmente la descripción anterior a cualquier tipo de unidad de torrefacción, especialmente a escala industrial, para la torrefacción de volúmenes de biomasa grandes.

La unidad de torrefacción 10 anteriormente descrita puede utilizarse de la siguiente forma para la torrefacción de una muestra 54 de partículas de biomasa.

60 En un primer momento, la muestra 54 se puede pesar, en su caso, tras el secado hasta peso constante.

Tras poner en marcha el dispositivo de gestión 44, un operario introduce, mediante el dispositivo de entrada 52, el tipo de biomasa a torrefactar, el valor mínimo H^{min} de la relación H anteriormente citada, así como el valor del rendimiento másico final R deseado de la torrefacción.

La unidad de cálculo determina a continuación la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} compatible con estos valores, así como la duración de la torrefacción t_r correspondiente.

- 5 El dispositivo de gestión 44 ordena a continuación la puesta en marcha del elemento calefactor 14 y la regulación de su temperatura a partir de los medios de medición de temperatura integrados en dicho elemento calefactor.

10 Por otra parte, la segunda parte 27b del tubo exterior 16 se separa de la primera parte 27a del mismo, el operario coloca la muestra 54 sobre el portamuestras 40 que se encuentra en ese momento en el exterior del reactor 12. El operario conecta a continuación la segunda parte 27b del tubo exterior 16 a la primera parte 27a del mismo, y pone el portamuestras 40 al lado del segundo extremo 28 del tubo exterior, en el exterior de la región rodeada por el elemento calefactor 14, y manteniendo la varilla 36 en su posición retraída.

- 15 El dispositivo de gestión 44 activa los medios de control del caudal 34 y la fuente de gas inerte 33 de forma que el gas presurizado penetra constantemente por los empalmes 30 y 32 del tubo exterior 16 del reactor 12. Un caudal de gas equivalente sale, de esta forma, en dirección al dispositivo de análisis 26, para purgar el reactor 12.

20 El gas inyectado en el reactor 12 mediante el empalme 30 situado cerca del primer extremo 20 del tubo exterior 16 se recalienta entre los tubos exterior 16 e interior 18 antes de alcanzar una región intermedia del reactor 12 rodeada por el elemento calefactor 14. El gas inyectado en el reactor 12 mediante el otro empalme 32 permite al gas interactuar con la muestra 54 para mantener su temperatura inicial anterior al inicio de la torrefacción e impedir, de esta forma, que el tratamiento térmico de la muestra 54 se inicie de forma no controlada. Se debe indicar que el caudal de gas inyectado por este otro empalme 32 es preferentemente igual a un tercio del caudal total de gas inyectado en el reactor 12 mediante los dos empalmes 30 y 32. El dispositivo de gestión 44 regula el elemento calefactor 14 de forma que la temperatura del gas en el interior del reactor 12, determinada por los medios de medición de temperatura integrados en el elemento calefactor 14, permanece constantemente igual a una temperatura de torrefacción T_g que puede ser inferior, o preferentemente igual, a la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} determinada anteriormente.

- 30 Cuando el dispositivo de análisis 26 indica al dispositivo de gestión 44 que la tasa de dióxígeno presente en el interior del reactor 12 es suficientemente baja, de forma que el reactor está lleno de un medio gaseoso inerte adecuado para la torrefacción, y si la temperatura del gas ha alcanzado la temperatura de torrefacción T_g , la varilla 36 está desplazada en un movimiento de traslación desde su posición desplegada ilustrada en la figura 1, bien manualmente por un operario humano, bien automáticamente mediante un dispositivo robotizado previsto a tal fin (no representado en la figura 1).

40 La regulación de temperatura del elemento calefactor 14 puede desde ese momento basarse en una medida de la temperatura realizada mediante el termopar 42 situado lo más cerca posible de la muestra 40 para tener una precisión máxima. La medida de temperatura puede realizarse, por supuesto, por cualquier medio adecuado en el marco de la presente invención.

