

# Optimisation du refroidissement par évaporation directe basée sur des matériaux organiques dans un climat méditerranéen

## Optimization of direct evaporative cooling based on organic materials in a Mediterranean climate

Soulaimane Sabri<sup>1</sup>, Mustapha Mahdaoui<sup>2\*</sup>, Azzeddine Laknizi<sup>3</sup>, Aicha Chorak<sup>1,4</sup>, Mustapha Ouardouz<sup>1</sup>, Mohammed Ahachad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire MaSEEL (Materials, Systems and Energy Engineering Laboratory), FST de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc.

<sup>2</sup>Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines INSA Hauts-de-France, France. \*(mustapha.mahdaoui@uphf.fr)

<sup>3</sup>LFP UAE, Tétouan, Maroc

<sup>4</sup>Laboratory of Systems, Control, and Decision (LSCD), New Science School of Engineering (ENSI), Tangier, Morocco

**Résumé** - Le refroidissement par évaporation, constitue une alternative efficace grâce à sa faible consommation d'énergie et à l'absence de fluides frigorigènes polluants. Cette technique écologique, est particulièrement adaptée aux climats chauds et secs. Cinq matériaux organiques locaux (les fibres d'eucalyptus, la laine de mouton, la cellulose de cactus, les fibres de palmier et les copeaux de bois) ont été utilisés comme surfaces d'échange pour ce système de climatisation, testés à l'aide d'un banc d'essai. Parmi les cinq matériaux naturels étudiés, les fibres d'eucalyptus et la cellulose de cactus se distinguent, avec des efficacités de saturation moyenne respectives de 64,13 % et 56,68 %. La fibre d'eucalyptus permet de dissiper plus de 2,5 kW de chaleur, tandis que la laine de mouton n'en dissipe qu'environ 1,5 kW. Le coefficient EER dépasse 40 pour les fibres d'eucalyptus et avoisine 25 pour la cellulose de cactus.

**Mots clés** : Refroidissement par évaporation directe, Matériaux organiques, Efficacité de saturation, Capacité de refroidissement, EER, Chute de température, Tampon.

**Abstract** - Evaporative cooling offers an efficient and sustainable alternative due to its low energy consumption and the absence of polluting refrigerants. This eco-friendly technique is particularly well-suited for hot and dry climates. Five local organic materials, including eucalyptus fibres, sheep wool, cactus cellulose, palm fibres, and wood shavings, were utilized as exchange surfaces in this cooling system and tested using a dedicated test bench. Among the five natural materials studied, eucalyptus fibres and cactus cellulose demonstrated the best performance, with average saturation efficiencies of 64.13% and 56.68%, respectively. Eucalyptus fibres dissipated over 2.5 kW of heat, whereas sheep wool managed only about 1.5 kW. The energy efficiency ratio (EER) exceeded 40 for eucalyptus fibres and was approximately 25 for cactus cellulose.

**Keywords:** Direct evaporative cooling, Organic materials, Saturation efficiency, Cooling capacity, EER, Temperature drop, Pad.

## Nomenclature

$A_c$	Section de passage de l'écoulement, $m^2$	$Q_c$	Capacité de refroidissement, kW
$C_p$	Capacité thermique à pression constante, $kJ/kg \cdot K$	$W_p$	Puissance de la pompe, kW
$V$	Vitesse d'écoulement, m/s	$W_{ven}$	Puissance du ventilateur, kW
$T_{d1}$	Température d'air à l'entrée, $^{\circ}C$	<i>Symboles grecs</i>	
$T_{d2}$	Température de l'air à la sortie, $^{\circ}C$	$\varepsilon$	Efficacité de saturation
$T_{w1}$	Température humide de l'air à l'entrée, $^{\circ}C$	$\rho$	Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
$\dot{m}$	Débit massique de l'air, kg/s		

## 1. Introduction

La consommation énergétique connaît depuis plusieurs années une augmentation significative, essentiellement sous l'effet de la croissance démographique et de l'amélioration des conditions de vie. En 2022, le secteur du bâtiment a représenté environ 30 % de la consommation mondiale d'énergie, dont près de 21% pour les bâtiments résidentiels. Cette forte demande énergétique est principalement attribuée aux systèmes de Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC). À titre d'exemple, la consommation énergétique liée à la climatisation a connu une augmentation d'environ 5 % en 2022 par rapport à 2021. Face à l'urgence climatique, il devient crucial de réduire cette consommation afin de limiter le réchauffement climatique à  $1,5^{\circ}C$ , conformément à l'initiative "Buildings Breakthrough", soutenue lors de la COP28.

