



## (12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 34664 B1**
- (43) Date de publication : **02.11.2013**
- (51) Cl. internationale :  
**C10J 3/46; C10J 3/48;  
F03G 6/06; B01J 19/12;  
F24J 2/34; F28D 13/00;  
B01J 8/32; F24J 2/07;  
F22B 1/00; B01J 8/00;  
B01J 8/38; C09K 5/10;  
F24J 2/24; F28D 20/00;  
F24J 2/46**

- 
- (21) N° Dépôt :  
**35899**
- (22) Date de Dépôt :  
**13.05.2013**
- (30) Données de Priorité :  
**20.10.2010 FR 1058565**
- (86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT :  
**PCT/FR2011/052386 13.10.2011**
- (71) Demandeur(s) :  
• **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, 3, rue Michel-Ange F-75016 Paris (FR)**  
• **INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 6 Allée Emile Monso F-31029 Toulouse (FR)**
- (72) Inventeur(s) :  
**FLAMANT, Gilles ; HEMATI, Mehrdji**
- (74) Mandataire :  
**ABU-GHAZALEH INTELLECTUAL PROPERTY (TMP AGENTS)**

---

(54) Titre : **DISPOSITIF COLLECTEUR D'ENERGIE SOLAIRE**

- (57) Abrégé : L'invention a pour objet un dispositif (1) collecteur d'énergie solaire, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un récepteur solaire (2) comprenant au moins une suspension de particules solides fluidisées par un gaz, chaque suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur (2), le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150  $\mu$ m.

RESUME

L'invention a pour objet un dispositif (1) collecteur d'énergie solaire, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un récepteur solaire (2) comprenant au moins une suspension de particules solides fluidisées par un gaz, chaque suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur (2), le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150  $\mu\text{m}$ .

**DISPOSITIF COLLECTEUR D'ÉNERGIE SOLAIRE**

La présente invention a pour objet un dispositif collecteur d'énergie solaire. Elle concerne en particulier un dispositif comprenant au moins une suspension dense de particules fluidisées par un gaz.

L'exploitation rationnelle de l'énergie solaire nécessite le stockage d'une partie de la chaleur produite aux heures d'ensoleillement pour pouvoir la restituer aux heures de consommation, ou tout au moins pour assurer la continuité du fonctionnement pendant les passages nuageux.

Pour ce stockage de la chaleur, il est connu d'utiliser le même fluide que celui mis en œuvre comme fluide de transfert thermique (par exemple un sel fondu).

On peut ainsi utiliser de la vapeur comme fluide de transfert thermique. Cette solution a toutefois pour inconvénient une température de fonctionnement limitée.

On peut également utiliser comme fluide de transfert thermique des huiles de synthèse ou des mélanges de sels fondus, et notamment les mélanges de nitrate de potassium et de nitrate de sodium. L'utilisation d'huiles de synthèses ou de sels fondus a pour inconvénient d'être dangereuse et de présenter une toxicité élevée.

On a ainsi pensé à utiliser des suspensions de particules solides pour absorber le rayonnement solaire, mais cette solution n'a pas été satisfaisante, notamment en raison de la faible densité des suspensions réalisées et des pertes d'énergie importantes liées à la compression de l'air nécessaire à la mise en suspension.

La présente invention vise à remédier à ces inconvénients.

Elle propose en particulier un dispositif collecteur d'énergie solaire utilisant un fluide non toxique et non dangereux et qui permet de transporter des quantités de chaleur élevées.

L'invention a ainsi pour objet un dispositif collecteur d'énergie solaire.

Le dispositif selon l'invention comprend au moins un récepteur solaire comprenant au moins une suspension de particules solides fluidisées par un gaz, chaque suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur,

le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150  $\mu\text{m}$ .

Le volume des particules peut être compris entre 45 et 50% du volume  
5 de la suspension.

La masse volumique de la suspension peut être comprise entre 1250 et 2000  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Les particules peuvent être des particules inertes de sable, de carbure de silicium, d'alumine, des particules métalliques, des particules d'oxydes, de  
10 carbures ou de nitrures métalliques ou des particules réactives.