45 Al cabo de una duración igual a la duración de la torrefacción t_r determinada anteriormente, la varilla 36 se desplaza hacia su posición retraída, bien manualmente por el operario humano, bien automáticamente mediante el dispositivo robotizado anteriormente citado.

A continuación se va a describir la aplicación particular del proceso de torrefacción anteriormente descrito a la torrefacción de partículas de haya.

50 Para este material, los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la relación H son, por ejemplo:

- $\rho_p = 710 \text{ Kg.m}^{-3}$;
- $C_{pp} = 1522 \text{ J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$;
- 55 - $\lambda_p = 0,112 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$;
- $\varepsilon_p = 0,7$;
- $\omega_p = 0,9$

60 Además, la constante de reacción k_t se determina de acuerdo con los trabajos de Di Blasi y Branca presentados en el artículo Di Blasi, C. y C. Branca (2001): "Kinetics of Primary Product Formation from Wood Pyrolysis.", Industrial & Engineering Chemistry Research 40(23): 5547-5556.

Esta constante de reacción k_t se estima, simplemente, mediante la fórmula:

$$k_t = 4,38 \cdot 10^9 e^{-141200/R.T_g}$$

- 5 Si el gas utilizado es el dinitrógeno N_2 , los valores de los parámetros correspondientes son bien conocidas del experto en la materia. Se recuerda que la conductividad térmica de dicho gas se obtiene mediante la fórmula:

$$\lambda_g = \frac{\mu_g}{M_g} \left[1,3(Cp_g M_g - R) + 14644 - \frac{2928,8}{T_g/T_{c_g}} \right]$$

10 en la que:

- M_g es el peso molar del gas, igual a 0,028 kg/mol;
- R es la constante de los gases perfectos, igual a 8,3145 J/(mol.K);
- 15 - T_{c_g} es la temperatura crítica del gas (-146 °C);
- Cp_g es el calor másico del gas, que se obtiene mediante la fórmula:

$$Cp_g = \frac{6,5 + 0,001T_g}{M_g} * 4,18$$

20 La figura 2 representa tres curvas que ilustran la relación entre la temperatura de torrefacción T_g y el diámetro promedio dp de las partículas de biomasa para que la relación H calculada por la fórmula anterior sea igual, respectivamente, a 2, 5 y 10, en el caso de las partículas de haya torrefactadas con dinitrógeno N_2 , estando dichas partículas inicialmente a una temperatura $T_p = 25$ °C.

Este tipo de gráfico ilustra el principio aplicado en el dispositivo de gestión 44 anteriormente descrito que consiste en determinar la temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} garantizando un nivel mínimo de homogeneidad H^{min} previamente definido, en función del diámetro promedio dp de las partículas de biomasa.

Las figuras 3 y 4 ilustran los datos previamente grabados en el dispositivo de gestión 44, que permiten determinar, mediante extrapolación, la duración de la torrefacción t_r en función de la temperatura de torrefacción T_g y del rendimiento másico final R deseado (en base seca).

35 Como información, estos datos se pudieron obtener experimentalmente mediante la unidad de torrefacción 10 anteriormente descrita, ajustando manualmente la temperatura de torrefacción T_g y la duración de la torrefacción t_r en diferentes ensayos, y midiendo cada vez el rendimiento másico R obtenido al finalizar la torrefacción.

40 La figura 3 se refiere a experimentos realizados con partículas de diámetro promedio igual a 10 mm, mientras que la figura 4 se refiere a experimentos realizados con partículas de diámetro promedio igual a 5 mm. En los dos casos, se sometieron a ensayo tres valores de la temperatura de torrefacción T_g , es decir 300 °C, 325 °C y 350 °C.

45 Estos experimentos permitieron validar la fórmula utilizada para el cálculo de la constante de reacción k_t y, por tanto, del tiempo característico de la reacción de torrefacción, a partir del modelo cinético de Di Blasi y Branca que se ha explicado anteriormente. Efectivamente, la diferencia entre el rendimiento teórico proporcionado por este modelo, y el rendimiento determinado experimentalmente es, de media, un 4 % para las partículas de 5 mm de diámetro de diámetro, y del 8 % de media para las partículas de 10 mm.

