



# Étude d'un capteur plan à air destiné à un séchoir solaire : Comparaison du mode passif au mode actif

Réda Khama<sup>\*1,2</sup>, Farida Aissani<sup>1</sup>, Rezak Alkama<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie de l'Environnement, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algeria

<sup>2</sup> Univ. Ouargla, Fac. Sciences Appliquées, Lab. Génie des Procédés, Ouargla 30000, Algeria

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie Électrique, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algeria

\*redkhama@yahoo.fr

**Résumé**— Ce papier présente une étude expérimentale menée sur un capteur plan à air intégré à un séchoir solaire de type indirect destiné au séchage des produits agroalimentaires sous les conditions météorologiques de Ouargla (Latitude : 31° 56' 57" N – Longitude : 5° 19' 30" E – Altitude : 138 m) au sud-est de l'Algérie. Le but essentiel des expériences réalisées est de comparer le mode passif (ventilation naturelle) au mode actif (ventilation forcé) du capteur en question.

L'étude comparative montre que l'augmentation du rayonnement solaire a plus d'influence sur les températures du capteur solaire en ventilation naturelle qu'en ventilation forcée où les valeurs du rendement thermique sont meilleures. En outre, la valeur de ce dernier paramètre augmente linéairement avec l'augmentation du rayonnement solaire entre 400 et 800 W/m<sup>2</sup> pour des vitesses de l'air fixées entre 1 et 1.40 m/s alors que l'effet de la vitesse reste négligeable pour une valeur voisine de 800 W/m<sup>2</sup>.

**Mots clefs**— Capteur thermique solaire, Mode passif, Mode actif, Expérimentation, Rendement thermique.

## I. INTRODUCTION

Les séchoirs solaires destinés au séchage des produits agroalimentaires peuvent être classés en séchoirs à ventilation naturelle (mode passif) et séchoirs à ventilation forcée (mode actif). Dans les séchoirs à convection naturelle, le flux d'air est habituellement établi par la flottabilité du flux d'air induit. Dans les séchoirs à convection forcée, le flux d'air est fourni à l'aide de ventilateurs actionnés soit par l'électricité/module solaire, soit par un combustible fossile [1].

Le séchoir solaire indirect est le type le plus ancien des séchoirs solaires, il se compose d'un capteur solaire séparé muni à son dessus d'une couverture transparente et intégré à une unité de séchage [1]. La partie essentielle d'un tel appareil est le capteur qui est un genre spécial d'échangeurs de chaleur transformant l'énergie solaire en énergie interne du milieu de transport. C'est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant, le convertit en chaleur puis transfère cette chaleur à un fluide (eau ou air) traversant le capteur [2]. Il est à noter que plusieurs travaux ont été réalisés sur ces capteurs solaires ([3] – [6]).

Il existe essentiellement deux types de capteurs solaires [3] :

- Capteurs solaires non-concentrateurs ou stationnaires qui peuvent être classés, à leur tour, en trois catégories :
  - Capteurs solaires plans.
  - Capteurs paraboliques fixes composés.
  - Capteurs à tubes sous vide.
- Capteurs solaires concentrateurs.

Le but essentiel de cette étude expérimentale est de comparer, en termes de températures et d'efficacité, le fonctionnement en deux modes différents d'un capteur solaire plan à air intégré à un séchoir solaire indirect conçu et réalisé au Laboratoire de Génie des Procédés - Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie. Quelques effets de la vitesse de l'air et du rayonnement solaire sont également examinés.

## II. MATERIELS ET METHODES

### A. Le capteur solaire

Le capteur solaire utilisé dans cette étude est de type plan à air et est, en réalité, la partie essentielle du séchoir solaire indirect réalisé par [2,7]. Tout le dispositif a été développé sur la base des exigences techniques pour le séchage des fruits et légumes sous les conditions météorologiques de la ville de Ouargla au sud-est de l'Algérie.

Le choix des dimensions et des matériaux du séchoir solaire indirect, en particulier le capteur solaire, était lié à la disponibilité des matériaux locaux et à une optimisation expérimentale menée par [2].

La figure 1 est le schéma du capteur solaire plan à air en question avec des dimensions totales de (1.90×1.14×0.16) m<sup>3</sup> ([2],[7]). La face arrière et les parois latérales sont isolées thermiquement avec 7 cm d'épaisseur de laine de verre. La couverture est en verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur et l'absorbeur est une feuille de cuivre de 0.5 mm d'épaisseur peinte en noir mat (non réfléchissante) devant transmettre l'énergie rassemblée à l'air en évitant toutes les pertes thermiques par conduction, par convection et par rayonnement, des diverses parties périphériques vers l'extérieur.

