

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 144 190**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②1 N° d'enregistrement national : **22 14289**
⑤1 Int Cl⁸ : **F 01 K 25/08 (2023.01), F 02 C 3/34, F 02 C 3/30**

⑫

CERTIFICAT D'UTILITÉ

B3

⑤4 Combustion oxy-hydrogène dans un environnement dilué au CO₂ supercritique pour la production d'énergie.

②2 Date de dépôt : 22.12.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 28.06.24 Bulletin 24/26.

④5 Date de la mise à disposition du public du certificat d'utilité : 29.11.24 Bulletin 24/48.

⑤6 Les certificats d'utilité ne font pas l'objet d'un rapport de recherche.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCEDES GEORGES CLAUDE SOCIETE ANONYME — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : TSIAVA Remi, KIM Hwanho et DHUNGEL Bhupesh.

⑦3 Titulaire(s) : *L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCEDES GEORGES CLAUDE SOCIETE ANONYME.*

⑦4 Mandataire(s) : *L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCEDES GEORGES CLAUDE.*

FR 3 144 190 - B3



Description

Titre de l'invention : Combustion oxy-hydrogène dans un environnement dilué au CO₂ supercritique pour la production d'énergie

- [0001] La présente invention concerne un procédé pour la production d'énergie. La présente invention concerne plus particulièrement un procédé pour la production d'énergie par combustion d'hydrogène.
- [0002] L'hydrogène est un carburant propre ne produisant que de l'énergie et de l'eau et ayant un pouvoir calorifique massique plus élevé que les carburants à base de carbone. L'hydrogène permettrait de remplacer des combustibles fossiles dans les systèmes de production d'électricité. La combustion d'hydrogène nécessite moins de molécules d'oxygène que les autres carburants.
- [0003] Lorsque l'hydrogène est brûlé dans l'air, la température adiabatique de la flamme est de 2254 °C (4089 °F). Une flamme oxy-hydrogène stoechiométrique a une température de flamme maximale d'environ 2800 °C (5100 °F). Cette plage de température est excessivement élevée pour toute turbomachine métallique et récupérateur de chaleur. Afin d'utiliser l'hydrogène pour la production d'énergie, la température de la flamme doit être abaissée par un fonctionnement non-stœchiométrique ou une dilution au moyen d'inertes. La combustion de l'hydrogène est difficile à contrôler en raison de sa réaction beaucoup plus rapide que celle des combustibles fossiles. Une réduction de la température de flamme aide à ralentir la réaction permettant ainsi un contrôle plus robuste.
- [0004] L'utilisation de l'hydrogène pour la production d'énergie a été étudiée. Dans US5809768 Mitsubishi Heavy Industries Ltd. a proposé une installation de turbine à combustion hydrogène-oxygène ayant une efficacité thermique améliorée avec dilution de vapeur.
- [0005] Dans "Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel", Transaction of the ASME, vol 127, pp. 73-80, Paolo Chiesa et al. ont étudié l'utilisation de l'hydrogène comme carburant de turbine à gaz en tenant compte de la dilution importante du carburant par des gaz inertes (vapeur d'eau ou azote) nécessaires pour contrôler les émissions de NO_x.
- [0006] La société 8 Rivers est propriétaire de la technologie du cycle CO₂ oxy-combustion supercritique connu sous le nom de cycle d'Allam, comme notamment décrit dans US8596075. Cette technologie d'oxy-combustion produit de l'électricité à partir de gaz naturel à un coût inférieur ou égal à celui des centrales électriques au gaz naturel existantes. L'utilisation de CO₂ supercritique comme fluide de travail à 300 bars permet non seulement de rendre les composants compacts avec moins d'investissement en capital, mais également d'atteindre une efficacité de cycle élevée (59 % calculée à

partir du PCI).