50 Además, se utilizó un segundo termopar en estos experimentos. Este termopar se colocó en el interior de una partícula de biomasa. La comparación entre la temperatura del interior de la partícula medida con este termopar, y la temperatura del gas inerte medida con el termopar 42 descrito anteriormente permitió determinar experimentalmente el tiempo de recalentamiento de la partícula. Estas medidas han permitido validar el cálculo del tiempo característico de transferencia térmica explicado anteriormente, ya que la diferencia entre dicho tiempo característico y el tiempo medido experimentalmente representa, de promedio, el 10 % del tiempo medido experimentalmente para las partículas que tienen 5 mm y, en promedio, un 7 % del tiempo medido experimentalmente medido para las partículas de 10 mm.

60 Los gráficos de las figuras 3 y 4 muestran además que la torrefacción se puede realizar rápidamente, en menos de 9 minutos para los dos tamaños de partículas analizadas sometidos a ensayo, con una pérdida de masa inferior al 30 %.

Evidentemente, se pueden grabar en el dispositivo de gestión 44 los datos obtenidos en un número mayor de experimentos para aumentar la precisión del cálculo de la duración de torrefacción t_r .

5 Al finalizar las experiencias del tipo anteriormente descrito, se puede verificar la homogeneidad de la torrefacción en el interior de las partículas de biomasa usando medidas y comparando los resultados proporcionados por el cálculo anteriormente descrito.

La figura 5 ilustra un dispositivo de análisis que permite llevar a cabo mediciones de ese tipo.

10 El principio de dicho dispositivo de análisis se basa en la medición de la profundidad de penetración, en las partículas de haya torrefactadas, de un punzón que está sometido a una carga dada.

Las partículas de haya torrefactadas previamente se cortan de forma que permitan una medida sobre una superficie plana, en el centro y en la periferia de la muestra.

15 Cada muestra 54' así obtenida se mantiene estable sobre una pieza de metal 110 pegada. En un primer momento, el punzón 112 se lleva hasta la superficie de la muestra; como referencia de los análisis, se aplica una pretensión medida mediante un captador de fuerza 114, a continuación, se aplica una carga superior, y la introducción del punzón 12 resultante se mide mediante el comparador.

20 Esta medida se repite en varios puntos 115 en un eje longitudinal 116 de la muestra 116 (figura 6), es decir "en el núcleo", y en la periferia, a 2 mm del borde, de forma que se compare el efecto del tratamiento térmico en la superficie y en el centro. Se pueden realizar ventajosamente varias medidas sobre el mismo eje para obtener un valor medio de la penetración, y constatar la heterogeneidad del material de la muestra. No se deberían realizar estas medidas en las zonas del extremo 118 de la muestra debido al efecto del borde.

De una manera general, se ha descrito anteriormente una aplicación particular de los dispositivos y procedimientos de torrefacción de acuerdo con la invención partículas de haya, pero es evidente que la invención se puede aplicar a cualquier tipo de partículas de biomasa.