Aujourd'hui, le marché de la climatisation est largement dominé par la technique de compression à vapeur, dont les avantages incluent une bonne stabilité, une longue durée de vie et un coefficient de performance (COP) allant de 2 à 4. Toutefois, cette technologie nécessite une grande consommation d'électricité, ce qui suscite des interrogations quant à sa durabilité environnementale. Pour remédier à ce problème, les techniques de refroidissement à absorption/adsorption ont été développées afin de réduire l'empreinte carbone liée au compresseur. Néanmoins, leur COP demeure assez faible, se situant généralement entre 1,2 et 1,4 [2].

Dans ce contexte, le refroidissement par évaporation se présente comme une alternative, notamment en climat méditerranéen où les étés chauds et secs favorisent l'efficacité de ce procédé. L'adoption de matériaux organiques dans les systèmes à évaporation directe pourrait en outre améliorer leur performance, en réduisant les besoins énergétiques tout en optimisant le confort intérieur. L'objectif de cette étude est ainsi d'évaluer et d'optimiser le potentiel du refroidissement par évaporation directe, basé sur des matériaux organiques, dans le but de proposer une solution durable et adaptée aux conditions climatiques méditerranéennes.

Le refroidissement par évaporation repose sur la vaporisation de l'eau, transformant la chaleur sensible en chaleur latente. Cette technique se distingue par son faible coût, ses économies d'énergie, l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et la réduction des émissions de  $CO_2$  liées à la production électrique [3,4]. On distingue trois principaux types de refroidisseurs par évaporation :

- Refroidisseurs évaporatifs directs : l'eau et l'air sont en contact direct.
- Refroidisseurs évaporatifs indirects : une surface ou des plaques séparent les deux fluides de travail.
- Refroidisseurs combinés : ils associent refroidisseurs évaporatifs directs, indirects, ou d'autres cycles de refroidissement.

Le système de refroidissement par évaporation directe est connu comme l'une des techniques les plus efficaces utilisées dans le domaine de la climatisation, notamment dans les tours de

refroidissement, les étangs de toiture et les humidificateurs. Outre la diminution des émissions de  $CO_2$ , il élimine l'utilisation des substances chimiques comme les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC). Son principe de fonctionnement repose sur un contact direct entre l'eau et l'air chaud dans une configuration à flux croisés, souvent appelée « tampons » ou « Pads » [5] (voir Figure 1). Lorsque l'air traverse ces tampons, sa température diminue et son humidité augmente.

Plusieurs paramètres influencent l'efficacité de ce procédé : le débit d'air, les conditions de l'air ambiant (telles que la température de bulbe sec et l'humidité relative), le débit et la température de l'eau circulant dans les tampons, ainsi que l'épaisseur et la nature du matériau utilisé. Le choix de ce matériau est crucial pour maximiser l'échange évaporatif. Il doit notamment présenter une grande capacité de rétention d'eau, résister à la corrosion, être léger et offrir un coût abordable [6].

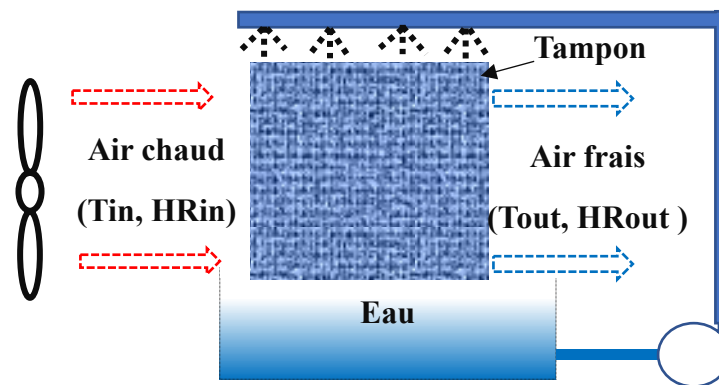


Figure 1 : Schéma de principe d'un système évaporatif direct.

