

Nom et Prénom : HAMRAOUI KARIMA

Date de soutenance : 06/07/2022

Directeur de Thèse : HASSAN EL BARI

Sujet de Thèse :

La Co-digestion Anaérobie des Plantes de Poivrons et d'Aubergines: Effets de Prétraitement Hydrothermique et Etude Cinétique du Processus

Abstract:

The implementation of new and increasingly stringent legislation on waste treatment has led to the utilization and improvement of non-conventional technologies to avoid the environmental impacts associated to some traditional management technics, such as landfill disposal. In most cases, agricultural and agro-industrial wastes contain high organic load which might cause environmental problems like unpleasant smells, uncontrolled production of global warming gas, percolation of lixiviates, etc. Consequently, agricultural and agro-industrial waste must be treated adequately to achieve production systems consistent with the concept of circular economy.

A promising alternative to achieve such an ambitious goal is the energy recovery from organic waste generated in agricultural and industrial activities and uses it for self-consumption in the facilities themselves. In this context, biomethanization or anaerobic digestion allows treating organic wastes derived from the agricultural and industrial sector, individually or jointly, with the additional advantage of minimizing their organic matter content through its transformation into methane. Methane is a gas with high calorific value, whose combustion does not contribute to the global warming if methane derives from renewable sources. The methane yield and/or the stability of biomethanization, which is a microbial process, might be improved by applying different pre-treatments or by the joint treatment of several biodegradable substrates in a centralized system. These procedures could increase the biodiversity inside the anaerobic digesters, dilute some inhibitory compounds contained in the substrates and/or facilitate the availability of additional nutrients.

This doctoral thesis has evaluated the feasibility of recycling pepper (*Capsicum* sp.) and aubergine (*Solanum melongena*) plant waste in a centralized biomethanization system. Due to the high demand for the resulting vegetables, these agricultural plants are usually and simultaneously grown in greenhouses producing large amounts of residues after harvesting. In general, greenhouses generate 25–37 tons of pepper plant residues per hectare and 25–44 tons of eggplant residues per hectare.

Different mesophilic assays were carried out at laboratory-scale to determine the biodegradability of each waste treated individually and treated in combination (co-digestion), as well as to quantify the methane yield coefficient in both cases. Anaerobic co-digestion of different wastes generated in the same geographical might be interesting both for waste management and valorization. In fact, co-digestion might provide sustainability in its three aspects (economic, social and environmental), to the area of implementation, which is an objective pursued by all national and European plans for economic and environmental improvement.

On the other hand, the low biodegradability of lignocellulosic waste might lead to the need of carrying out further pretreatment studies. Thus, the evaluation of pretreatments that allow improving the solubilization of C and N contained in waste can be of marked interest to favor the subsequent treatment through anaerobic digestion. Nutrients bioavailability entails the reduction of time required to solubilize and hydrolyze the organic substrate to be treated. In this context, the application of hydrothermal pretreatments to accelerate the biodegradation process (hydrolysis step) and to increase its energy efficiency in the form of methane was also evaluated. Specifically, the most appropriate conditions to pretreat the agricultural wastes evaluated under the study conditions were found to be the application of the hydrothermal pre-treatment for 40 min, at 120°C and 2 atm. Subsequent biomethanization tests showed that the combination of pre-treated wastes at a mixing percentage of 50% pepper plant – 50% eggplant enhanced the methane yield coefficient, if compared to the individual treatments (up to 79 mLSTP/g VS).

Additionally, the study of the kinetics of methane production allowed the most favorable operational conditions for stable biomethanization to be determined. In fact, kinetic modeling provides key information for designing reactors, predicting methane production and optimizing the performance of bioreactors. In this case, the modified Gompertz model was used to fit the cumulative production of methane under different experimental conditions as this provides the value of the maximum specific methane production rate and the maximum accumulated methane production as adjustment parameters. Furthermore, the model describes the lag phase period or minimum time required to produce biogas (latency time), which is essential in the anaerobic degradation of lignocellulosic substrates. A markedly good agreement between the

experimental and simulated variables was observed ($r^2 = 0.999$), which confirms the suitability of the proposed model under the study conditions.

This innovative research study might be considered of special interest given that the results obtained represent a significant advance in the context of the management of abundant biodegradable waste. Specifically, this PhD Thesis provides a solution to a markedly relevant problem in current society, with the consequent environmental and social benefits that an improvement in organic waste treatment might lead.

Keywords: Anaerobic Digestion and co-digestion, Biomethanogenic Potential, Lignocellulosic Biomass, Hydrothermal Pretreatment, Kinetic Model.

Résumé:

La mise en œuvre de nouvelles législations de plus en plus strictes sur le traitement des déchets a conduit à l'utilisation et à l'amélioration de technologies non conventionnelles afin d'éviter les impacts environnementaux associés à certaines techniques de gestion traditionnelles, telles que la mise en décharge. Dans la plupart des cas, les déchets agricoles et agro-industriels contiennent une charge organique élevée qui peut causer des problèmes environnementaux tels que des odeurs désagréables, la production incontrôlée de gaz à effet de serre, la percolation de lixiviats, etc. Par conséquent, les déchets agricoles et agro-industriels doivent être traités de manière adéquate afin de mettre en place des systèmes de production compatibles avec le concept d'économie circulaire.