30 En particular, la invención se puede aplicar a todos los tipos de madera, a todas las frondosas, como la haya, y también a las resinosas. Estas últimas tienen, claramente, una reactividad inferior a la del haya, y permiten, por tanto, obtener más fácilmente valores elevados para la relación H que se traduce en la homogeneidad de la reacción de torrefacción.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de gestión de una unidad (10) de torrefacción para la torrefacción de partículas (54) de biomasa, preferentemente lignocelulósica, para una duración de la torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g , estando dicho procedimiento caracterizado porque comprende las etapas sucesivas de:
- medida de un diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa;
 - en función del diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa, cálculo de una temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} para la que una relación H entre un tiempo característico de la reacción de torrefacción y un tiempo característico de transferencia térmica para las partículas de biomasa es igual a un valor mínimo H^{min} predefinido;
 - regulación de la temperatura de torrefacción T_g de dicho fluido a un valor inferior o igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} ;
 - regulación de la duración de la torrefacción t_r a un valor tal que el rendimiento másico final R de la torrefacción sea igual a un valor diana predefinido.
2. Procedimiento de gestión de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la temperatura de torrefacción T_g se regula igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max}
3. Procedimiento de gestión de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que dicho valor mínimo H^{min} previamente definido de dicha relación H es superior o igual a 2, preferentemente superior o igual a 5, y aún más preferentemente superior o igual a 10.
4. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho valor diana del rendimiento másico final R de la torrefacción es superior o igual al 60 %, preferentemente del 70 %, y más preferentemente del 80 %.
5. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha temperatura de torrefacción T_g está comprendida en el intervalo 300 °C - 400 °C, preferentemente en el intervalo 300 °C - 350 °C, y aún más preferentemente en el intervalo 325 °C - 350 °C.
6. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha duración de la torrefacción t_r es inferior a 15 minutos, preferentemente inferior a 10 minutos, aún más preferentemente inferior a 5 minutos.
7. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} se determina en función de dicho valor mínimo H^{min} de dicha relación según la fórmula:

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C_{p,p} d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}}}$$

- en la que:
- k_t es una constante de la reacción de torrefacción, que se considera como una reacción de primer orden;
 - ρ_p es la densidad de la biomasa;
 - $C_{p,p}$ es el calor másico de la biomasa;
 - $\lambda_{eff,p}$ es la conductividad térmica eficaz de la biomasa.
8. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} se determina en función de dicho valor mínimo H^{min} de dicha relación según la fórmula:

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}} + \min\left(\frac{\rho_p C p_p d_p}{6 h_{conv}}; \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 \omega_p \sigma (T_g^{max} + T_p)(T_g^{max^2} + T_p^2)}\right)}$$

en la que:

- 5 - k_t es una constante de la reacción de torrefacción, que se considera como una reacción de primer orden;
- ρ_g es la densidad de la biomasa;
- Cp_p es el calor másico de la biomasa;
- 10 - $\lambda_{eff,p}$ es la conductividad térmica eficaz de la biomasa;
- ω_p es la emisividad de la biomasa;
- 15 - h_{conv} es el coeficiente de transferencia térmica externa entre la biomasa y dicho fluido;
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann;
- T_p es la temperatura inicial de las partículas de biomasa antes de la torrefacción.
- 20 9. Procedimiento de gestión de acuerdo con la reivindicación anterior, en el que dicho coeficiente de transferencia térmica externa h_{conv} se determina a partir de la correlación de Ranz-Marschall, según la fórmula:

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

25 en la que:

- Re_p es el número de Reynolds determinado por la fórmula: $Re_p = \frac{\rho_g \times V_g \times d_p}{\mu_g}$;

30 - Pr es el número de Prandtl determinado por la fórmula: $Pr = \frac{\mu_g \times Cp_g}{\lambda_g}$;

donde:

35 - ρ_p es la densidad del fluido;

- μ_g es la viscosidad del fluido;

- λ_g es la conductividad térmica del fluido;

40 - Cp_g es el calor másico del fluido;

- V_g es una velocidad del fluido con respecto a las partículas de biomasa.

45 10. Procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la duración de la torrefacción t_r se determina en función de la temperatura de torrefacción T_g y del valor diana del rendimiento másico final R de la torrefacción, mediante datos experimentales de correlación ya establecidos.

50 11. Procedimiento de torrefacción de partículas de biomasa (54), preferentemente de biomasa lignocelulósica, para una duración de la torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g en el interior de una unidad de torrefacción (10), caracterizado porque comprende la gestión de dicha unidad de torrefacción (10) mediante un procedimiento de gestión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

55 12. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el diámetro promedio d_p de las partículas de biomasa es inferior a 40 mm, preferentemente inferior a 20 mm, aún más preferentemente inferior a 10 mm.

