

SOLID WASTE TO ENERGY SOLUTIONS FOR SMALL AND MEDIUM SCALE POWER GENERATION

Cosmin MARCULESCU¹, Adrian BADEA², Tiberiu APOSTOL³

The paper presents the results of the research on combustion, pyro-combustion and pyro-gasification treatment applied to non-dangerous solid waste with energy recovery. The decentralised power generation represents one of the main targets for the European Union energy sector strategy. The alternative thermal treatment technologies as pyrolysis and gasification applied to "surface fuel", solid waste and biomass, represent the cutting edge processes for energy recovery. Both present undeniable advantages concerning the CO₂ / treated waste rate and the dioxins formation being the alternative for a safer waste thermal treatment.

The experiments for the solid waste thermal-chemical treatment were performed both at laboratory and pilot scale. The laboratory scale discontinuous experiments were performed on a tubular reactor using small quantities (5 – 10 grams). The obtained data was validated using representative samples on vibrating fluidized bed reactor that enables the continuous thermal treatment of 10 – 50 kg/h of solid product under an oxidant or reductive atmosphere.

Keywords: solid waste, biomass, combustion, pyrolysis, gasification, energy recovery.

1. Introduction

Le but de cette étude a été l'optimisation de la conversion en énergie électrique des déchets solides hétérogènes (de tipe urbain). L'approche n'est pas au niveau micro qui doit prendre en compte toutes les réactions avec leurs enthalpies de formation et thermocinétiques, l'influence des caractéristiques physiques du produit (surface spécifique, porosité etc.) et le type d'installation (le transfert thermique de la paroi vers le produit). Cette approche s'avère difficile à élaborer avec un important volume de travail et ne fait pas l'objet de cette recherche [1]. Les bilans ont été établis au niveau macro en tenant compte de PCI du produit, de caractère endothermique ou exothermique du processus analysé, en fonction des résultats expérimentaux obtenus au cours de la recherche, qui ont établi les paramètres optimaux pour la réduction complète du produit aux inerte.

¹ Assistant Prof., Department of Energy Production and Use, University "Politehnica" of Bucharest, Romania

² Prof., Department of Energy Production and Use, University "Politehnica" of Bucharest

³ Prof., Department of Energy Production and Use, University "Politehnica" of Bucharest

2. Filières de valorisation énergétique pour déchets solides hétérogènes

Les solutions pour le traitement/ élimination thermique des déchets solides étudiés dans le cadre de cette recherche peuvent dégager l'énergie chimique du produit directement sous forme de chaleur (l'incinération) ou indirecte sous forme d'un combustible (la pyrolyse, respectivement la gazéification) [1]. Le schéma ci-dessous (fig 1.) présente d'une manière schématique les filières proposées pour la conversion en énergie des déchets urbains. Les paramètres affichés sur le diagramme ont été établis expérimentalement par rapport à la neutralisation complète des déchets et la réduction de la fraction carbonée du produit au moins de 3% [2].

