

ETUDE DES TRANSFERTS THERMIQUES PENDANT LA FRITURE DE BIOMASSES INDUSTRIELLES

Romdhana M. H., Hamasaiid A., Ladevie B., Lecomte D.

Université de Toulouse, MINES ALBI, RAPSODEE UMR CNRS 2392, ALBI, France, F81013

romdhanai@enstimac.fr, hamasaii@enstimac.fr, ladevie@enstimac.fr, lecomte@enstimac.fr

RESUME

Le procédé de friture par immersion forcée est utilisé pour le séchage des biomasses industrielles. La boue résiduaire issue du procédé de papeterie est la matière première utilisée dans les expériences de friture. Un mélange de graisses de cuisine, d'origine animale et végétale est principalement employé. Ce traitement thermique a pour but : (a) la production d'un combustible solide à haut pouvoir calorifique (≥ 18 MJ/kg), (b) la réduction des nuisances olfactives, et (c) la désinfection des micro-organismes pathogènes, ce qui implique la stabilisation des boues et la diminution des risques liés au recyclage ou l'élimination des boues. Le but du présent travail est de fournir une description qualitative des mécanismes de transferts thermiques pendant la friture, et d'estimer le coefficient de transfert convectif nécessaire à la conception et le contrôle du procédé de friture.

NOMENCLATURE

C_p	Capacité calorifique massique	($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Indices	
D	Coefficient de diffusion	($m^2.s^{-1}$)	w	Eau liquide
h	Coefficient de convection	($W.m^{-2}.K^{-1}$)	oil	Huile
H	Enthalpie	($J.kg^{-1}$)	s	Solide
m	Masse moyenne	(kg)	∞	Huile chauffante
S	Surface	(m^2)	sur	Surface du produit
T	Température	($^{\circ}C$)	0	Valeur initiale
ρ	Masse volumique	($kg.m^{-3}$)		

1. INTRODUCTION

Le traitement des boues résiduaires d'origine urbaine ou industrielle pose des soucis importants du point de vue environnementaux, financier et technologiques. En Europe, certaines législations telle que la directive européenne 91/271EEC [1], imposent une série de traitements secondaires des eaux usagées urbaines afin d'améliorer les rejets aqueux dans l'environnement. Cependant, l'importance de l'issue de gestion des déchets peut être vue du fait du volume de plus en plus important. La quantité produite annuellement est autour de 6900 millions de tonnes de matières sèches dans l'union européenne [2]. Toutefois, le recyclage ou l'élimination des boues constitue un défi sérieux en raison de sa nature très hétérogène en matières organiques olfactives ou en matières toxiques. La boue des stations d'épuration a été longtemps appliquée à l'agriculture comme amendement et remblai de sol. Néanmoins, les installations de traitement des eaux usagées reçoivent également des résidus toxiques. Ainsi la boue peut contenir des métaux lourds et des ions inorganiques. Dans l'union européenne, la directive 86/278/EEC [3] fixe des limites pour des métaux lourds et quelques minéraux, et indique aussi les quantités annuelles maximum potentiellement toxiques qui peuvent être appliquées dans le sol. Aussi bien que des métaux, la boue d'épuration peut contenir les micro-organismes pathogènes tels que des bactéries, des virus, des champignons et des parasites. Par ailleurs, les boues peuvent être désinfectées par des procédés