Dans le cas où les particules sont des particules réactives, le récepteur solaire peut être également un réacteur dans lequel se produit un traitement thermique du solide ou une réaction solide-gaz telle que le séchage, la déshydratation, la décomposition, la décarbonatation ou la réduction.

Les particules peuvent être un mélange de particules inertes  
15 chimiquement et de particules réactives et le récepteur solaire peut être également un réacteur dans lequel se produit une réaction de valorisation de produits organiques telle que pyrolyse et gazéification.

Le débit des particules solides est avantageusement compris entre 18  
20 et 200  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Chaque suspension peut être confinée dans un ou plusieurs tubes.

Chaque tube peut être un tube opaque en matériau métallique ou céramique.

Chaque suspension de particules fluidisées peut être en écoulement  
25 vertical ascendant ou descendant.

Le dispositif peut comprendre un élément de stockage destiné à stocker les particules chauffées issues du récepteur solaire, ledit élément de stockage alimentant un échangeur de chaleur à lit fluidisé.

L'échangeur de chaleur à lit fluidisé peut alimenter en vapeur une  
30 turbine à vapeur.

L'échangeur de chaleur à lit fluidisé peut alimenter une turbine à gaz.

L'invention a également pour objet l'utilisation d'un dispositif décrit ci-dessus pour une hybridation entre énergie solaire et biomasse.

L'invention a également pour objet un procédé de stockage d'énergie solaire.

Le procédé selon l'invention comprend une étape de mise en œuvre, dans un récepteur solaire, d'au moins une suspension de particules solides  
5 fluidisées par un gaz, chaque suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur, le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150  $\mu\text{m}$ .

Le procédé peut être mis en œuvre dans un dispositif décrit ci-dessus.

10 D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante donnée à titre d'exemple illustratif et non limitatif et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 illustre schématiquement un dispositif collecteur d'énergie  
15 solaire selon l'invention, mettant en œuvre des particules comme fluide de transfert et comme matériau de stockage de la chaleur,

- la figure 2 illustre un dispositif selon un premier mode de réalisation,

- la figure 3 illustre un dispositif selon un deuxième mode de réalisation, et

20 - les figures 4 et 5 illustrent les possibilités de mise en œuvre du dispositif dans un récepteur solaire.

Le dispositif 1, tel qu'illustré à la figure 1, comprend un récepteur solaire 2 utilisant des suspensions denses de particules dans un gaz en écoulement vertical, ascendant ou descendant, dans des tubes qui constituent  
25 les éléments actifs du récepteur 2. Ces tubes, métalliques ou céramiques, sont soumis à un rayonnement solaire concentré à l'aide de moyens de concentration 3, par exemple à l'aide d'un champ d'héliostats.

Le rayonnement absorbé par les tubes est transmis par conduction vers la suspension qui s'échauffe au contact des parois chaudes. Cette  
30 suspension circule entre l'entrée et la sortie du récepteur solaire 2 et assure ainsi le transport de l'énergie absorbée vers un ensemble de stockage et de conversion d'énergie. Cet ensemble de « stockage-conversion » comprend un élément 4 de stockage chaud connecté à la sortie du récepteur solaire 2.

L'élément 4 de stockage chaud est destiné à stocker les particules chauffées issues du récepteur solaire 2 et peut alimenter un échangeur de chaleur 5 à lit fluidisé dans lequel les particules cèdent leur énergie à des tubes immergés dans lesquels est chauffé un fluide de travail, par exemple de la vapeur, cette 5 vapeur pouvant être détendue dans une turbine à vapeur 6. Le fluide de travail peut également être un gaz, dans ce cas on utilisera une turbine à gaz. Une turbine est un dispositif classique de production d'électricité.

Les particules refroidies sont évacuées de l'échangeur 5, les particules circulant de manière continue, et sont dirigées vers un élément 7 de stockage 10 froid qui est connecté à l'entrée du récepteur solaire 2.