Sellami et al. [7] ont développé un nouveau modèle mathématique pour analyser les performances d'un refroidisseur évaporatif poreux. Leurs résultats indiquent qu'une épaisseur plus importante et une porosité accrue de la couche céramique améliorent considérablement l'efficacité du refroidissement. De leur côté, Nada et al. [8] ont mené des expérimentations sur un nouveau tampon à structure alvéolaire en papier cellulosique (nid d'abeille). Jain et Hindoliya ont pour leur part examiné expérimentalement les performances de différents matériaux de tampons, notamment les fibres de coco, de Palash, d'aspen et de khus. Ils ont constaté que les tampons en fibres de Palash offraient une efficacité supérieure de 13,2 % et 26,31 % par rapport aux tampons en aspen et en khus, respectivement. De plus, les tampons en fibres de coco étaient 8,15 % plus efficaces que ceux en fibres de khus et présentaient une efficacité comparable à celle des tampons en aspen [9]. Quant à Manuwa et al. [10], ils se sont intéressés à des matériaux locaux comme le jute, la mousse de latex, le charbon de bois et les copeaux de bois pour en étudier la pertinence en tant que tampons de refroidissement. L'objectif est de concevoir un prototype expérimental permettant d'évaluer les performances thermiques et énergétiques de cinq refroidisseurs à évaporation directe dans un climat méditerranéen, en utilisant des matériaux organiques naturels, à savoir : les fibres d'eucalyptus, la laine de mouton, la cellulose de cactus, les fibres de palmier et les copeaux de bois.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Description des tampons de refroidissement

Les tampons de refroidissement sont fabriqués à partir de matériaux d'origine organique. Le tampon de type 1 a été préparé à partir du feuillage du palmier, comme montré sur la Figure 2(a), le tampon de type 2 est constitué de cellulose de cactus, comme montré sur la Figure 2(b), le tampon de type 3 a été préparé à partir de copeaux de bois, comme illustré sur la Figure 2(c), le tampon de type 4 est fait de laine de mouton, comme montré dans la Figure 2(d), et le tampon de type 5 est constitué de fibres d'eucalyptus, comme montré dans la Figure 2(e).

## 2.2. Configuration expérimentale

La Figure 3 montre la vue générale du banc expérimental, bien isolé par deux matériaux d'isolation : le polystyrène extrudé et le polyuréthane, afin d'assurer une performance énergétique optimale. Les principaux éléments du dispositif expérimental comprennent une pompe à eau submersible avec un débit maximal de 350 L/h et une hauteur maximale de 0,65 m, un ventilateur contrôlable (Mc23266) avec une vitesse comprise entre 0,1 et 5 m/s, un conduit d'air d'une hauteur de 33,5 cm, d'une largeur de 33,5 cm et d'une longueur de 100 cm. Une section d'essai d'une hauteur de 28 cm, d'une largeur de 32 cm et d'une épaisseur de 4 cm, un anémomètre numérique de modèle BENETE CH-GM890, et deux thermocouples de type K avec une plage de température de 0-500°C ont été utilisés pour mesurer la température de l'air avant et après le tampon. Deux capteurs d'humidité avec une précision de  $\pm 1,8\%$ , une carte d'acquisition (nanodac) avec une précision de 0,1% et un wattmètre numérique (LCD) pour mesurer la puissance consommée avec une précision de  $\pm 2\%$  ont également été utilisés. La précision pour les différents capteurs de mesure est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Les caractéristiques des capteurs expérimentaux.

Type de capteur	Modèle de capteur	Précision de capteur	Spécification gamme
Anémomètre numérique	BENETECH-GM8902	$\pm 3\%$	0,3 - 45 m / s
Capteurs d'humidité	TH 110	$\pm 1,8\%$	5 - 95%
Capteurs de Température	Thermocouples type k	//	0 - 500°C
Wattmètre	Wattmètre numérique LCD 220V	$\pm 2\%$	0W-9999W

L'analyse d'incertitude permet de déterminer l'erreur des résultats expérimentaux. L'incertitude peut être exprimée par :

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (1)$$

Selon l'analyse d'incertitude réalisée, l'incertitude globale de la baisse de température, de la différence d'humidité relative et de l'efficacité de saturation est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Les résultats de l'analyse d'incertitude.

Paramètres	$\delta \Delta T$	$\delta Q_c$	$\delta \epsilon$
Incrtitude [%]	4.56	5.5	4.85