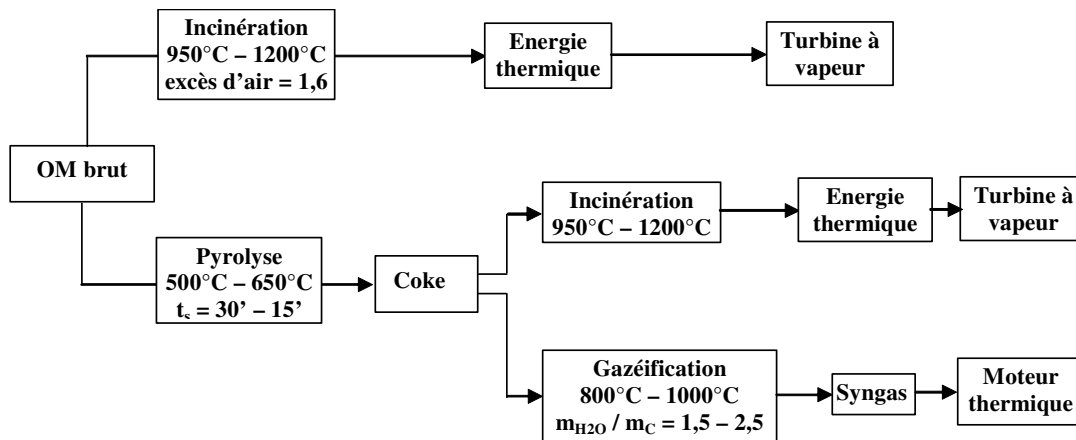


Fig. 1. Filières de conversion en énergie pour les OM.

La variante la plus simple de point de vue technologique est l'incinération directe des OM brutes sans une préparation préalable du produit. Est déjà connu que pour l'auto entretien du processus de combustion la PCI des OM doit être supérieure à $8000 \text{ kJ/kg}_{\text{déchet humide}}$. Cette variante alors ne convient pas aux déchets ménagers dans les pays de l'est de l'Europe, y compris la Roumanie dont le PCI ne dépasse pas 6000 kJ/kg . Dans ce cas là, existent des options technologiques de prétraitement pas séchage, séparation des inertes, élaboration de RDF (Refused Derived Fuel) à base des composants cellulose et plastiques contenus dans les OM, ou la co-combustion. Ces solutions n'ont pas fait l'objet de la recherche.

L'incinération a été réalisé seulement comme essai de référence par rapport à l'efficacité de destruction des déchets (rendement matière et temps de séjour).

La deuxième variante est la séparation de la pyrolyse comme étape distincte dans le processus d'incinération. Cette variante est justifiée seulement par les restrictions d'emplacement de la centrale par rapport à la ville, concernant la surface occupée et la population desservit.

La troisième variante proposée est la pyro-gazéification séparée ou intégrée. Cette solution suppose à la fois la préparation du coke au niveau des arrondissements dans réacteurs de pyrolyse de moyenne capacité (25000 – 50000 t/an) suivie par sa gazéification dans une unité centrale à l'extérieur de la ville ou la pyro-gazéification directe des OM, la pyrolyse étant réalisée dans la même unité avec la gazéification.

Les solutions 2 et 3 peuvent être favorisés par l'auto support du processus de séchage+pyrolyse. Par la combustion du gaz de pyrolyse résulte la chaleur nécessaire pour réaliser le séchage et la devolatilisation du produit. En fonction du niveau thermique de la pyrolyse et du temps de séjour nécessaire à accéder au rendement matière établis expérimental on a déterminé le nécessaire de chaleur – pouvoir thermique. On va comparer le nécessaire thermique avec le disponible fournis par la combustion des gaz de pyrolyse. Le produit analysee c'est un dechets urbain reconstituee: PCI=9000 kJ/kg, w=28% [3].

3. Bilan sur l'étape de séchage, pyrolyse et gazéification

Séchage

Le séchage d'une particule de déchet (solide poreux humide) est caractérisé par différents processus de transport de matière et de chaleur couplées. En conditions de laboratoire ou la granulométrie de l'échantillon traité était en dessous 3 mm en moyenne pour chaque composant le numéro de Biot thermique et massique est inférieur a 0,1. En conséquence nous pouvons considérer que la température de surface est égale à la température du matériau et que l'humidité du matériau à l'équilibre est égale à son humidité à l'équilibre à la surface.