La suspension de particules utilisée dans le récepteur solaire 2 est mise en mouvement par un gaz dans un tube ou tout autre contenant équivalent.

La taille moyenne des particules de la suspension est comprise entre 15 20 et 150  $\mu\text{m}$ . On peut par exemple utiliser des particules du groupe A de la classification de Geldart. La taille moyenne des particules peut par exemple être déterminée par granulométrie laser.

La taille moyenne des particules est suffisamment petite pour éviter une fluidisation hétérogène, et suffisamment grande pour éviter la formation 20 d'agrégats et une mauvaise fluidisation. Cette taille moyenne de particules permet en outre de réaliser la mise en fluidisation de la suspension avec des vitesses de gaz faibles, de l'ordre de quelques cm/s. Cette propriété constitue un avantage par rapport aux solutions classiques de mise en suspension des 25 particules par lit circulant qui nécessitent des vitesses de gaz de l'ordre de plusieurs m/s, car la dépense énergétique due à la compression du gaz est réduite.

Il s'agit d'une suspension dense de particules, c'est-à-dire dont la porosité est égale à celle au minimum de fluidisation, et qui est comprise entre 40 et 55%, et de préférence entre 45 et 50%. La porosité est suffisamment 30 petite pour fluidiser les particules et suffisamment grande pour éviter la formation d'un lit dilué avec un transport de chaleur et un échange thermique avec la paroi faibles.

Dans ces conditions, la masse volumique de la suspension est avantageusement comprise entre 1250 et 2000 kg/m<sup>3</sup>. Par exemple, la masse volumique du sable étant de 2500 kg/m<sup>3</sup>, une suspension de particules de sable ayant une porosité de 50% aura une masse volumique de 1250 kg/m<sup>3</sup>,  
5 soit une masse volumique environ 1000 fois supérieure à celle de l'air à pression atmosphérique. En conséquence, la quasi-totalité de l'énergie est transportée par le solide et le milieu possède les propriétés d'un quasi-liquide.

Le débit des particules solides est avantageusement compris entre 18 et 200 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. Il est ainsi suffisamment petit pour procurer une bonne  
10 conduction et pour éviter les pertes de charge liées à la puissance de pompage de l'air, et suffisamment grand pour éviter la surchauffe des tubes et ainsi sécuriser le dispositif.

Le coefficient d'échange local entre la paroi recevant le rayonnement solaire concentré et la suspension de particules peut être de l'ordre de 500 à  
15 1000 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>, soit un coefficient environ 10 fois supérieur au coefficient d'échange entre un gaz et une paroi et du même ordre de grandeur que celui entre un liquide et une paroi.

Le récepteur solaire 2 peut comprendre un ou plusieurs échangeurs multitubulaires qui sont les modules absorbeurs du récepteur 2. Les parois des  
20 tubes dont le diamètre est par exemple compris entre 30 mm et 100 mm sont chauffées par le rayonnement solaire alors qu'à l'intérieur des tubes circule la suspension dense de particules solides. Les rangées des tubes peuvent être remplacées par des lits fluidisés de forme parallélépipède de faible épaisseur.

Deux configurations pour la réalisation du récepteur solaire 2 sont  
25 envisageables.

Dans un premier mode de réalisation, la suspension est en écoulement vertical descendant. Suivant les conditions opératoires envisagées, deux régimes d'écoulement de la suspension gaz-solide peuvent être observés : un échangeur à écoulement dense descendant fluidisé ou un lit mobile.

30 Ce premier mode de réalisation est illustré à la figure 2, sur laquelle les éléments identiques à ceux de la figure 1 portent les mêmes références. A l'entrée du récepteur 2, un bac tampon fluidisé 8 alimente un faisceau de tubes. En sortie du récepteur 2, un lit fluidisé récupère les particules solides

chaudes avant de les acheminer vers le bac de stockage chaud 4. Le bac tampon 8 est alimenté en particules par un bac d'alimentation 9. Le bac d'alimentation 9 est également fluidisé par de l'air, de manière à créer un mouvement de particules et à homogénéiser la température des particules.