- [0007] La présente invention combine la combustion oxy-hydrogène avec un cycle de puissance au CO₂ supercritique.
- [0008] La présente invention concerne plus particulièrement, un procédé pour la production d'énergie.
- [0009] Selon ce procédé, une chambre de combustion est alimentée avec de l'hydrogène, avec un comburant ayant une teneur en oxygène d'au moins 90%vol et avec du CO₂. De cette manière une combustion oxy-hydrogène diluée avec du CO₂ est réalisée dans la chambre de combustion avec production d'un effluent gazeux chaud consistant pour au moins 8%vol de vapeur d'eau, généralement entre 8 et 12%vol, encore de préférence de 9 à 11%vol, et de CO₂. L'effluent gazeux chaud issu de la chambre de combustion est introduit dans une turbine d'expansion dans laquelle l'effluent gazeux est détendu avec récupération d'énergie mécanique et/ou électrique et d'un effluent gazeux détendu. Cet effluent gazeux détendu de la turbine d'expansion est introduit dans un échangeur de chaleur dans lequel l'effluent gazeux détendu est refroidi de manière à obtenir un effluent gazeux détendu refroidi. Cet effluent gazeux refroidi est introduit dans un condenseur dans lequel de la vapeur d'eau générée par la combustion oxy-hydrogène et présente dans l'effluent gazeux refroidi est condensée et éliminée de l'effluent gazeux refroidi. Un effluent gazeux déshumidifié consistant pour au moins 90%vol de CO₂ est obtenu, ainsi que de l'eau condensée. L'effluent gazeux déshumidifié est ensuite comprimé dans un compresseur de manière à obtenir un gaz supercritique. Le gaz supercritique est introduit dans l'échangeur de chaleur pour y être préchauffé par échange thermique sans mélange avec l'effluent gazeux détendu. Du gaz supercritique préchauffé issu de l'échangeur de chaleur est introduit dans la chambre de combustion en tant que source de CO₂ pour la dilution de la combustion oxy-hydrogène.
- [0010] Dans le présent contexte, on comprend par combustion oxy-hydrogène la combustion de l'hydrogène avec un comburant consistant pour au moins 90%vol de la molécule O₂. Une telle combustion se distingue ainsi clairement de la combustion avec de l'air (également connu sous la dénomination aéro-combustion), l'air consistant pour 78%vol de diazote et pour seulement 21%vol d'O₂.
- [0011] Le CO₂ utilisé suivant la présente invention pour la dilution de la combustion est inerte et ne fait ni partie du combustible ni du comburant.
- [0012] Suivant une forme de réalisation du procédé, au moins une partie de l'énergie mécanique et/ou électrique récupérée au moyen de la turbine d'expansion est utilisée pour produire de l'oxygène et/ou de l'hydrogène utilisés dans la combustion oxy-hydrogène. Au moins une partie de l'énergie mécanique et/ou électrique récupérée au moyen de la turbine d'expansion peut notamment être utilisée pour produire de

l'oxygène par séparation des gaz de l'air et/ou pour produire de l'oxygène et/ou de l'hydrogène par électrolyse d'eau. De l'oxygène ainsi produit peut être utilisé en tant que comburant pour la combustion oxy-hydrogène et/ou au moins une partie de l'hydrogène ainsi produit peut être utilisé en tant que combustible pour la combustion oxy-hydrogène.

- [0013] Une partie du gaz supercritique non-préchauffé ou du gaz supercritique préchauffé peut avantageusement ne pas être dirigée vers la chambre de combustion mais peut être introduite directement, c'est-à-dire sans passer par la chambre de combustion, dans la turbine d'expansion de manière à éviter de manière contrôlée une surchauffe de la turbine d'expansion.
- [0014] De manière utile, au moins une partie de l'oxygène utilisé pour la combustion oxy-hydrogène est également préchauffé dans l'échangeur de chaleur par échange thermique sans mélange avec avec l'effluent gazeux détendu.
- [0015] Ainsi, suivant l'invention, la chaleur provenant de la combustion de l'hydrogène avec de l'oxygène dans la chambre de combustion est utilisée pour produire un flux riche en CO₂ à haute température. Le cycle de puissance peut-être est partiellement ou entièrement pré-rempli de CO₂ avant le démarrage de la turbine d'expansion pour la récupération d'énergie. Du CO₂ peut également progressivement être introduit dans le cycle de puissance afin d'atteindre les paramètres de fonctionnement finaux avec récupération d'énergie au moyen de la turbine d'expansion. Une quantité prédéterminée de CO₂ circule dans le cycle de puissance et permet de diluer la combustion oxy-hydrogène. Ce CO₂ sert également de fluide de travail dans la turbine d'expansion. La concentration de CO₂ dans le cycle est avantageusement supérieure à 95% en mass. L'hydrogène et l'oxygène sont les seules molécules qui entrent dans ce système semi-fermé quand les paramètres de fonctionnement finaux sont atteints. Le cycle ne produit que de l'eau comme effluent. Il n'y a pas de génération ou d'émission nette de CO₂.
- [0016] La [Fig.1] est une représentation schématique d'une forme de réalisation du procédé suivant l'invention.
- [0017] Le cycle d'énergie illustré dans la [Fig.1] a été conçu pour une production d'électricité de 300 MW. De l'hydrogène 10, de l'oxygène 20 et du CO₂ recyclé 30 (avec un rapport molaire O₂:CO₂ de de 23:100) sont introduits dans la chambre de combustion 1 et y génèrent des gaz de combustion 40 à haute température. Dans la forme de réalisation illustrée, l'effluent gazeux chaud 40 de la chambre de combustion 1 présente une température de l'ordre de 1157°C et une pression de 300 bars. Cet effluent gazeux 40 contient plus de 95 % en poids de CO₂ supercritique équilibré avec de la vapeur d'eau en raison de la recirculation du CO₂, qui abaisse la température de la chambre de combustion et contrôle ainsi la température d'entrée de la turbine d'expansion 2.