13. Dispositivo (44) de gestión de la unidad (10) de torrefacción para la torrefacción de partículas de biomasa para una duración de la torrefacción t_r en un fluido llevado a una temperatura de torrefacción T_g , estando el dispositivo de gestión caracterizado porque comprende:

- 5 - medios de medición (46) de un diámetro promedio d_p de partículas de biomasa (54);
- medios de cálculo (48) configurados para determinar, en función del diámetro promedio d_p medido de las partículas de biomasa, una temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} para la que la relación H entre un tiempo característico de la reacción de torrefacción y un tiempo característico de transferencia térmica en las partículas de biomasa sea igual a un valor mínimo H^{min} predefinido;
- 10 - medios de gestión (50) configurados para regular dicha temperatura de torrefacción T_g a un valor inferior o igual a dicha temperatura de torrefacción máxima T_g^{max} ;
- 15 - medios de cálculo y de gestión (48, 50) configurados para regular dicha duración de la torrefacción t_r a un valor tal que el rendimiento másico final R de la torrefacción sea igual a un valor predeterminado.

14. Dispositivo de gestión de acuerdo con la reivindicación 13, que comprende además medios (52) de prerregulación de dicho valor mínimo H^{min} de dicha relación H y/o medios de prerregulación del rendimiento másico final R de la torrefacción.

20

15. Unidad (10) de torrefacción para la torrefacción de partículas de biomasa para una duración de la torrefacción t_r en un gas llevado a una temperatura de torrefacción T_g , caracterizado porque comprende un dispositivo de gestión (44) de acuerdo con la reivindicación 13 o 14, así como medios de calentamiento (14) para llevar dicho gas a la temperatura de torrefacción T_g fijada por dicho dispositivo (44), durante un tiempo igual a la duración de torrefacción t_r fijada por dicho dispositivo (44).