5 La suspension de particules s'écoule ainsi de haut en bas, depuis le bac tampon 8 vers l'extrémité inférieure du récepteur 2.

Dans cette configuration, le débit des particules solides ainsi que le débit résiduel de l'air dans les tubes sont contrôlés grâce au réglage de la pression dans le bac de stockage chaud 4. Suivant la valeur de la vitesse de glissement locale, qui est la différence entre la vitesse des particules et la

10 vitesse du gaz, on peut réaliser l'opération en :

- lit mobile (vitesse de glissement < vitesse minimale de fluidisation),
- écoulements denses descendants fluidisés homogènes (vitesse minimale de fluidisation < vitesse de glissement < vitesse minimale de

15 bullage),

- écoulements denses descendants fluidisés à bulles (vitesse de glissement > vitesse minimale de bullage).

Dans un deuxième mode de réalisation, tel qu'illustré à la figure 3, la suspension est en écoulement vertical ascendant. Les particules circulent

20 depuis le bac d'alimentation 9 en direction du lit fluidisé situé à l'extrémité inférieure du récepteur solaire 2, puis remontent dans les tubes du récepteur 2 en direction du bac tampon 8 situé à l'extrémité supérieure du récepteur 2. Les particules chauffées dans le récepteur 2 circulent ensuite depuis le bac tampon 8 jusqu'au bac de stockage chaud 4 situé sous le récepteur 2.

25 La figure 4 montre la mise en œuvre du dispositif dans un récepteur solaire, par exemple selon le premier mode de réalisation (il peut également être adapté au second mode). Le dispositif 1 peut ainsi comprendre quatre modules récepteurs solaires 2, alimentés par un unique bac d'alimentation 9. Les particules réchauffées par les récepteurs solaires 2 sont acheminées vers

30 un unique bac de stockage chaud 4. Les récepteurs solaires 2 peuvent être éclairés par un champ d'héliostats circulaire ou nord-sud (récepteur de type cavité) comme illustré sur la figure 5.



Ainsi, conformément à l'invention, les suspensions denses de particules solides fluidisées par un gaz permettent des températures de fonctionnement élevées, supérieures ou égales à 600°C, idéales pour les centrales et réacteurs solaires de production d'électricité ou de chaleur, ainsi que pour le chauffage  
5 solaire de réacteurs chimiques pour la production, par exemple, d'hydrogène.

Le dispositif selon l'invention présente ainsi de nombreux avantages :

- maîtriser la consommation parasite d'énergie de compression d'air nécessaire à la mise en suspension,
- opérer à des températures supérieures à celles des fluides de  
10 transfert classiques tels que les sels fondus ou la vapeur dont la température limite d'utilisation est d'environ 550°C,
- utiliser un quasi fluide non toxique et non dangereux par rapport aux fluides de transfert utilisés classiquement dans les centrales solaires, comme les huiles de synthèse et les sels fondus qui sont respectivement inflammables  
15 et comburants,
- mettre en œuvre un milieu pouvant servir à la fois de fluide de transfert et de matériau de stockage.

Le dispositif selon l'invention permet en outre de réaliser aisément une hybridation entre énergie solaire et biomasse à travers un échangeur/réacteur  
20 à lit fluidisé mis en œuvre pour produire de la vapeur.

De plus, de telles suspensions peuvent aussi servir à chauffer un réacteur chimique dans lequel sont réalisées des réactions endothermiques, tels que des cycles thermochimiques de production d'hydrogène par voie solaire ou le traitement de solides.