La quantité de chaleur nécessaire pour la vaporisation complète de l'eau contenue dans le produit brut est donnée par l'équation ci-dessous où T_s est la température du produit brut à l'introduction dans l'installation et T_f la température du produit à la fin du séchage:

$$Q_{\text{vap}} = m_{\text{dechet brut}} * w_{\text{dechet}} \left[\lambda_v (373 \text{ K}) + \int_{T_i}^{373 \text{ K}} c_{\text{peau}}^{\text{liq}} dT + \int_{373 \text{ K}}^{T_f} c_{\text{peau}}^{\text{vap}} dT \right] \text{ [kJ]} \quad (1)$$

On suppose que la vaporisation de l'eau contenue dans les OM est quasiment finit dans l'intervalle 160-210°C.

$$Q_{\text{OM}}^{\text{sec}} = m_{\text{OM}}^{\text{sec}} \int_{T_s}^{463 \text{ K}} c_{\text{pOM sec}} dT \quad \text{[kJ]} \quad (2)$$

La chaleur absorbée par les déchets humides pour accéder à la température de 190°C et en état sèche est donnée par :

$$Q_{\text{sechage}} = Q_{\text{OMsec}} + Q_{\text{vap}} \quad (3)$$

Dans le calcul de la chaleur spécifique des OM sec nous avons pondéré massique le cp de chaque composant sec $c_{p\text{OM}} = 1,04 \text{ kJ/kgK}$

La chaleur nécessaire pour le séchage d'un kilogramme des déchets ménagers bruts (humides) varie entre 887,4 kJ/kgdéchét brut si la température $T_f = 190$. La température initiale du produit à l'entrée dans le réacteur est 15 °C [3].

Pyrolyse

Pour accéder au bilan énergétique du processus de pyrolyse nous avons choisi les paramètres température/temps de séjour avec valeurs minimales qui assurent la décomposition thermique du produit avec un rendement matière globale d'environ 31,7% sur le produit sec et approximatif 76,82% sur la partie combustible des OM. Ces paramètres sont : température = 450-550 °C et temps de séjour $t_s = 12 - 30$ minutes. Le temps de séjour nécessaire pour accéder au rendement matière maximum varie avec la taille du produit et son humidité. En conditions industrielles le temps de séjour peut attendre 1 heure. Alors pour pyrolyser 1 kg OM brut sont nécessaires :

$$Q_{\text{pyr}} = m_{\text{déchétbrut}} * (1 - w_{\text{déchét}}) * E_a + m_{\text{carbone}} * c_{\text{p carbone}} * (T_{\text{pyr}} - T_f) + m_{\text{inertes}} * c_{\text{p inertes}} * (T_{\text{pyr}} - T_f) \quad (4)$$

$$Q_{\text{pyr}} = 268 \text{ kJ/kgOMbrut}$$

La chaleur totale nécessaire pour l'étape de séchage+pyrolyse :

$$Q_{\text{sechage+pyr}} = 1240 \text{ kJ/kgOMbrut}$$

Le bilan globale sur l'étape de Séchage + Pyrolyse est positive avec un disponible d'énergie entre 4000 et 2000 kJ/kgOM brut avec une réserve sur le PCI des produits gazeux et d'huile crée par l'impossibilité d'une analyse complète des produits.

Vapo-gazéification

Le processus de vapo-gazéification est fortement endothermique. Le nécessaire énergétique pour initier la réaction peut être calculé à l'aide d'énergie activation $E = 205,4 \text{ kJ/mol}_{\text{carbone}}$. L'énergie nécessaire est :

$$Q_{\text{gazéif}} = m_{\text{carbone}} * E_a + (m_{\text{carbone}} * c_{\text{p carbone}} + m_{\text{inertes}} * c_{\text{p inertes}}) * (T_{\text{gaz}} - T_{\text{entre}}) \text{ kJ/kg}_{\text{coke}}$$

On ajoute la chaleur consommée pour le surchauffage des vapeurs :

$$Q_{\text{etageII}} = Q_{\text{gazéif}} + Q_{\text{vap}} = 26937 \div 24540 \text{ kJ}$$

Si on considère la pyro-gazéification intégrée dans une seule unité de traitement, par l'utilisation des vapeurs d'eau issu du séchage dans l'étage II du processus, la consommation d'énergie diminue [4].

$$Q_{\text{etageII}}^{\text{intégrée}} = Q_{\text{etageII}} - Q_{\text{vap}}^{190} = 19646 \div 17249 \text{ kJ}$$

Pour un PCI équivalent du gaz de synthèse d'environ 10665 kJ/kg_{gazsec.} le disponible d'énergie :

$$\Delta Q = Q_{\text{syngaz}} - Q_{\text{etageII}} = 36197 - 21610 = -14587 \text{ kJ/kg}_{\text{coke}}$$

L'énergie consommée par la gazéification rapportée à l'énergie générée dans le gaz de synthèse représente approximatif 60%.