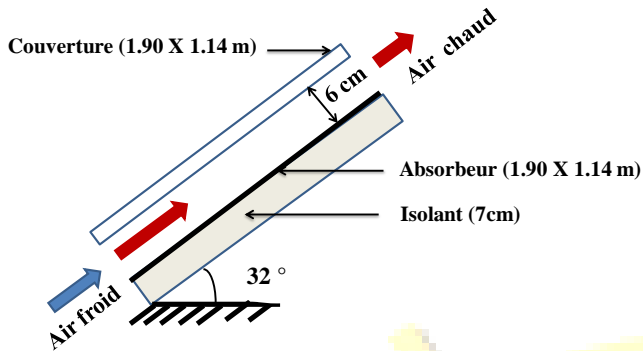
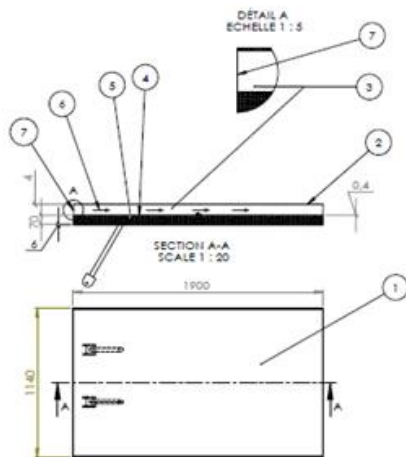


Fig. 1 Schéma du capteur solaire plan à air

### B. Procédure expérimentale

Au cours des expériences, le capteur solaire plan à air a été orienté directement vers l'équateur, face au sud afin de maximiser le rayonnement solaire incident. Il a été incliné d'un angle d'environ 32°, une valeur égale à la latitude du lieu ([3], [8] – [10]).

Les paramètres recherchés ont été mesurés avec des instruments appropriés. En effet, plusieurs sondes ont été fixées à différents endroits (Fig. 2) et reliés à un instrument multifonctionnel (C.A 1051 - CHAUVIN ARNOUX) au moment des mesures. Les caractéristiques des instruments de mesure et les paramètres mesurés sont mentionnés dans le tableau I.



- (1) Capteur solaire
- (2) Couverture
- (3) Conduit d'air
- (4) Absorbeur
- (5) Isolant
- (6) Direction de l'air
- (7) Positions des thermocouples (Entrée et sortie).

Fig. 2 Emplacement des éléments de mesure au niveau du capteur solaire ([2],[7])

TABLEAU I  
SPECIFICATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURE ([2],[7])

Paramètre	Instrument	Précision	Résolution
Température ambiante	Thermo-hygromètre	± 2% de la lecture ± 0.1 °C	0.1 °C
Humidité ambiante	Thermo-hygromètre	± 1% de la lecture ± 1.5 %	0.1 %
Rayonnement solaire	Kipp & Zonen pyrometer	0.1 W/m <sup>2</sup>	/
Températures de l'air dans le capteur	Chromel-alumel Thermocouple de type K	± 0.01 °C	/
Vitesse de l'air dans le capteur	Thermo-anémomètre à fil chaud	± 3% de la lecture ± 0.03 m/s	- 0.01 m/s

Les expériences ont été réalisées sur le capteur solaire en ventilations naturelle et forcée. En ventilation forcée, un ventilateur d'air de 75 W de puissance a été mis en marche et la vitesse de l'air dans le capteur solaire a été ajustée sur trois vitesses différentes (1, 1.15 et 1.40) m/s à l'aide d'une soupape (valve) manuelle raccordée à l'entrée de l'air.

### C. Analyse de données

Le rendement thermique instantané du capteur solaire a été estimé en utilisant l'équation 1 [11] :

$$\eta = \frac{C_p m_a (T_{as} - T_{amb})}{A_s I} \quad (1)$$

où  $C_p$  est la chaleur spécifique de l'air en J/kg °C,  $m_a$  est le débit massique de l'air en kg/s,  $T_{as}$  est la température de l'air à la sortie du capteur solaire en °C,  $T_{amb}$  est la température ambiante en °C,  $A_s$  est la surface du capteur solaire en m<sup>2</sup> et  $I$  est le rayonnement solaire incident sur sa surface inclinée en W/m<sup>2</sup>.