25

**REVENDICATIONS**

1. Dispositif (1) collecteur d'énergie solaire, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un récepteur solaire (2) comprenant au moins une suspension de particules solides fluidisées par un gaz, chaque  
5 suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur (2), le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150  $\mu\text{m}$ .
2. Dispositif (1) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le volume  
10 des particules est compris entre 45 et 50% du volume de la suspension.
3. Dispositif (1) selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la masse volumique de la suspension est comprise entre 1250 et 2000  $\text{kg/m}^3$ .
4. Dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce  
15 que les particules sont des particules inertes de sable, de carbure de silicium, d'alumine, des particules métalliques, des particules d'oxydes, de carbures ou de nitrures métalliques ou des particules réactives.
5. Dispositif (1) selon la revendication 4, caractérisé en ce que les  
20 particules sont des particules réactives et en ce que le récepteur solaire (2) est également un réacteur dans lequel se produit un traitement thermique du solide ou une réaction solide-gaz telle que le séchage, la déshydratation, la décomposition, la décarbonatation ou la réduction.
6. Dispositif (1) selon la revendication 5, caractérisé en ce que les  
25 particules sont un mélange de particules inertes chimiquement et de particules réactives et en ce que le récepteur solaire (2) est un réacteur dans lequel se produit une réaction de valorisation de produits organiques telle que pyrolyse et gazéification.

7. Dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le débit des particules solides est compris entre 18 et 200 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.
8. Dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que chaque suspension est confinée dans un ou plusieurs tubes.
- 5 9. Dispositif (1) selon la revendication 8, caractérisé en ce que chaque tube est un tube opaque en matériau métallique ou céramique.
10. Dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que chaque suspension de particules fluidisées est en écoulement vertical ascendant ou descendant.
- 10 11. Dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce qu'il comprend un élément de stockage (4) destiné à stocker les particules chauffées issues du récepteur solaire (2), ledit élément de stockage (4) alimentant un échangeur de chaleur (5) à lit fluidisé.
- 15 12. Dispositif (1) selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'échangeur de chaleur (5) à lit fluidisé alimente en vapeur une turbine à vapeur (6).
13. Dispositif (1) selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'échangeur de chaleur (5) à lit fluidisé alimente une turbine à gaz (6).
- 20 14. Utilisation d'un dispositif (1) selon l'une des revendications 1 à 13 pour une hybridation entre énergie solaire et biomasse.
- 25 15. Procédé de stockage d'énergie solaire, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de mise en œuvre, dans un récepteur solaire (2), d'au moins une suspension de particules solides fluidisées par un gaz, chaque suspension circulant entre une entrée et une sortie du récepteur (2), le volume des particules étant compris entre 40 et 55% du volume de la suspension, la taille moyenne des particules étant comprise entre 20 et 150 μm.