d'oxydation thermique [4]. Le problème des usines d'incinération des biomasses humides est la nécessité d'une énergie excessive pour atteindre les hautes températures et maintenir l'auto-combustion. Pour ceci, des méthodes de séchage thermique directes ou indirectes sont souvent employées, par lesquelles une partie plus ou moins importante de l'eau contenue dans les boues est évaporée. Souvent, les besoins énergétiques essentiels à la combustion nécessitent une chaleur d'appoint en utilisant le pétrole, le gaz, le charbon ou des huiles comme étant un moyen d'approvisionnement d'énergie [5]. Le procédé de friture constitue une nouvelles alternative au séchage thermique de la boue résiduaire [6]. En effet, les boues frites possèdent un pouvoir calorifique plus élevés qu'une boue séchées par un séchoir conventionnel. Le processus de séchage à air chaud contribue à l'amélioration de la valeur calorifique inférieur qui monte jusqu' à 6 MJ.kg⁻¹ contre 24 MJ.kg⁻¹ dans le cas du procédé de friture [7]. L'opération de friture est couramment utilisées dans l'industrie agroalimentaire, mais des applications innovantes ont été suggérées pour des matériaux autre que les produits alimentaires, comme le bois de construction ou les boues résiduaires [8, 9]. Malgré que la friture des produits alimentaires a été l'objet de plusieurs travaux de recherche [10,11, 12, 13, 14], il existe peu de résultats sur la friture des boues. Silva a étudié expérimentalement la perte de masse pendant la friture de boues [15]. Peregrina a développé des mesures en continues pour obtenir des données d'humidité et de la température [6]. Romdhana a proposé un modèle de diffusion monodimensionnel pour la perte d'eau et a relié l'imprégnation d'huile avec la teneur d'eau résiduaire [7]. L'objectif du présent travail est (a) développer un bilan énergétique global des flux de chaleurs entre une particule de boue et le fluide chauffant (l'huile de friture), (b) estimer le coefficient de transfert thermique pendant des expériences de friture, et (c) fournir une description qualitative des mécanismes thermiques.

2. MODELISATION DES TRANSFERTS THERMIQUES

2. 1. Description du problème physique

Cette recherche vise à estimer les transferts de chaleur entre une matrice poreuse (boue résiduaire humide) et une phase liquide non miscible à l'eau (huile de cuisine recyclée) pendant l'opération de friture. La première figure (Fig. 1) représente les différents flux de chaleur et leurs directions sur une section transversale d'une particule de boue cylindrique en contact avec une huile chauffée. La chaleur est transférée par la convection à partir de l'huile chaude vers la surface du produit. L'eau de la particule de boue diffuse vers l'extérieur et se vaporise au niveau de la surface. Tandis que le contenu d'humidité diminue, l'huile de friture diffuse dans les pores vides transférant la chaleur à l'intérieur du produit par advection. Dans cette étude, l'épaisseur de l'échantillon de boue est mince, et le changement de la température selon la direction radiale est considéré négligeable. Par conséquence, le transfert thermique par la conduction n'est pas considéré.

2. 2. Bilan d'énergie

Les boues frites sont des milieux poreux complexes, formées d'une phase d'eau, d'une phase d'huile et d'une matrice solide. Généralement, la description mathématique du transfert de la chaleur et de la masse dans un milieu poreux est formulée dans un volume élémentaire représentatif dans chaque phase. Malgré les différents transferts couplés entre les différentes phases, les températures d'eau, d'huile et de solide sont simplifiées en admettant l'hypothèse de l'équilibre thermique local entre phase [16, 17], soit :

$$\langle T \rangle^w \approx \langle T \rangle^{oil} \approx \langle T \rangle^s \approx \bar{T} \quad (1)$$

Avec \bar{T} est la température moyenne d'équilibre entre les phases, et l'opérateur $\langle \dots \rangle$ indique la température moyenne intrinsèque.

L'équation de conservation de l'énergie est écrite comme suit :

$$\frac{dU}{dt} = hS(T_{\infty} - T_{sur}) + H_w \frac{\partial m_w}{\partial t} + H_{oil} \frac{\partial m_{oil}}{\partial t} \quad (2)$$

Le premier terme de l'équation 2 représente le taux de variation de l'énergie interne dans les boues frites. L'expression de l'énergie interne est définie par :

$$U = (m_w C_{p_w} + m_{oil} C_{p_{oil}} + m_s C_{p_s}) \bar{T} \quad (3)$$

Le premier terme du second membre de l'équation (2) représente le flux de chaleur transmis à la surface du produit par convection, le deuxième terme représente le flux de chaleur libéré par la vapeur d'eau, et le troisième terme représente le transport de la chaleur par advection suite à la diffusion d'huile dans la matrice poreuse du produit.