Pour un débit des déchets ménagères d'approximatif 200 t/jour correspond a une communauté d'environ 280 000 habitants (la production a été approximée à 0.7 kg/jour et habitant). Les données d'entrée sont présentés dans le tableau ci-dessous [3]:

Tableau 1

Combustible primaire « de surface » à partir d'une collectivité cible

Quantité	Débit OM	Débit coke	Débit carbone #1 (16% inertes)	Débit carbone#2 (30% inertes)	Débit eau	Débit SYNGAZ I	Débit SYNGAZ II
t/jour	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s
200	2,31	0,275	0,2314	0,1928	0,7-0,6	0,93494	0,77911

Dans la figure 2. on présente la production d'énergie électrique à partir d'une production de 200 t_{OM}/jour avec PCI d'environ un 9000 kJ/kg.

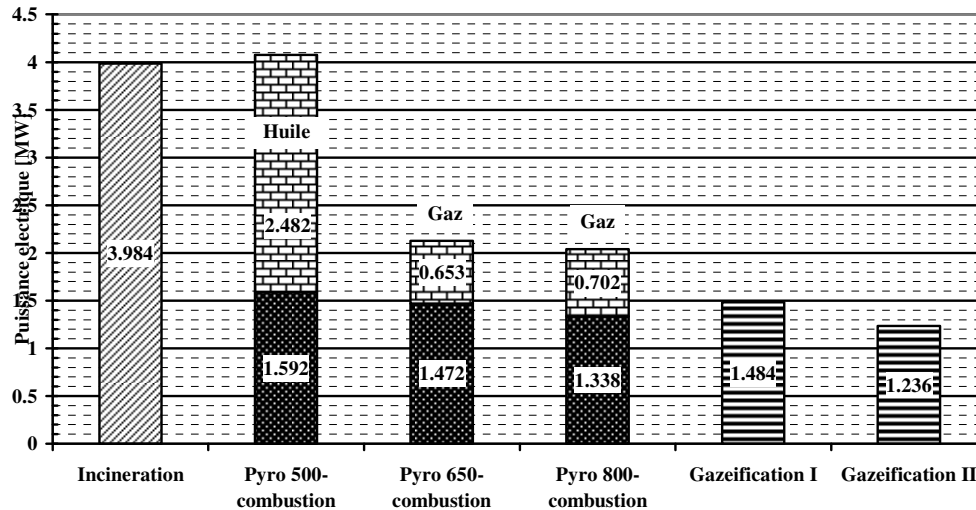


Fig. 2. La production d'énergie électrique pour un emplacement cible 200t_{OM}/j.

La première barre représente la puissance électrique disponible par l'incinération directe des OM. Pour les procédés de pyro-combustion les barres

représentant la puissance disponible par la combustion du coke de pyrolyse ensemble avec une fraction d'huile (pour la pyrolyse basse température) et avec une fraction de gaz de pyrolyse (pour la pyrolyse moyenne et haute température) restantes après l'alimentation des processus de pyrolyse.

De point de vue énergétique le processus avec la meilleure efficacité de conversion en énergie électrique est la pyro-combustion avec la valorisation de la quantité d'huile restante après le chauffage du réacteur de pyrolyse. Le rendement de la chaudière augmenté de 0,75 à 0,85 à cause de la supériorité du combustible en termes de PCI, surface spécifique. La production d'énergie électrique est d'environ 4 MW par rapport à 3,985 en incinération simple.