1/3

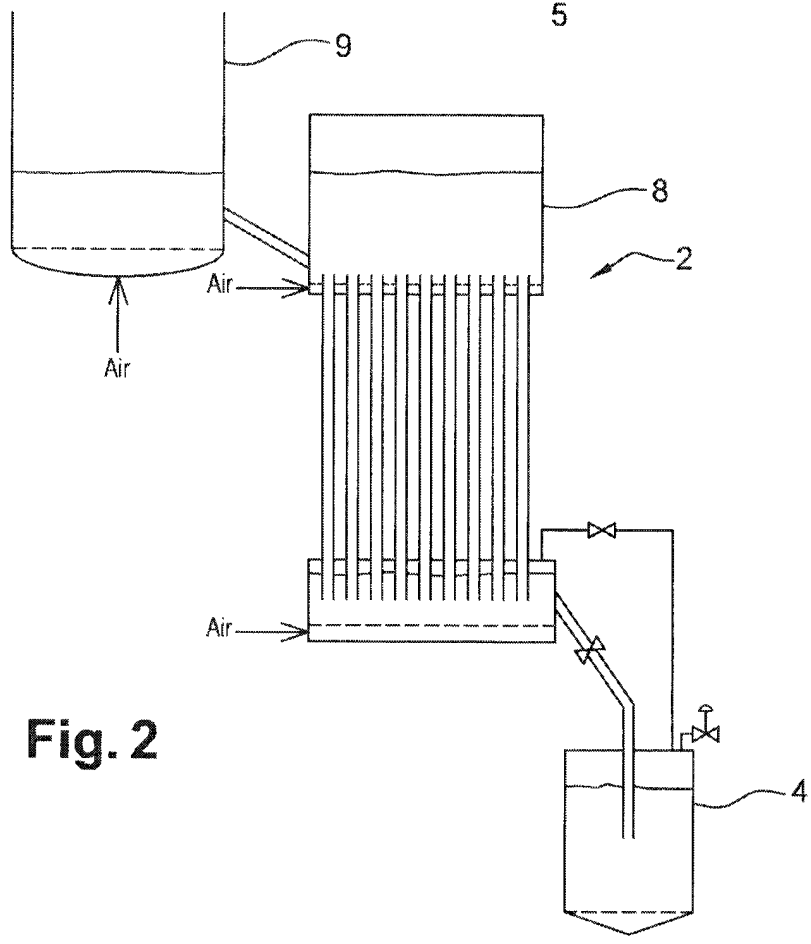
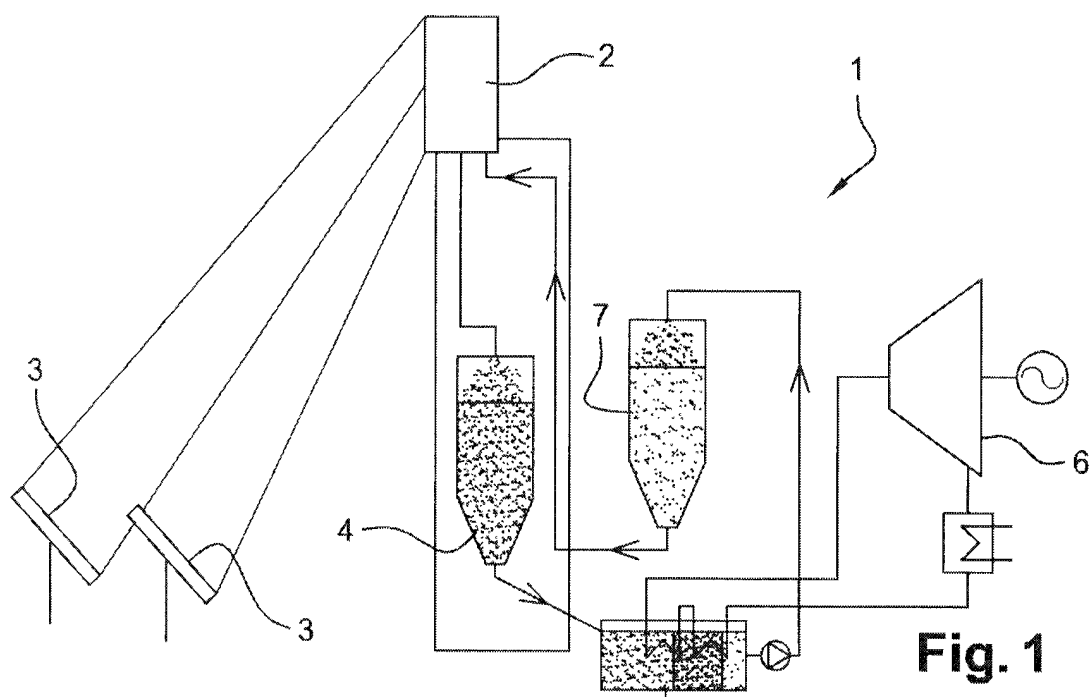