L'équation (2) a été utilisée pour obtenir le débit massique de l'air dans le capteur :

$$m_a = \rho_a \cdot v_a \cdot A_a \quad (2)$$

où  $\rho_a$  est la masse volumique de l'air en kg/m<sup>3</sup>,  $v_a$  est la vitesse de l'air dans le capteur solaire en m/s et  $A_a$  est sa section transversale en m<sup>2</sup>.

## III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. Variations des paramètres extérieurs

Les variations du rayonnement solaire mesuré ( $I$ ), de la température ambiante ( $T_{amb}$ ) et de l'humidité relative de l'air ambiant ( $\varphi$ ) lors des expériences sont montrées sur la fig. 3. Une intensité solaire maximale a été observée à 13 heures. Elle variait entre 765 et 850 W/m<sup>2</sup> correspondant



respectivement, à la première journée (14/03/2012) et la dernière journée (25/04/2012) de la période d'étude. La température de l'air ambiant est faible au début et à la fin de la journée. Les maxima ont été enregistrés durant le pic du soleil entre midi et 15 heures quel que soit le jour. Les températures ambiantes moyennes pendant ces heures étaient de 29.3 et 36.9 °C le 14/03/2012 et le 25/04/2012 et elles ont diminué à 22.7 et 32.1 °C respectivement, en dehors des heures d'ensoleillement autour de 18 heures. L'humidité relative a une tendance inverse à celle de la température ambiante. Elle a diminué le premier jour de 36.4 à 12.5% environ et de 27.7 à 6.2% le dernier jour. Tous ces résultats sont en bon accord avec plusieurs résultats de la littérature comme ([12] – [14]).

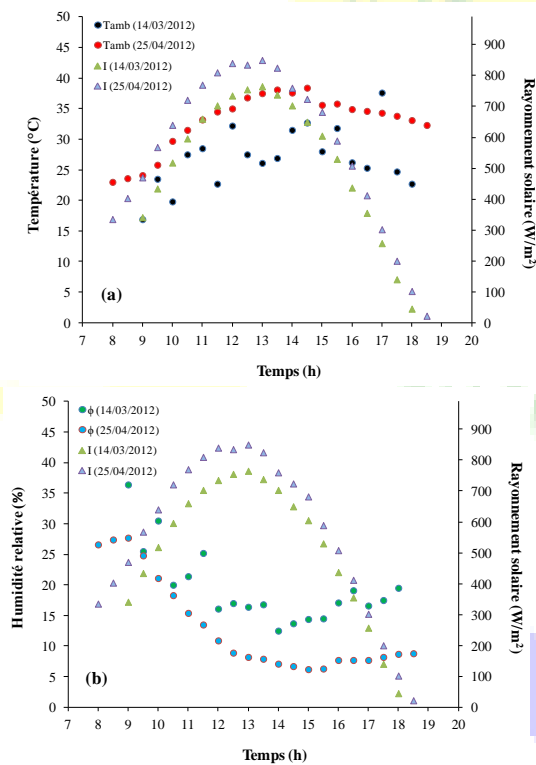


Fig. 3 Évolutions des paramètres extérieurs au cours de deux journées typiques : (a) Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante en fonction du temps. (b) Variation du rayonnement solaire et de l'humidité relative en fonction du temps. ([2],[7])

### B. Variations des températures du capteur solaire

La comparaison de l'élévation des températures de l'air, de l'absorbeur et de la couverture du capteur solaire est rapportée dans la fig. 4. Les variations de températures ( $\Delta T_a$ ) entre la température de l'air à la sortie du capteur ( $T_{as}$ ) et la température de l'air à son entrée ( $T_{amb}$ ), les variations de températures ( $\Delta T_{abs}$ ) entre la température de l'absorbeur à la

sortie du capteur ( $T_{abs}$ ) et sa température ( $T_{abse}$ ) à son entrée et les variations de températures ( $\Delta T_{cov}$ ) entre la température de la couverture à la sortie du capteur ( $T_{cove}$ ) et celle à son entrée ( $T_{cove}$ ) sont également représentées. Au vu de courbes obtenues, les variations de température sont faibles au début et à la fin de la journée et elles atteignent des valeurs maximales pendant les heures de pic du soleil indépendamment du mode de séchage.