Une alternative prometteuse pour atteindre un objectif aussi ambitieux est la valorisation énergétique des déchets organiques générés par les activités agricoles et industrielles et leur utilisation pour l'autoconsommation dans les installations elles-mêmes. Dans ce contexte, la biométhanisation ou la digestion anaérobie permet de traiter les déchets organiques issus du secteur agricole et industriel, individuellement ou conjointement, avec l'avantage supplémentaire de minimiser leur teneur en matière organique grâce à leur transformation en méthane. Le méthane est un gaz à haut pouvoir calorifique, dont la combustion ne contribue pas au réchauffement climatique si le méthane provient de sources renouvelables. Le rendement en méthane et/ou la stabilité de la biométhanisation, qui est un processus microbien, pourraient être améliorés par l'application de différents prétraitements ou par le traitement conjoint de plusieurs substrats biodégradables dans un système centralisé. Ces procédures pourraient augmenter la biodiversité à l'intérieur des digesteurs anaérobies, diluer certains composés inhibiteurs contenus dans les substrats et/ou faciliter la disponibilité de nutriments supplémentaires.

Cette thèse de doctorat a évalué la faisabilité du recyclage des déchets végétaux de poivrons (*Capsicum* sp.) et d'aubergines (*Solanum melongena*) dans un système centralisé de biométhanisation. En raison de la forte demande pour les légumes qui en résultent, ces plantes agricoles sont généralement et simultanément cultivées dans des serres produisant de grandes quantités de résidus après la récolte. En général, les serres génèrent 25-37 tonnes de résidus de poivrons par hectare et 25-44 tonnes de résidus d'aubergines par hectare.

Différents essais mésophiles ont été réalisés à l'échelle du laboratoire pour déterminer la biodégradabilité de chaque déchet traité individuellement et traité en combinaison (co-digestion), ainsi que pour quantifier le coefficient de rendement en méthane dans les deux cas. La co-digestion anaérobie de différents déchets générés dans une même zone géographique pourrait être intéressante à la fois pour la gestion et la valorisation des déchets. En fait, la co-digestion pourrait apporter la durabilité dans ses trois aspects (économique, social et environnemental), à la zone de mise en œuvre, qui est un objectif poursuivi par tous les plans nationaux et européens pour l'amélioration économique et environnementale.

D'un autre côté, la faible biodégradabilité des déchets lignocellulosiques pourrait rendre nécessaire la réalisation d'autres études de prétraitement. Ainsi, l'évaluation des prétraitements qui permettent d'améliorer la solubilisation du C et du N contenus dans les déchets peut être d'un intérêt marqué pour favoriser le traitement ultérieur par digestion anaérobie. La biodisponibilité des nutriments implique la réduction du temps nécessaire pour solubiliser et hydrolyser le substrat organique à traiter. Dans ce contexte, l'application de prétraitements hydrothermaux pour accélérer le processus de biodégradation (étape d'hydrolyse) et pour augmenter son efficacité énergétique sous forme de méthane a également été évaluée. Plus précisément, les conditions les plus appropriées pour prétraiter les déchets agricoles évalués dans les conditions de l'étude se sont avérées être l'application du prétraitement hydrothermique pendant 40 min, à 120°C et 2 atm. Les tests ultérieurs de biométhanisation ont montré que la combinaison des déchets prétraités à un pourcentage de mélange de 50% de poivron - 50% d'aubergine a augmenté le coefficient de rendement en méthane, si on le compare aux traitements individuels (jusqu'à 79 mLSTP/g VS).

De plus, l'étude de la cinétique de la production de méthane a permis de déterminer les conditions opérationnelles les plus favorables à une biométhanisation stable. En fait, la modélisation cinétique fournit des informations clés pour la conception des réacteurs, la prédiction de la production de méthane et l'optimisation des performances des bioréacteurs. Dans ce cas, le modèle de Gompertz modifié a été utilisé pour ajuster la production cumulée de méthane dans différentes conditions expérimentales car il fournit la valeur du taux de production spécifique maximal de méthane et la production cumulée maximale de méthane comme paramètres d'ajustement. En outre, le modèle décrit la période de la phase de latence ou le temps minimum requis pour produire du biogaz (temps de latence), qui est essentiel dans la dégradation anaérobie des substrats lignocellulosiques. Un très bon accord entre les variables expérimentales et simulées a été observé ($r^2 = 0,999$), ce qui confirme la pertinence du modèle proposé dans les conditions de l'étude.

Cette recherche innovante peut être considérée d'un intérêt particulier étant donné que les résultats obtenus représentent une avancée significative dans le contexte de la gestion des déchets biodégradables abondants. Plus précisément, cette thèse de doctorat apporte une solution à un problème très pertinent dans la société actuelle, avec les avantages environnementaux et sociaux conséquents qu'une amélioration du traitement des déchets organiques pourrait entraîner.

Mots-clés : Digestion et la co-digestion Anaérobie, Potentiel Biométhanogène, Biomasses Lignocellulosiques, Prétraitement Hydrothermique, Modèles Cinétiques