Avec C_p et l'enthalpie de la vapeur saturée sont calculées à la température moyenne d'équilibre. L'enthalpie d'huile à la température d'huile chauffante est exprimée par :

$$H_{oil} = C_{p_{oil}} T_{\infty} \quad (4)$$

La diffusion d'eau vers la surface est due à un gradient de concentration, le flux est exprimé par la loi de Fick :

$$\frac{\partial m_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_w \frac{\partial m_w}{\partial r} \right) \quad (5)$$

Pendant la friture, la perte d'eau est le résultat d'une absorption substantielle des huiles dans le produit [11]. Un modèle physique est employé pour décrire le contenu d'huile. Il décrit la l'absorption d'huile immédiatement suite à la vaporisation de l'eau, la masse d'huile imprégnée est donnée par [11]:

$$m_{oil} = \frac{\rho_{oil}}{\rho_w} (m_w^0 - m_w) \quad (6)$$

2. 3. Propriétés physiques et thermiques

Le modèle mathématique nécessite la connaissance des propriétés physiques et thermiques de la boue et de l'huile chauffante dans les conditions du processus utilisées. Le coefficient de diffusion est calculé par la corrélation (7) [7] dans laquelle la température d'huile chauffante est exprimée en K.

$$D_w = (0,0013T_{\infty} + 1,02) \times 10^{-6} \exp \left(\frac{13T_{\infty} - 3825}{T_{\infty}} + 0,0107 \frac{m_w^0}{m_w^0 + m_s} \right) \quad (7)$$

La chaleur spécifique de la phase solide est déterminée expérimentalement à l'aide d'une thermo-balance calorimétrique (TG-DSC 111). La corrélation suivante est employée:

$$C_{p_s} [kJ.kg^{-1}.K^{-1}] = \sum_{i=-3}^5 a_i T^i [^{\circ}C] \quad (8)$$

Les coefficients a_i sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 1. Les coefficients a_i utilisés dans la corrélation (8)

i	-3	-2	1	0	1	2	3	4	5
a_i	$1,9 \cdot 10^7$	$-2,5 \cdot 10^6$	$-1,4 \cdot 10^5$	-44	83	-0,97	$7 \cdot 10^{-3}$	$-2,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$

Les corrélations linéaires suivantes sont employées pour décrire la masse volumique et la capacité calorifique de l'huile chauffante [6] :

$$C_{p_{oil}} = 2009,84 + 2,92T \quad (9)$$

$$\rho_{oil} = 934,43 - 0,6379T \quad (10)$$

3. MATERIELS ET METHODES

La boue utilisée dans les expériences a été produite par la société TEMBEC SA Company (Saint-Gaudens, France), qui traite les pâtes de papier. Les huiles de friture sont des huiles alimentaires usagées et ont été fournies par Sud Recuperation Company (France).

L'élément principal du dispositif expérimental est une friteuse commerciale qui peut contenir jusqu'à 3 litres d'huile. La friteuse est équipée d'une résistance électrique immergée dans le fond de cuve. La puissance maximale disponible est de 2 kW. La température d'huile dans le bain est maintenue constante à la température imposée à l'aide d'un système d'asservissement PID. Un agitateur à palettes a été ajouté au dispositif afin d'homogénéiser la température du bain. Les boues sont extrudées dans un cylindre métallique à grille, ayant des mailles de 1 mm. Le diamètre et la longueur des échantillons sont de 8 mm et de 32 mm, respectivement. La teneur en humidité initiale de la boue est mesurée entre 1.47 et 1.53 (par kg de boues sèches). Les échantillons de boues sont immergés dans le bain d'huile avec trois micro-thermocouples de type K ayant chacun 0.2 mm de diamètre et 0.5 mm au niveau de la soudure. La température est mesurée sur trois positions : sur la surface de l'échantillon ($r = 4mm$), dans le centre du produit ($r = 0mm$), et à l'intermédiaire ($r = 2mm$). Quatre niveaux de températures ont été imposés : à 110, 120, 130 et 140°C. Un enregistreur de température a été employé afin de suivre les températures du produit à temps réel.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des transferts de chaleurs et de masses pendant la friture est basée sur les données de la cinétique de séchage, la cinétique d'imprégnation d'huile et la température du produit frite pendant le processus. L'équation différentielle (5) est résolue sous MATLAB en utilisant le solveur *pdepe*. Pour chaque pas de temps les résultats de l'humidité locale sont intégrés en utilisant la fonction *quad* sous MATLAB pour déterminer l'humidité moyenne du produit, et estimer par la suite la concentration d'huile imprégnée à partir de la relation 6. La température du produit est déterminée expérimentalement, la figure 2 montre l'évolution de la température du produit pour une température d'huile de friture de 130°C. La température au centre augmente jusqu'au point d'ébullition d'eau ($\approx 105^\circ\text{C}$), continue à augmenter lentement jusqu'à ce que toute l'eau soit vaporisée, et après environ 100-700 s la température continue à s'élever pour atteindre finalement la température du bain. La température nécessaire pour calculer l'énergie interne (Fig. 5) est estimée à partir de la température locale moyenne. Pendant l'étape initiale de chauffe, la température du produit augmente brusquement. Par conséquent, le taux de l'énergie interne fluctue considérablement et quand l'ébullition commence, le taux de variation de l'énergie interne demeure constant (état d'équilibre). La température moyenne d'équilibre entre les phases a été également utilisée pour prédire le flux de chaleur due à la vaporisation et à l'imprégnation d'huile. Comme indiqué sur les figures 3 et 4 le taux de séchage et le taux d'imprégnation d'huile présentent un pic au début du processus. Ceci s'explique par la grande différence de température entre l'huile de chauffe et la surface de l'échantillon, et également une forte agitation dès l'apparition des premières bulles sur la surface du produit. Le coefficient de transfert thermique par convection est estimé pendant le processus de friture (Fig. 6). Ce coefficient est défini comme étant le flux de chaleur transmis à la surface de boues dès qu'il existe un gradient de température d'unité entre le produit et l'huile ambiante. Le coefficient de transfert thermique monte rapidement au début de la friture et atteint son maximum après environ 48-168 s de friture selon la température d'huile imposée ($T_\infty = 110-140^\circ\text{C}$). Le maximum atteint est plus élevés pour les plus hautes températures d'huile. Les valeurs maximales estimées sont de : 900, 1100, 1400 et