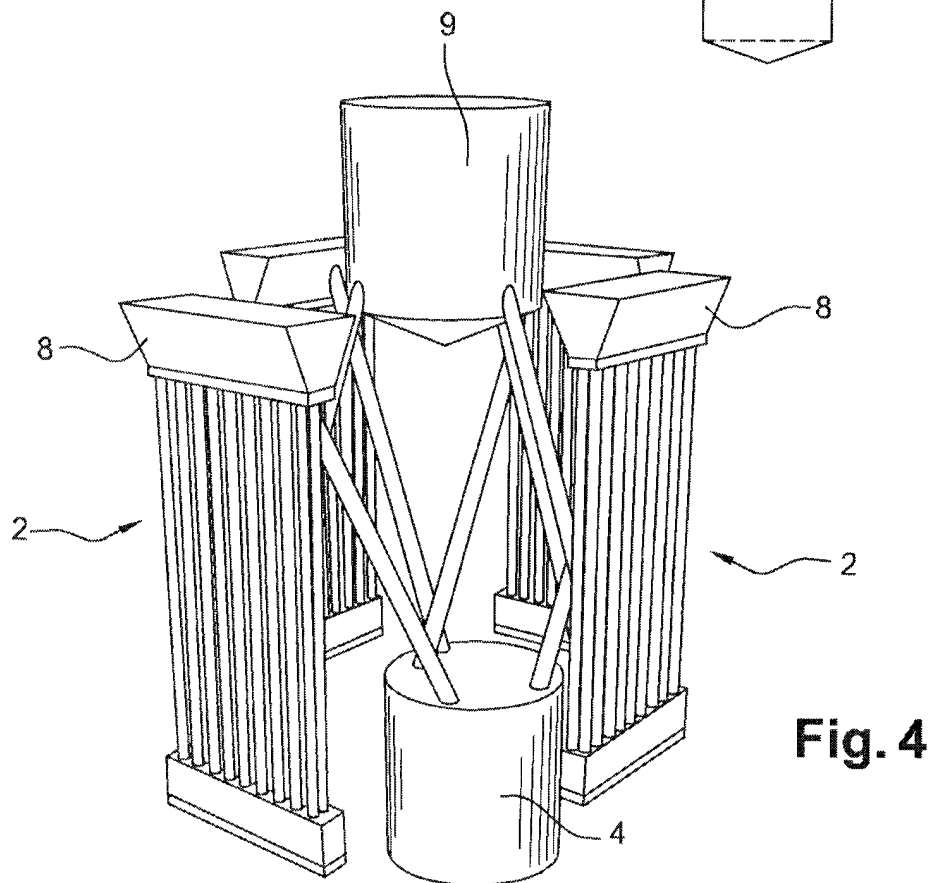
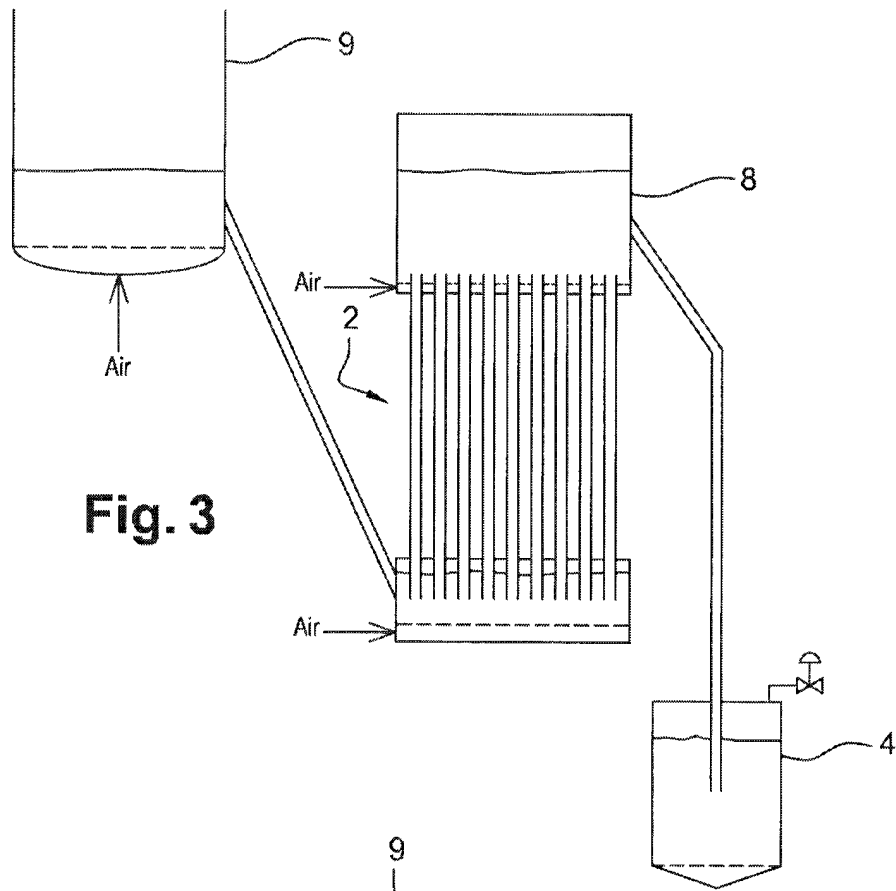


