

# Studi Eksperimental Karakteristik Permeabilitas Pada Arang Dan Karbon Aktif Bambu Betung

Rere Septire Elifere, I Ketut Gede Wirawan, Hendra Wijaksana  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Guna memperoleh tingkat udara yang nyaman di negara tropis seperti Indonesia, digunakan sistem pendingin udara berbasis kompresor (AC) yang membutuhkan listrik dalam jumlah besar dan akan memperparah pemanasan global. Oleh karena itu, upaya yang dilakukan adalah dengan menggunakan sistem pendingin yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Sistem pendingin alternatif itu adalah sistem *direct evaporative cooling*. Dalam sistem *direct evaporative cooling*, efek pendinginan dihasilkan dari proses penguapan yang terjadi pada material pad yang telah dibasahi air. Bahan material pad sendiri digunakan sebagai aplikasi sistem pendingin evaporasi sebagai media pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung. Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Digunakan temperatur karbonisasi 500°C (KB 1), 600°C (KB 2), aktivasi karbon tanpa holding time 500°C (KBA 1), aktivasi karbon tanpa holding time 600°C (KBA 2), aktivasi karbon dengan holding time 60 menit 500°C (KBA 3), dan aktivasi karbon dengan holding time 60 menit 600°C (KBA 4). Hasil dari seluruh pengujian menunjukkan bahwa spesimen KB 2 (600°C) memiliki potensi yang sangat besar untuk dijadikan material pad baru pada sistem *direct evaporative cooling* karena memiliki hasil permeabilitas yang paling tinggi. Dengan karakteristik sebagai berikut: spesimen KB 2 memiliki diameter pori 8.52  $\mu\text{m}$ , memiliki nilai porositas 17.81 % dan memiliki nilai permeabilitas sebesar  $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ .

**Kata kunci:** *Direct evaporative cooling*, bambu betung, karbonisasi, aktivasi karbon, struktur pori, diameter pori, porositas, dan permeabilitas.

## Abstract

In order to obtain a comfortable level of air in a tropical country like Indonesia, compressor-based air conditioning (AC) systems are used, which require large amounts of electricity and will exacerbate global warming. Therefore, efforts are being made to use a cooling system that is more energy efficient and environmentally friendly. The alternative cooling system is a *direct evaporative cooling* system. In the *direct evaporative cooling* system, the cooling effect is generated from the evaporation process that occurs in the pad material that has been moistened with water. The pad material itself is used as an application for the evaporative cooling system as a cooling medium. This study aims to analyze permeability characteristics of charcoal and active carbon of bamboo betung. As a raw material, bamboo can produce porous charcoal with a high specific surface area and high porosity. Carbonization temperatures of 500°C (KB 1), 600°C (KB 2) are used, activated carbon without holding time 500°C (KBA 1), activated carbon without holding time 600°C (KBA 2), activated carbon with holding time 60 minutes 500°C (KBA 3), and activated carbon with holding time 60 minutes 600°C (KBA 4). The results of all tests indicate that the KB 2 (600°C) specimen has a very large potential to be used as a new pad material in the *direct evaporative cooling* system because it has the highest permeability results. With the following characteristics: the KB 2 specimen has a pore diameter of 8.52  $\mu\text{m}$ , has a porosity value of 17.81 % and has a permeability value of  $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ .

**Keywords:** *Direct evaporative cooling*, bamboo betung, carbonization, carbon activation, pore structure, pore diameter, porosity, and permeability.

## 1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk yang sangat pesat di hampir seluruh negara, mengakibatkan peningkatan kebutuhan akan perumahan dan perkantoran yang cukup pesat pula. Di negara tropis seperti Indonesia, pertumbuhan gedung-gedung untuk apartemen dan gedung perkantoran mengakibatkan kebutuhan energi listrik meningkat untuk sistem pendingin *air conditioning* (AC) yang berbasis kompresor. Sistem pendingin kompresi uap ini memerlukan input energi listrik untuk pengoperasiannya, dan hampir 60% energi listrik pada bangunan-bangunan besar diperuntukkan bagi pengoperasian sistem AC tersebut, selain permintaan kebutuhan energi listrik yang tinggi, penggunaan refrigerant pada sistem AC dapat membahayakan

kelestarian lingkungan, dimana refrigerant dalam jumlah besar yang dilepas ke udara sekitar, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang tidak baik berupa pemanasan global.

Upaya yang dilakukan untuk mengurangi dampak yang diakibatkan oleh penggunaan sistem AC dalam hal kebutuhan energi listrik yang tinggi dan dari dampak lingkungan yang akan terjadi, maka diperlukan suatu sistem pendingin yang hemat energi dan ramah lingkungan yaitu sistem pendingin *direct evaporative cooling*. Sistem pendingin evaporatif merupakan sistem pendingin alternatif yang dapat digunakan untuk mengurangi dampak penggunaan sistem AC, karena sistem pendingin evaporatif hanya memerlukan udara dan air sebagai penggerak utama sistem pendinginannya, dengan hanya sedikit

kebutuhan energi listrik untuk menggerakkan *mechanical fan* dan pompa air.