Les variations de température du capteur sont moins importantes en ventilation forcée qu'en ventilation naturelle. Cet effet peut être attribué à la circulation de l'air qui assure le chauffage par convection de l'absorbeur [2,7]. L'élévation moyenne de la température de l'air à la sortie du capteur solaire est trouvée égale à 19.5 °C au cours de la ventilation naturelle et 7.1 °C au cours de la ventilation forcée [2,7]. Dans la référence [15], on a rapporté une augmentation de température de l'air de 4 °C dans le cas d'une ventilation forcée.

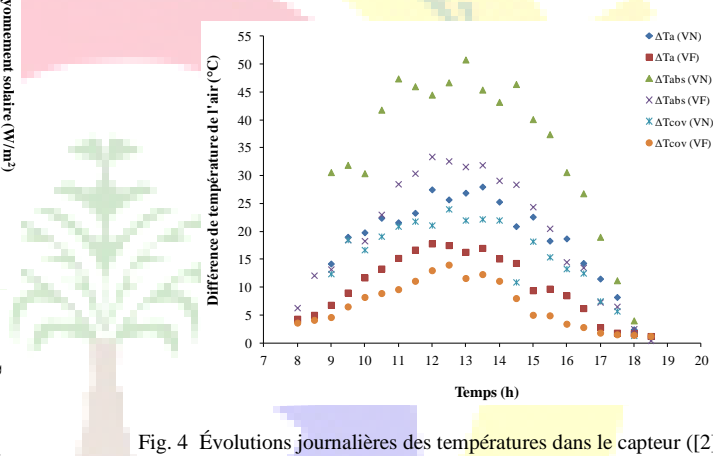


Fig. 4 Évolutions journalières des températures dans le capteur ([2],[7])

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, la température de l'air à la sortie du capteur solaire est beaucoup plus élevée que celle de l'air ambiant, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par [16]. L'augmentation en température de l'air ( $\Delta T_a$ ) à la sortie du capteur au-dessus de la température de l'air ambiant en fonction du rayonnement solaire est représentée sur la fig. 5. L'élévation de la température de l'air dans le capteur augmente de façon linéaire avec l'augmentation du rayonnement solaire. L'augmentation de la température de l'air est faible en ventilation forcée (VF) en comparaison avec la ventilation naturelle (VN). Les équations de régression suivantes ont été obtenues pour l'élévation de la température de l'air à la sortie du capteur avec le rayonnement solaire ([2],[7]) :

Ventilation naturelle :

$$\Delta T_a = 0.0301 + 4.361 \quad (3)$$

Ventilation forcée :

$$\Delta T_a = 0.0261 - 4.458 \quad (4)$$

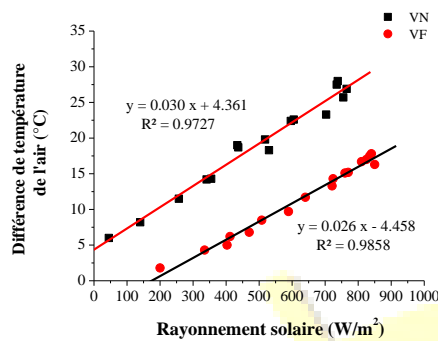


Fig. 5 Élévation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire ([2],[7])

La différence de température ( $\Delta T_a = T_{as} - T_{ae}$ ) est proportionnel au rayonnement solaire ce qui donne une idée sur le lien fort qui existe entre cette différence de température et l'intensité du rayonnement solaire. Les pentes sont égales à 0.030 et 0.026 pour la convection naturelle et convection forcée, respectivement. En admettant que la température ambiante est égale à la température de l'air à l'entrée du séchoir [17] et selon ([2],[7]), nous avons :

Ventilation naturelle :

$$T_{cs} = 0.030I + 4.361 + T_{amb} \quad (5)$$

Ventilation forcée :

$$T_{cs} = 0.026I - 4.458 + T_{amb} \quad (6)$$

### C. Variations du rendement thermique du capteur solaire

L'évolution du rendement du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire et du temps est représentée sur la fig. 6. Les variables dont dépend le rendement ( $\eta$ ) sont le rayonnement solaire et le débit de l'air dans le capteur. Les mêmes résultats ont été rapportés par d'autres auteurs [18]. Pour une valeur constante du rayonnement solaire, l'augmentation de la vitesse de l'air implique une augmentation de l'efficacité du capteur.