(a) *Fibre de palmier*



(b) *Cellulose de cactus*



(c) *Les copeaux de bois*



(d) *Laine de mouton*



(e) *Fibre d'eucalyptus*

Figure 2 : *Types de matériaux pour les tampons de refroidissement*

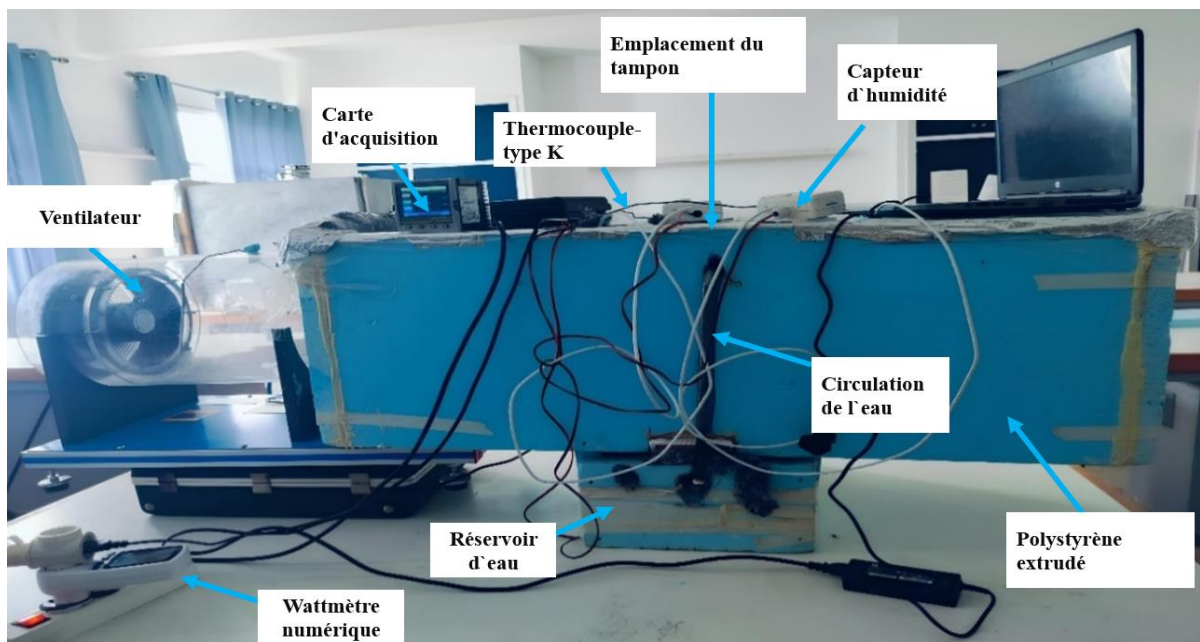


Figure 3 : *Vue générale du banc d'essai expérimental.*

### 2.3. Analyse thermodynamique du processus de refroidissement par évaporation

L'efficacité de saturation des coussins de refroidissement est évaluée à l'aide de l'équation (2), qui prend en compte les températures et est exprimée par [11] :

$$\varepsilon = \frac{T_{d1} - T_{d2}}{T_{d1} - T_{w1}} \quad (2)$$

Le débit massique d'air traversant le tampon de refroidissement est calculé à l'aide de l'équation (3) et est donné par :

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad (3)$$

Lorsqu'on évalue les performances, l'un des facteurs cruciaux à considérer est la capacité de refroidissement, qui est exprimée par [12] :

$$Q_c = \dot{m} \times C_p \times (T_{d1} - T_{d2}) \quad (4)$$

Le coefficient de performance (EER) est défini comme le rapport entre la capacité de refroidissement sensible ( $Q_c$ ) et la consommation électrique du ventilateur ( $W_{ven}$ ) et de la pompe ( $W_p$ ). Ce coefficient est exprimé de la manière suivante :

$$EER = \frac{Q_c}{W_{ven} + W_p} \quad (5)$$

### 3. Résultats et discussion

La Figure 4 montre une augmentation de la chute de température en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les cinq matériaux, suggérant une meilleure interaction entre l'air et le matériau ainsi qu'un accroissement de l'évaporation. Toutefois, au-delà d'un certain point, cette tendance pourrait se stabiliser ou diminuer à cause de la saturation des matériaux ou d'effets hydrodynamiques diminuant l'efficacité du transfert de chaleur. Parmi les matériaux testés, la fibre d'eucalyptus affiche la meilleure performance avec une chute maximale de température dépassant 9 °C, suivie de la cellulose de cactus avec une chute d'environ 5 °C. Parallèlement, la laine de mouton offre la performance la plus faible, avec une chute maximale de seulement 2 °C, en raison de sa structure moins poreuse.