Fig. 2

2 / 3



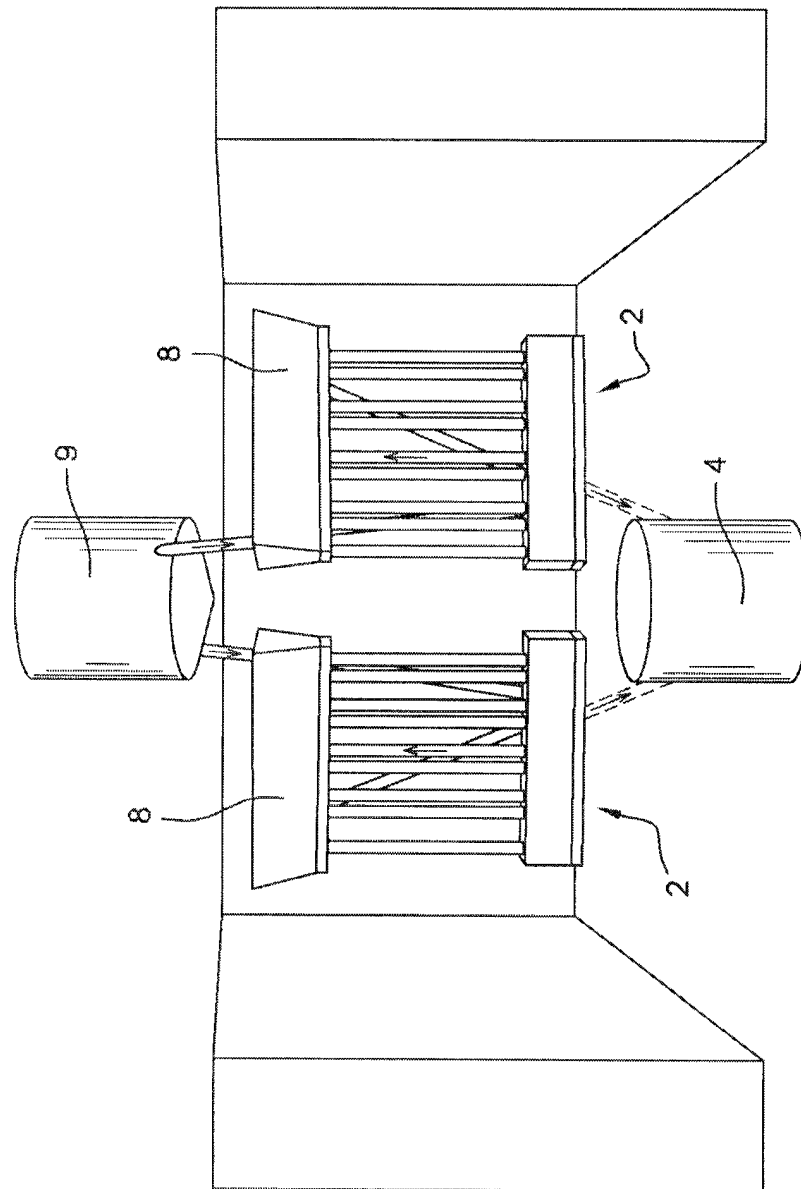


Fig. 5