$1700 \text{ W.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$, respectivement pour les températures 110, 120, 130 et 140°C . Par la suite, les valeurs de h diminuent et se stabilisent entre 100 et $200 \text{ W.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$.

5. CONCLUSION

L'objectif général de cette étude était la détermination du coefficient de transfert thermique par convection, pendant la friture de boues et de fournir une description qualitative des mécanismes de transferts thermiques. Le maximum h atteint est plus important pour des échantillons frits à température élevée. Le minimum de h observé varie entre 100 et $200 \text{ W.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ et un maximum de $1700 \text{ W.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ est observé pendant la friture à température d'huile de 140°C . La connaissance du coefficient de transfert thermique pendant le processus de friture est très important pour le calcul de conception et le contrôle du procédé de friture.

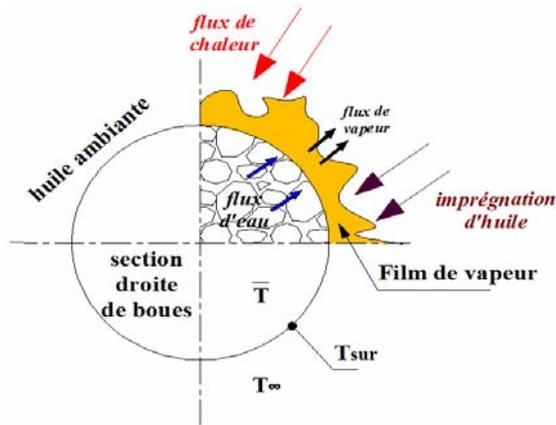


Figure 1. Mécanismes de transferts de chaleur et de masses pendant la friture d'une particule de boues cylindrique

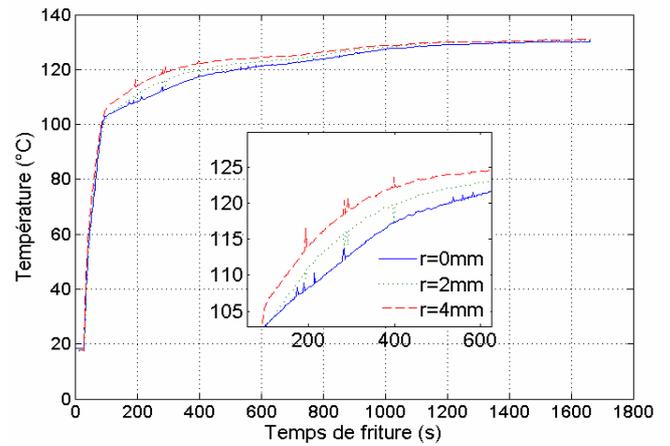


Figure 2. Variation de la température de boue pour $T_\infty = 130^\circ\text{C}$