La fibre d'eucalyptus se distingue par une dissipation thermique maximale, atteignant environ 2,5 kW à une vitesse de 5 m/s, suivie de près par la cellulose de cactus. En comparaison, la laine de mouton et les copeaux de bois présentent des performances nettement inférieures, avec environ 0,56 kW et 0,50 kW dissipés respectivement à la même vitesse. Ces différences de performance s'expliquent par des propriétés telles que la porosité et la surface spécifique, qui influencent directement l'efficacité de l'évaporation et l'absorption de l'air. Cependant, au-delà d'une certaine vitesse de l'écoulement, les gains en refroidissement deviennent marginaux, reflétant une limite inhérente au processus d'évaporation (Figure 5). La capacité de refroidissement a une influence directe sur le coefficient de performance (EER). Par exemple, la fibre d'eucalyptus affiche un EER remarquable, avoisinant 40. La cellulose de cactus et la fibre de palmier présentent également de bonnes performances, avec un EER dépassant 20 à une certaine vitesse (Figure 7).

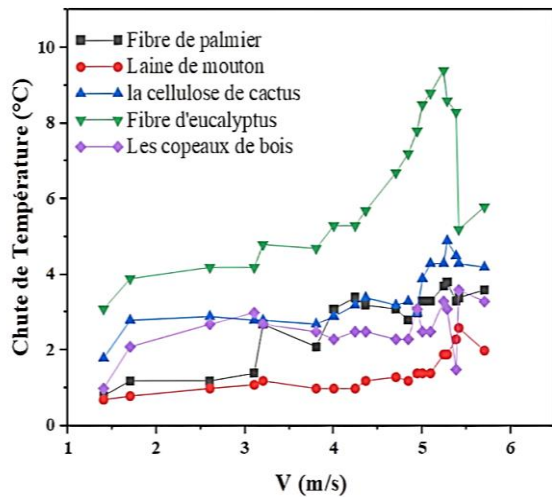


Figure 4 : Baisse de température à travers  
Le tampon.

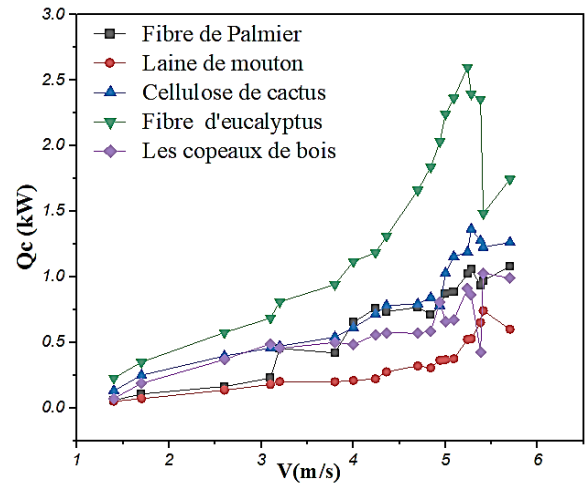


Figure 5 : La capacité de refroidissement.

La Figure 6 illustre l'efficacité de saturation moyenne, exprimée en pourcentage, pour les cinq matériaux testés. L'efficacité de saturation ( $\epsilon$ ) (Equation 2) est définie comme la différence entre les températures de bulbe sec à l'entrée et à la sortie (soit l'amplitude), divisée par la dépression de bulbe humide [13]. Elle mesure la capacité du matériau à humidifier l'air tout en maximisant le transfert thermique, ce qui permet de refroidir l'air par un processus d'évaporation. Exprimée sous forme de pourcentage, cette efficacité indique à quel point l'air est saturé en humidité par rapport à sa capacité théorique maximale, avec un coefficient proche de 100 % représentant une efficacité optimale.

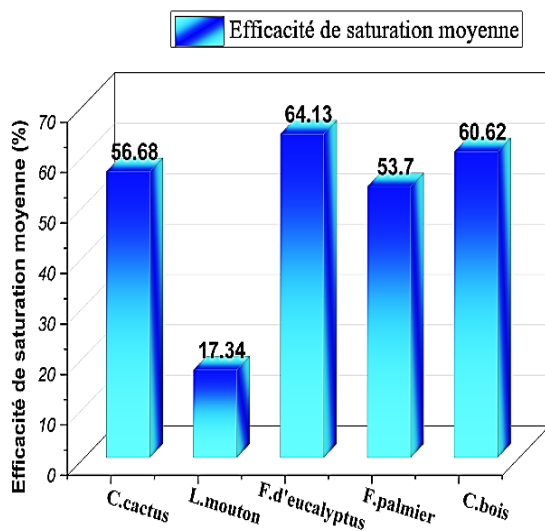


Figure 6 : L'efficacité de saturation moyenne.