25

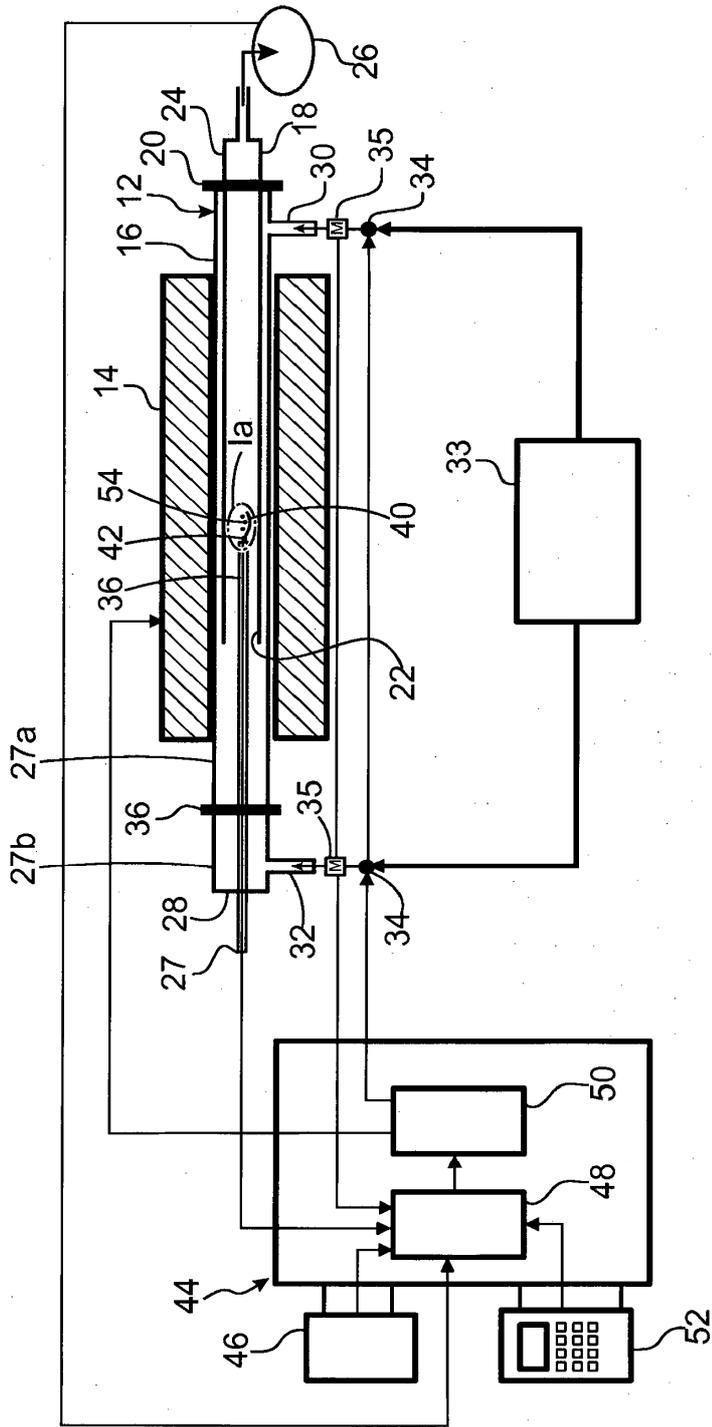


FIG.1

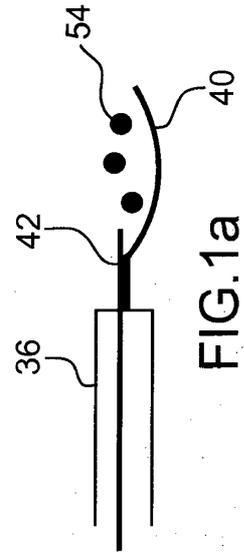


FIG.1a

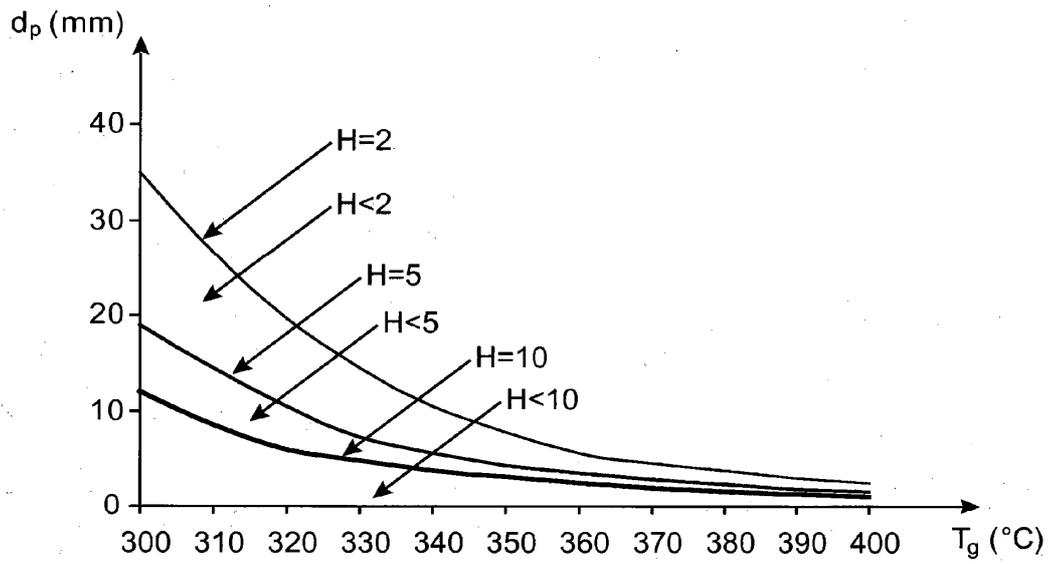


FIG.2

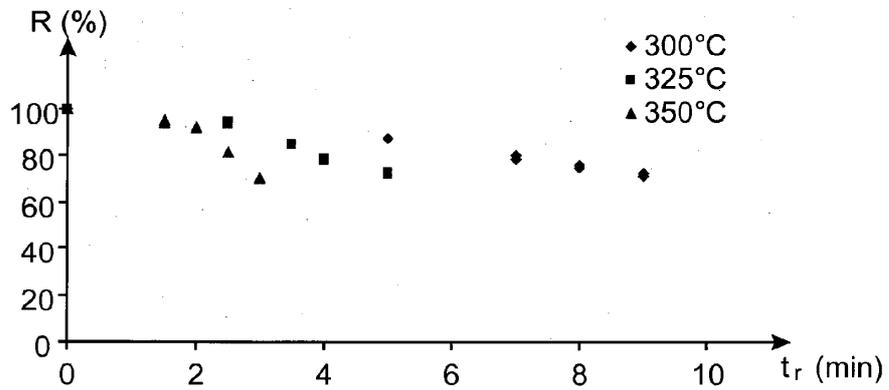