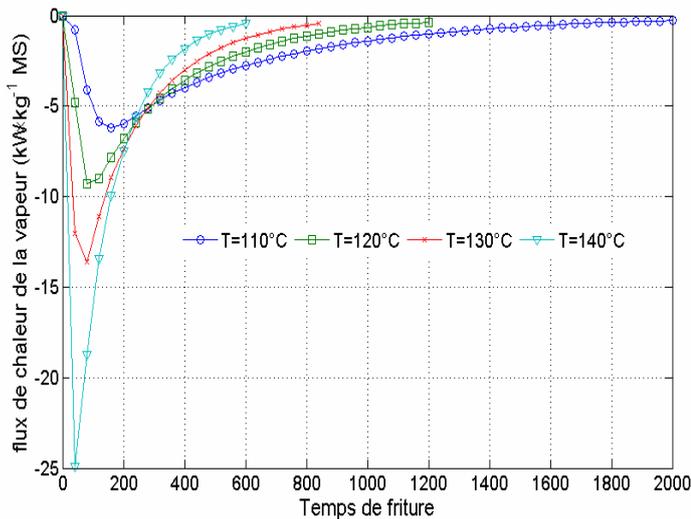


Figure 3. Flux de la chaleur d'ébullition pendant la friture

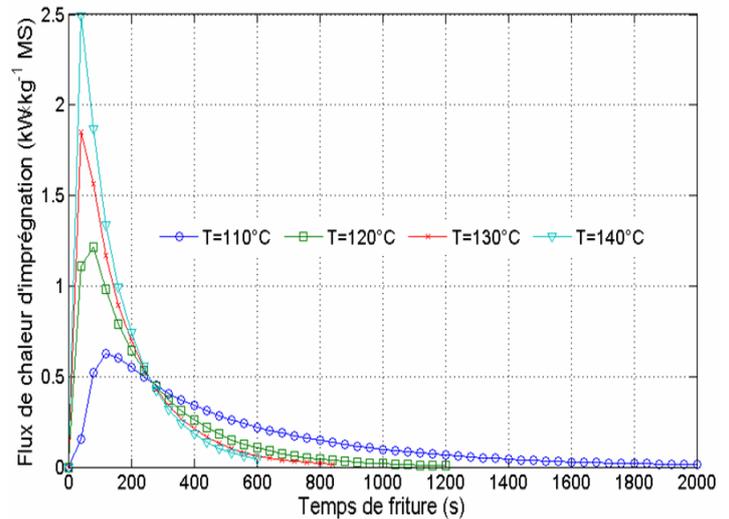


Figure 4. Flux de chaleur d'imprégnation pendant la friture

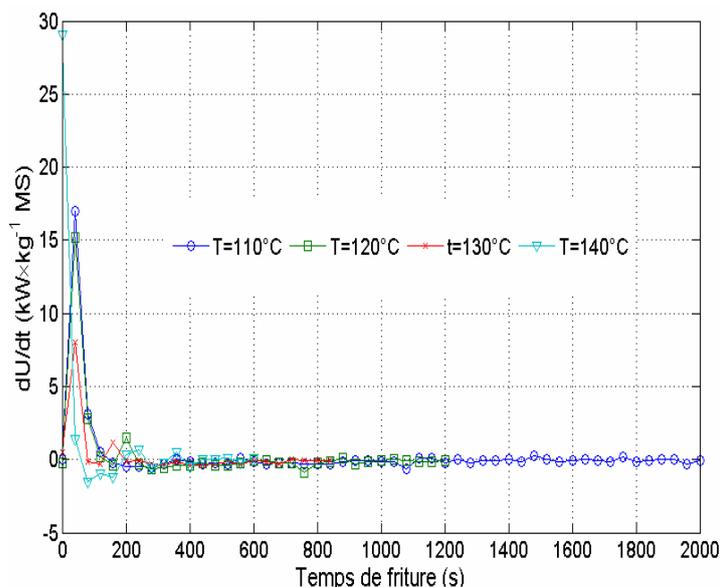


Figure 5. Variation de l'énergie interne

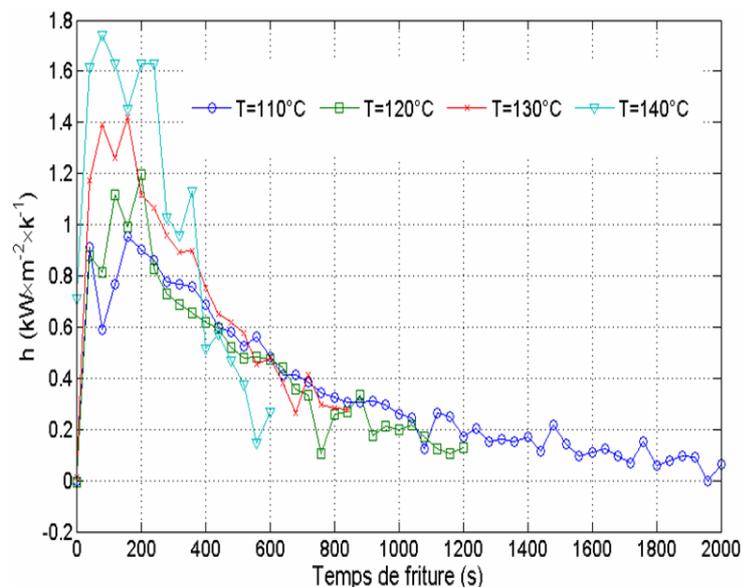


Figure 6. Coefficient de transfert convectif pendant la friture

RÉFÉRENCES

- [1] Council Directive 91/271/EEC (1991), Urban wastewater treatment, Environmental Europe Commission.
- [2] Catallo W.J. and Comeaux J.L. (2007). Reductive hydrothermal treatment of sewage sludge. Waste Management.
- [3] Council Directive 86/278/EEC (1986), Waste management, Europe Commission.
- [4] Werther J. and Ogada T. (1999). Sewage sludge combustion. Process in Energy and Combustion Science, 25, 55, 116.
- [5] Tchobanoglous G. Burton F. L. Stensel H. D. (2003) Wastewater Engineering Treatment and Reuse fourth edition, McGraw-Hill New York.
- [6] Peregrina C., Arlabosse P., Lecomte D. and Rudolph V. (2006). Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge. Drying technology, 24, 797-818.
- [7] Romdhana M. H., Ladevie B., Hamasaiid A. and Lecomte D., 2008. Energy Valorization of Industrial Biomass: Using a Batch Frying Process for Sewage Sludge. 2nd International Conference of Engineering for waste Valorisation.
- [8] Grenier D., Bohuon P., Meot J. M., Lecomte D. and Baillers H. (2007). Heat and mass transfer in frying of wood. Drying Technology 25, 1532, 2300.