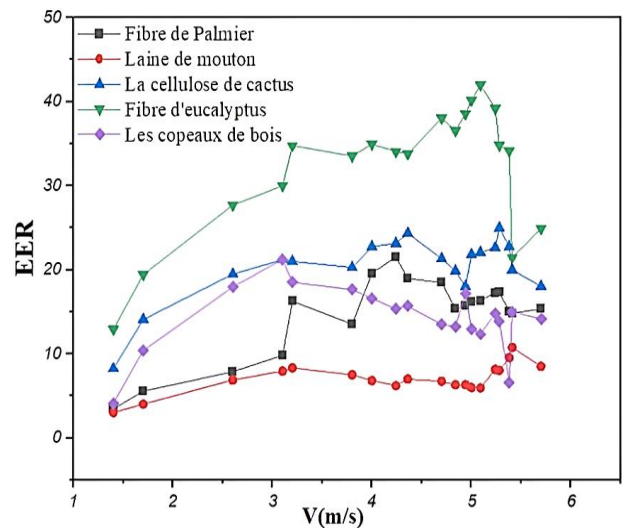


Figure 7 : Le coefficient de performance.

#### 4. Conclusion

Le refroidissement par évaporation directe est une méthode économique qui repose sur le principe de l'évaporation de l'eau pour refroidir l'air chaud. Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence des performances énergétiques significatives, notamment en termes de chute de température, d'efficacité de saturation moyenne et de coefficient de performance



énergétique (EER) pour les cinq matériaux testés dans des climats méditerranéens. Parmi ces matériaux, la fibre d'eucalyptus s'est démarquée par sa performance énergétique supérieure, avec une efficacité de saturation moyenne de 64,13 %. Elle est suivie par les copeaux de bois (60,62 %), la cellulose de cactus (56,68 %) et la fibre de palmier (53,70 %). En revanche, la laine de mouton présente la performance la plus faible, avec une efficacité de saturation moyenne de 17,34 %.

## Références

- [1] I. Staffell, S. Pfenninger, N. Johnson, A global model of hourly space heating and cooling demand at multiple spatial scales, *Nat. Energy*, 8-12 (2023), 1328-1344.
- [2] Duan, Z., C. Zhan, X. Zhang, M. Mustafa, X. Zhao, B. Alimohammadisagvand, and A. Hasan, Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16-9 (2012), 6823-6850.
- [3] O. Amer, R. Boukhanouf, and H. G. Ibrahim, A review of evaporative cooling technologies, *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, 6-2 (2015), 111.
- [4] R. Hashim, S. Hammdi, and A. Eidan, Evaporative cooling: a review of its types and modeling, *Basrah J. Eng. Sci.*, 22-1 (2022), 36-47.
- [5] R. A. Aziz, N. F. Zamrud, and N. Rosli, Comparison on cooling efficiency of cooling pad materials for evaporative cooling system, *J. Mod. Manuf. Syst. Technol.*, 1 (2018), 61-68.
- [6] P. A. Doğramacı and D. Aydın, Comparative experimental investigation of novel organic materials for direct evaporative cooling applications in hot-dry climate, *J. Build. Eng.*, 30 (2020), 101240.
- [7] K. Sellami, M. Feddaoui, N. Labsi, M. Najim, M. Oubella, and Y. K. Benkahla, Direct evaporative cooling performance of ambient air using a ceramic wet porous layer, *Chem. Eng. Res. Des.*, 142 (2019), 225-236.
- [8] S. A. Nada, H. F. Elattar, M. A. Mahmoud, and A. Fouda, Performance enhancement and heat and mass transfer characteristics of direct evaporative building free cooling using corrugated cellulose papers, *Energy*, 211 (2020), 118678.
- [9] J. K. Jain and D. A. Hindoliya, Experimental performance of new evaporative cooling pad materials, *Sustain. Cities Soc.*, 1-4 (2011), 252-256.
- [10] S. I. Manuwa and S. O. Odey, Evaluation of pads and geometrical shapes for constructing evaporative cooling system, *Mod. Appl. Sci.*, 6-6 (2012), 45.
- [11] S. Englart, Experimental study of air evaporative cooling process using microporous membranes, *E3S Web Conf.*, 22 (2017).
- [12] S. Abaranji, K. Panchapakesan, and V. Ramalingam, Experimental study on the direct evaporative air-cooling system with vermicompost material as the water storage medium, *Sustain. Cities Soc.*, 71 (2021), 102991.
- [13] A. Bhatia, B.E, Instructor, PDH online Course M231 (4 PDH), "Principles of Evaporative Cooling System, 2012" pp. 1-56.