L'effet de la ventilation forcée (VF) sur l'efficacité est plus fort par rapport à la ventilation naturelle (VN). Dans le cas de la ventilation naturelle, les valeurs du rendement varient entre 26.61% et 46.32% avec une valeur moyenne de 32.32%, tandis qu'en ventilation forcée, les valeurs varient entre 33.45% et 66.56% avec une moyenne de 51.33%. La valeur maximale de 66.56% est atteinte à la mi-journée (midi).

La figure 6 montre également, que le rendement du capteur solaire augmente en fin de journée en dépit de la réduction du rayonnement solaire. Cet effet est dû à l'énergie emmagasinée par le capteur lors d'un maximum d'intensité solaire ([2],[7]).

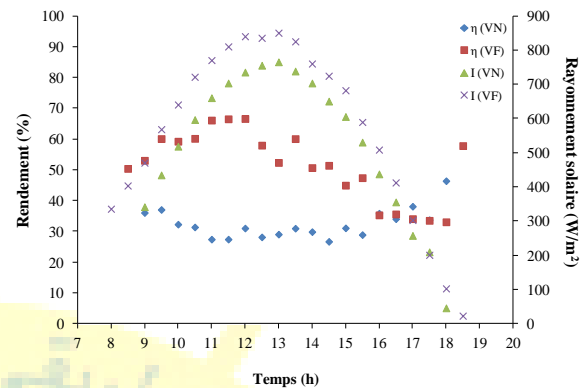


Fig. 6 Variation du rendement du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire et du temps ([2],[7])

La figure 7 présente l'évolution temporelle de la température du capteur solaire pour différentes vitesses de l'air. L'augmentation de la température de l'air du capteur est inversement proportionnelle à la vitesse de l'air et elle est plus élevée dans le cas de la ventilation naturelle comparée au cas de la ventilation forcée.

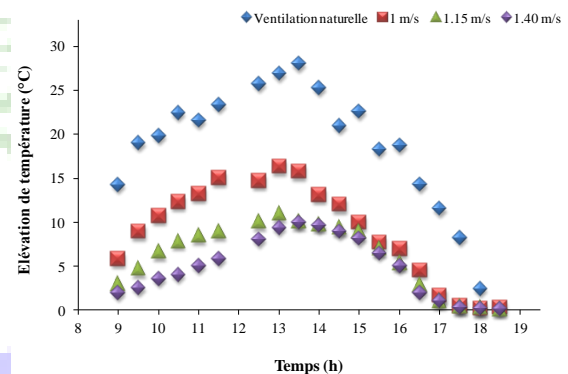


Fig. 7 Effet de la vitesse sur l'élévation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire ([2],[7])

La figure 8 montre l'effet du rayonnement solaire sur le rendement du capteur dans le cas de la ventilation forcée. Le rendement du capteur augmente linéairement avec l'augmentation du rayonnement solaire dans l'intervalle 400 et 800 W/m<sup>2</sup> avec des vitesses d'air comprises entre 1 et 1.40 m/s. L'effet de la vitesse de l'air sur le rendement est négligeable lorsque l'intensité solaire est voisine de 800 W/m<sup>2</sup>. Des études sur les mêmes variations et effets ont été rapportées dans les travaux de [7], [18] et [19]. Ces travaux ont donné lieu à des comportements similaires du capteur solaire plan pour des applications de séchage et une influence similaire du rayonnement solaire et de la vitesse de l'air a été obtenue.

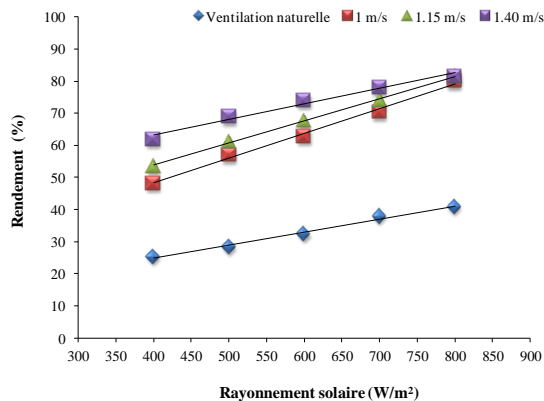


Fig. 8 Effet du rayonnement solaire sur le rendement pour différentes vitesses de l'air ([2],[7])

#### IV. CONCLUSIONS

Les conclusions principales de cette étude expérimentale comparative peuvent être résumées comme suit :

- L'augmentation du rayonnement solaire a plus d'influence sur les températures du capteur solaire en ventilation naturelle (mode passif) qu'en ventilation forcée (mode actif).
- En ventilation naturelle, les valeurs du rendement thermique du capteur solaire varient entre 26.61 et 46.32% avec une moyenne de 32.32%, alors qu'en ventilation forcée, elles varient entre 33.45 et 66.56% avec une moyenne de 51.33%.
- Le rendement du capteur solaire augmente linéairement avec l'augmentation du rayonnement solaire ( $400 \leq I \leq 800 \text{ W/m}^2$ ) pour des vitesses de l'air fixées entre 1 et 1.40 m/s, mais l'effet de la vitesse de l'air sur l'efficacité du capteur solaire est négligeable pour un rayonnement solaire voisin de  $800 \text{ W/m}^2$ .