FIG.3

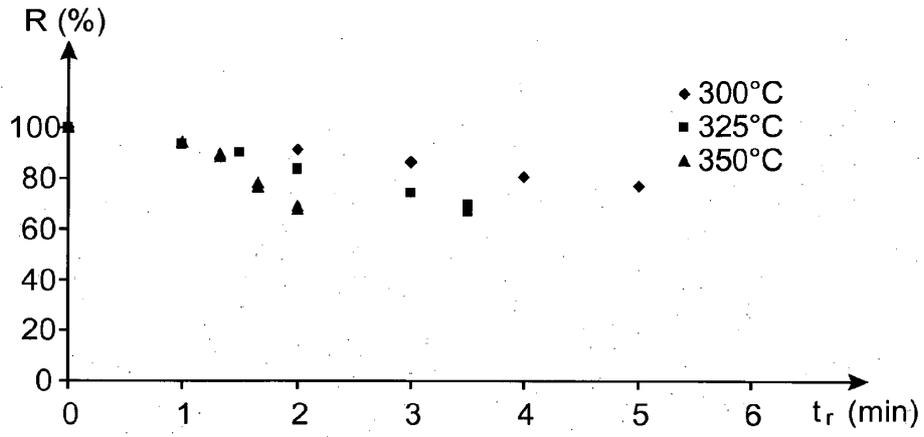


FIG. 4

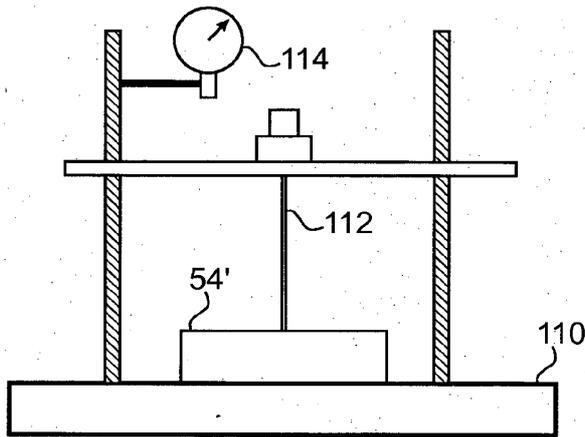


FIG. 5

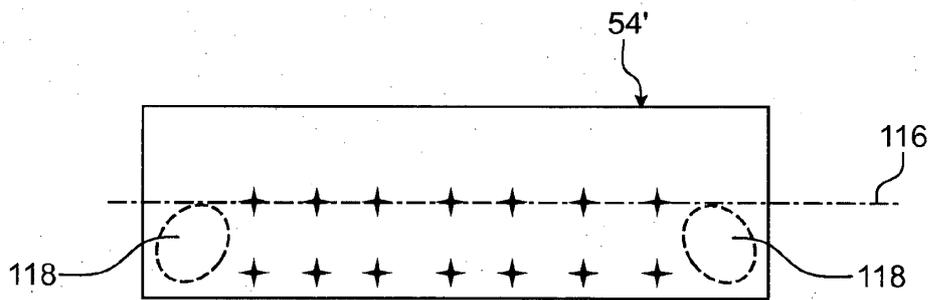


FIG. 6