- [0018] Ce CO₂ supercritique à haute concentration de l'effluent gazeux chaud 40 est le fluide de travail de la turbine 2. Après la détente jusqu'à environ 30 bars, la chaleur résiduelle du gaz 50 à la sortie de la turbine d'expansion 2, également appelé effluent gazeux détendu 50, est récupérée par l'échangeur de chaleur 3 et utilisée pour préchauffer le CO₂ recyclé 90, 100 et l'oxygène 150 fourni par la source d'oxygène 7 en amont de la chambre de combustion 1. L'eau 70 générée sous forme de vapeur d'eau par la combustion oxy-hydrogène est rejetée, après condensation dans le condenseur 4. Le CO₂ restant ou effluent gazeux déshumidifié 80 est comprimé à 300 bars dans le compresseur 3 avant d'être pompé au moyen de la pompe 6 vers la chambre de combustion 1 en passant par l'échangeur de chaleur 3.
- [0019] Comme également illustré dans la [Fig.1], une seconde possibilité optionnelle de contrôler la température dans la turbine d'expansion 2 consiste en l'introduction d'une fraction régulée 110 du CO₂ recyclé 90 directement dans la turbine d'expansion 2, sans passage à travers la chambre de combustion 1. Cette fraction peut être de l'effluent gazeux déshumidifié préchauffé issu de l'échangeur de chaleur 2 ou de l'effluent gazeux déshumidifié non-préchauffé. Cette fraction peut être zéro quand il n'y a pas de risque de surchauffe de la turbine d'expansion 2.
- [0020] Comme également montré dans la [Fig.1], une partie de l'effluent gazeux déshumidifié et comprimé 90 peut également être mélangée avec l'oxygène 120 en amont de la chambre de combustion 1. Comme illustré dans la figure, le mélange est effectué en amont de l'échangeur de chaleur 2 et le mélange 130 ainsi obtenu est pompé au moyen de la pompe 8 à travers l'échangeur 3, dans lequel le mélange est préchauffé avant d'être introduit dans la chambre de combustion 1. Une telle forme de réalisation permet, par exemple d'utiliser, dans la chambre de combustion 1, des brûleurs, généralement moins onéreux, tels que conventionnellement utilisés pour la combustion avec de l'air en tant que comburant.
- [0021] L'invention tire parti à la fois de la combustion de l'hydrogène et du cycle de CO₂ supercritique. Le cycle du CO₂ supercritique présente des avantages économiques très intéressants. La haute densité énergétique du CO₂ permet des turbomachines compactes donc des investissements moindres. Une efficacité de cycle plus élevée réduit les coûts d'exploitation.
- [0022] Cependant, le cycle d'Allam connu produit du CO₂ qui devrait être séquestré ou utilisé pour d'autres applications pour rendre la technologie vraiment sans carbone. Un 300MW cycle d'Allam de 300MW produit environ 2400 tpj (tonnes par jour) de CO₂ et 2000 tpj d'eau. La combustion oxy-hydrogène suivant la présente invention avec dilution de CO₂ supercritique a une propriété de fluide de travail presque identique à celle du cycle d'Allam, permettant la technologie compacte et à faible dépenses d'investissement, également désigné par l'abréviation anglaise "capex", tout en ne

produisant que de l'eau en tant qu'effluent et ne nécessitant donc aucun traitement de capture de CO₂.

[0023] Afin d'évaluer la faisabilité de l'idée proposée, des études de cycle ont été menées à l'aide du logiciel ASPENplus. Les paramètres de fonctionnement (valeurs de pression et de température) et l'apport thermique net de 511 MW correspondent étroitement au cycle d'Allam. Le résumé de l'analyse du cycle suivant la présente invention est présenté dans le tableau 1, la composition de l'effluent gazeux chaud à l'entrée de la turbine est donnée dans le tableau 2

[0024] [Tableaux1]

Carburant H ₂ [tpj]		368.0
Oxygène [tpj]		2924.0
Puissance thermique nette [MW]		511
Puissance brute de la turbine [MW]		455
Puissance nette NETTE [MW]		313
Efficacité [%]		61.2
Production d'H ₂ O [tpj]		3289
Production de CO ₂ [tpj]		0
Puissance de compression d'air en ASU [MW]		42,0
Puissance parasite totale [MW]		142,0