#### REFERENCES

- [1] S. Janjai, and B.K. Bala, "Solar Drying Technology", *Food Engineering Reviews*, 4 (1), pp. 16-54, 2012.
- [2] R. Khama, "Conception, réalisation et simulation d'un séchoir solaire opérant en mode convectif utilisé pour le séchage de produits agroalimentaires", Thèse de Doctorat, Département de Génie des procédés. Université Abderrahmane Mira Bejaia, Algérie, 2016.
- [3] A.K. Soteris, "Solar thermal collectors and applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (3), pp. 231-295, 2004.
- [4] R. Ben Slama, "The air solar collectors: Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer", *Solar Energy*, 81(1), pp. 139-149, 2007.
- [5] D. Luna, Y. Jannot, and J.P. Nadeau, "An oriented-design simplified model for the efficiency of a flat plate solar air collector", *Applied Thermal Engineering*, 30 (17&18), pp. 2808-2814, 2010.
- [6] K. Weiqiang, W. Zhifeng, F. Jianhua, B. Peder, P. Bengt, C. Ziqian, and F. Simon, "An improved dynamic test method for solar collectors", *Solar Energy*, 86 (6), pp. 1838-1848, 2012.
- [7] R. Khama, F. Aissani, and R. Alkama, "Design and performance testing of an industrial-scale indirect solar dryer", *Journal of Engineering Science & Technology*, 11 (9), pp. 1263-1281, 2016.
- [8] L. Bennamoun, and A. Belhamri, "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products", *Journal of Food Engineering*, 59 (2&3), pp. 259-266, 2003.
- [9] S. Boughali, H. Benmoussa, B. Bouchekima, D. Mennouche, H. Bouguettaia, and D. Bechki, "Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara", *Solar Energy*, 83, pp. 2223-2232, 2009.
- [10] W. Aissa, M. El-Sallak, and A. Elhakem, "An experimental investigation of forced convection flat plate solar air heater with storage material", *Thermal Science*, 16, pp. 1105-1116, 2012.
- [11] S. Karatasou, M. Santamouris, and V. Geros, "On the calculation of solar utilizability for south oriented flat plate collectors tilted to an angle equal to the local latitude", *Solar Energy*, 80, pp. 1600-1610, 2006.
- [12] M. Dattatreya, and D.V.K. Kadam Samuel, "Convective Flat-plate Solar Heat Collector for Cauliflower Drying", *Biosystems Engineering*, 93, pp. 189-198, 2006.
- [13] A. El-Beltagy, G.R. Gamea, and A.H. Amer Essa, "Solar drying characteristics of strawberry", *Journal of Food Engineering*, 78, pp. 456-464, 2007.
- [14] A.A. El-Sebaai, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, and H.G. El-Gohary, "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer", *Energy Conversion and Management*, 43, pp. 2251-2266, 2002.
- [15] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyan, and G. Ranko, "A review of solar drying technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 2652-2670, 2012.
- [16] I. Montero, J. Blanco, T. Miranda, S. Rojas, and A.R. Celma, "Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by products", *Energy Conversion and Management*, 51, pp. 1510-1521, 2010.
- [17] M.A. Hossain, and B.K. Bala, "Drying of hot chilli using solar tunnel drier", *Solar Energy*, 81, pp. 85-92, 2007.
- [18] Md. Azharul Karim, and M.N.A. Hawlader, "Performance evaluation of a v groove solar air collector for drying applications", *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 121-130, 2006.
- [19] S. Chemkhi, F. Zagrouba, and A. Bellagi, "Drying of agricultural crops by solar energy", *Desalination*, 168, pp. 101-109, 2004.
- [20] R. Ben Slama, and M. Combarous, "Study of orange peels dryings kinetics and development of a solar dryer by forced convection", *Solar Energy*, 85, pp. 570-578, 2011.