Si on considère le processus de pyrolyse à 650°C, sans production d'huile la production d'électricité par la combustion du coke baisse à approximatif 1,47 MW. Si on ajoute le disponible de gaz de pyrolyse après la combustion de la fraction nécessaire pour l'entretien du processus, la production d'énergie électrique augmente à 2,125 MW. Pour la pyrolyse haute température la puissance électrique valorisable ne dépasse pas 2 MW. Par contre à ce niveau de température est intéressante la gazéification à l'air et même à vapeurs d'eau (caractérisée par un temps de séjour très long : 40 minutes) [3], [4], [5].

La vapo-gazéification reste compétitive seulement pour déchets avec une importante fraction combustible (plus de 70% sur produit sec ou 45% sur humide) et cella à base des emballages carton, papier et plastique (produits avec une taux de cendres réduites). La production d'énergie électrique en ce cas la, ne dépasse 1,48 MW (gazéification I). La présence des putrescibles (végétaux) augmente la fraction des inertes dans le coke provenant de la fraction organique. Ça conduit à la décroissance de quantité de carbone et par conséquence à la diminution du gaz de synthèse (gazéification II) [6], [7].

4. Conclusions

Pour les déchets avec le PCI en dessous 6500 kJ/kg et humidité supérieure à 45% pour la production d'énergie électrique en incinération directe est nécessaire combustible support.

La vapo-gazéification reste compétitive seulement pour déchets avec une importante fraction combustible (plus de 70% sur produit sec ou 45% sur humide) et cella à base des emballages carton, papier et plastique (produits avec une taux de cendres réduites).

De point de vue énergétique le processus avec la meilleure efficacité de conversion en énergie électrique est la pyro-combustion avec la valorisation intégrale des produits de pyrolyse après le chauffage du réacteur. Le coke produit par la pyrolyse à basse température (450°C) en conditions d'auto entretien du processus (PCI > 4000kJ/kg) est un produit homogène, stockable qui peut être

valorisé énergétiquement dans une centrale électrique sans restrictions importantes sur les émissions des noxes comparatif à une centrale thermique classique.

Comme remarque importante, il faut souligné que la filière de conversion thermodynamique via moteur thermique présente l'avantage de la cogénération sans diminuer la production d'énergie électrique, comme pour la turbine à vapeur (en combustion). L'option pour une des filières est une fonction des conditions d'emplacement, d'évolution sur moyen et long terme de la production et type de déchets, politique énergétique régionale et nationale.

REFERENCES

- [1]. *A. N. Garcia, R. Font and A. Marcilla*, "Kinetic Studies of the Primary Pyrolysis of Municipal Solid Waste in a Pyroprobe 1000", in *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **vol. 23**, 1992, pp. 99-119.
- [2]. *A. M. Li, X. D. Li, S. Q. Li, Y. Ren, N. Shang, Y. Chi, J. H. Yan and K. F. Cen*, "Experimental Studies on Municipal Solid Waste pyrolysis in a Laboratory-Scale rotary Kiln", in *Energy*, **vol. 24**, 1999, pp. 209-218.
- [3]. *C. Marculescu*, Study on the thermal processes applied to municipal and assimilated solid waste, Ph.D. thesis, Compiègne University of Technology, France, Polytechnic University Bucharest, Romania, 2006.
- [4]. *C. Martin*, Modelisation and combustion criterion of the combined urban and common industrial wastes incineration. Ph.D. thesis, Compiègne University of Technology, France, 2001.
- [5]. *J. Rath and G. Staudinger*, "Cracking Reactions of Tar from Pyrolysis of Spruce Wood", in *Fuel*, **vol. 80**, 2001, pp. 1379-1389.
- [6]. *M. Dario*, Municipal Solid Waste gasification reactions for H₂ generation. State of the Art, Michigan State University, 2004.
- [7]. *G. Antonini et P. Gislais*, Traitement thermique des déchets industriels, *Technique & Documentation*, Lavoisier, 143 p., 1995.