- [9] Vitrac O. (2000). Experimental characterization and modelling of the frying operation, PhD. Thesis Ecole Nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires: Paris, France.
- [10] Baumann B. and Escher F. (1995). Mass and Heat Transfer during Deep-Fat Frying of Potato Slices-I. Rate of Drying and Oil Uptake. Lebensm.-Wiss.-Technol., 28, 395, 403.
- [11] Chen Y. and Moreira R. G. (1997). Modelling of a Batch Deep-Fat Frying Process for Tortilla Chips. Institution of Chemical Engineers. 75, 181, 189.
- [12] Ngadi M. O., Watts K. B. and Correia L. R. (1996). Finite Element Method Modelling of Moisture Transfer in Chicken Drum during Deep-Fat Frying. Journal of Food Engineering. 32, 11,20.
- [13] Pedreschi F. and Moyano P. (2005). Oil uptake and texture development in fried potato slices. Journal of Food Engineering. 70, 557, 563.
- [14] Totte A., Diaz A., Marouze C. and Raoult-Wack A. L. (1996). Deep-Fat Frying of Plantain Experimental Study of Solid Liquid Phase Contacting System. Lebensm.-Wiss.-Technol. 29, 599, 605.
- [15] Silva D. P., Rudolph V., Taranto O. P. (2005). The drying of sewage sludge by immersion frying. Brazilian Journal of Chemical engineering 22, 271-276.
- [16] Farkas B. E., Singh R. P. and Rumsey T. R. (1996). Modelling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model development. Journal of food Engineering, 29, 211, 226.
- [17] Whitaker S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advances in heat transfer, 13, 119, 202.