[0025] [Tableaux2]

	Fraction molaire à l'entrée de la turbine	Fraction massique à l'entrée de la turbine
O ₂	0,0050	0,0039
CO ₂	0,8893	0,9493
H ₂ O	0,1044	0,0456
Carburant Hé [tpi]		368.0
CH ₄	0	0
Ar	0,0013	0

[0026] En raison de la faible demande d'oxygène par rapport au cycle d'Allam à base de gaz

naturel, la puissance du compresseur d'air est inférieure pour l'idée proposée. C'est la principale raison pour laquelle cette invention a une meilleure efficacité de 61,2 % que celle du cycle d'Allam, qui est de 59 %.

[0027] Il est possible d'optimiser davantage le cycle de puissance pour une fraction de CO₂ plus élevée.

[0028] L'étude du cycle montre que le procédé suivant l'invention est réalisable sans difficulté et présente une excellente efficacité. Plus important encore, le cycle oxy-hydrogène est une technologie absolument sans carbone et sans production de CO₂ à partir du cycle.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé pour la production d'énergie, procédé dans lequel:

- une chambre de combustion (1) est alimentée avec de l'hydrogène (10), un comburant (120) ayant une teneur en oxygène d'au moins 90%vol, et du CO₂ (30, 100a) de manière à réaliser dans la chambre de combustion (1) une combustion oxy-hydrogène diluée avec du CO₂ avec production d'un effluent gazeux chaud (40) consistant pour au moins 90%vol de vapeur d'eau et de CO₂,
- l'effluent gazeux chaud (40) issu de la chambre de combustion (1) est introduit dans une turbine d'expansion (2) dans laquelle l'effluent gazeux (40) est détendue avec récupération d'énergie mécanique et/ou électrique et d'un effluent gazeux détendu (50),
- l'effluent gazeux détendu (50) de la turbine (2) est introduit dans un échangeur de chaleur (3) dans lequel l'effluent gazeux détendu (50) est refroidi de manière à obtenir un effluent gazeux détendu refroidi (60),
- l'effluent gazeux refroidi (60) est introduit dans un condenseur (4) dans lequel de la vapeur d'eau générée par la combustion oxy-hydrogène et présente dans l'effluent gazeux refroidi (60) est condensée et éliminée de l'effluent gazeux refroidi, avec obtention de l'eau condensée (70) et de l'effluent gazeux déshumidifié (80) consistant pour au moins 90%vol de CO₂,
- l'effluent gazeux déshumidifié (80) est ensuite comprimé dans un compresseur (6) de manière à obtenir un gaz supercritique (90),
- le gaz supercritique (90) est introduit dans l'échangeur de chaleur (3) pour y être préchauffé par échange thermique sans mélange avec l'effluent gazeux détendu (50),
- du gaz supercritique préchauffé (30) issu de l'échangeur de chaleur (3) est introduit dans la chambre de combustion (1) en tant que source de CO₂ pour la dilution de la combustion oxy-hydrogène.

[Revendication 2]

Procédé suivant la revendication 1, dans lequel au moins une partie de

- l'énergie mécanique et/ou électrique récupérée au moyen de la turbine d'expansion (2) est utilisée pour produire de l'oxygène et/ou de l'hydrogène utilisés dans la combustion oxy-hydrogène.
- [Revendication 3] Procédé suivant la revendication 2, dans lequel au moins une partie de l'énergie mécanique et/ou électrique récupérée au moyen de la turbine d'expansion (2) est utilisée pour produire de l'oxygène par séparation des gaz de l'air.
- [Revendication 4] Procédé suivant la revendication 2 ou 3, dans lequel au moins une partie de l'énergie mécanique et/ou électrique récupérée au moyen de la turbine d'expansion (2) est utilisée pour produire de l'oxygène et/ou de l'hydrogène par électrolyse d'eau.
- [Revendication 5] Procédé suivant l'une quelconque des revendications précédentes, une partie (110) du gaz supercritique (90) ou du gaz supercritique préchauffé (50) n'est pas dirigée vers la chambre de combustion (1), mais introduite dans la turbine d'expansion (2) de manière à éviter une surchauffe de la turbine d'expansion (2).
- [Revendication 6] Procédé suivant l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au moins une partie de l'oxygène (120) utilisé pour la combustion oxy-hydrogène est préchauffé dans l'échangeur de chaleur (3) par échange thermique sans mélange avec avec l'effluent gazeux détendu (50).

[Fig. 1]