Dalam sistem *direct evaporative cooling* dibutuhkan material pad yang berpori (*porous pad material*) yang memiliki daya serap dan daya tampung air yang cukup tinggi untuk menjamin terjadinya proses evaporasi pada permukaan material pad. Dengan daya serap dan daya tampung air yang tinggi dari material cooling pad, akan menghasilkan area cooling pad yang terbasahi air (*wetted area*) yang makin luas, sehingga akan meningkatkan jumlah panas sensibel udara suplai yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut, dan temperatur udara produk menjadi semakin rendah (lebih dingin). Secara umum material penukar panas dan massa yang baik untuk sistem pendinginan *evaporative* adalah material yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan gaya kapiler yang besar [1].

Dalam usaha menjamin ketersediaan air pada material pad maka diperlukan karakteristik permeabilitas yang tinggi, sehingga kebutuhan air untuk proses evaporasi dapat terpenuhi. Hubungan antara gaya pemompaan kapiler dan permeabilitas bertolak belakang. Semakin besar gaya pemompaan kapiler, semakin kecil permeabilitasnya [2]. Peningkatan karakteristik permeabilitas pada material pad sistem *direct evaporative cooling* tersebut dapat dilakukan dengan peningkatan struktur pori material pad melalui proses karbonisasi. Proses karbonisasi akan merubah material menjadi *carbonized material* berupa arang (*charcoal*) yang diikuti dengan perubahan struktur pori termasuk didalamnya ukuran pori, porositas, luas permukaan pori dan juga volume pori. Ukuran pori yang dihasilkan akan tergantung dari temperatur karbonisasi dan aktivasi karbon yang diberikan, semakin tinggi temperatur karbonisasi, semakin besar ukuran pori yang dihasilkan [3]. Proses karbonisasi akan menjadikan material memiliki struktur pori mikro dengan ukuran pori yang secara umum masih lebih besar dari ukuran pori nano.

Bahan baku utama pembuatan penyerap pori berbasis karbon antara lain kayu dan bambu. Bambu memiliki kepadatan serat yang tinggi dan tekstur yang keras. Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Bambu tumbuh dengan cepat dan bisa dipanen setiap empat tahun. Mengganti kayu dengan bambu untuk pembuatan arang berpori dapat mengurangi emisi karbondioksida [4].

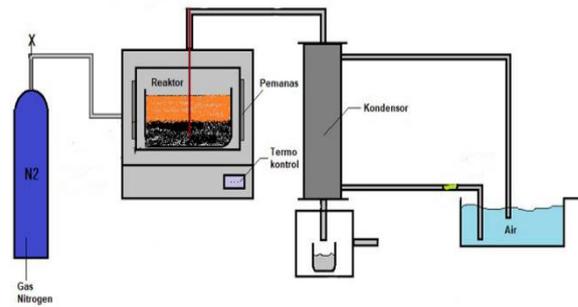
Berdasarkan dari pemaparan tersebut diatas, dimana diketahui belum terlalu banyak penelitian yang mengkaji karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung untuk sistem *direct evaporative cooling*, maka penulis akan melakukan penelitian tentang karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung sebagai material pad baru sistem *direct evaporative cooling*. Dalam penelitian ini sebagai material dasar yang dipakai adalah bambu betung yang akan

dikarbonisasi pada temperatur karbonisasi karbonisasi 500 °C dan 600 °C.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Proses Karbonisasi

Karbonisasi adalah proses pirolisis material organik dalam kondisi bebas oksigen (*inert atmosphere*) yang menghasilkan residu solid yang memiliki kandungan elemen karbon yang tinggi. Karbonisasi merupakan reaksi pirolitik yang kompleks yang melibatkan banyak reaksi seperti *dehydrogenation*, *condensation*, *hydrogentransfer* dan *isomerization*. Tujuan dari proses karbonisasi adalah memperkaya kandungan karbon dan menghasilkan pori awal material. Pemilihan proses karbonisasi dalam penelitian ini didasarkan pada hasil penelitian [3], proses karbonisasi dilakukan di dalam reaktor yang sebelumnya dialiri N<sub>2</sub> lalu dilakukan proses karbonisasi pada temperatur (500-900° C) dengan memiliki hasil struktur pori yang berbeda dengan bambu karbonisasi suhu yang lebih tinggi.



Gambar 1. Peralatan proses karbonisasi

Permeabilitas merupakan makroskopik ukuran kemudahan mengalirnya cairan melalui rongga *porous material* atau media berpori. Permeabilitas didefinisikan sebagai kemampuan cairan mengalir melalui lubang *porous material* [5].

Besarnya permeabilitas yang terjadi pada *porous material* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut :

$$\frac{p^2 \cdot \varepsilon^2}{1 - \varepsilon)^2} \quad (1)$$

dimana K adalah permeabilitas material ( $\mu\text{m}^2$ ), dp adalah diameter pori ( $\mu\text{m}$ ), C adalah faktor geometrik bambu yang diasumsikan sama dengan material kayu karbonisasi yaitu 122 [6] dan  $\varepsilon$  adalah porositas. Porositas dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$1s(\varepsilon) = \frac{V_{pw}}{V_w} \quad (2)$$

$$pw = M_a \times V_s \quad (3)$$

dimana  $V_{pw}$  adalah volume pori yang terbentuk pada material ( $cm^3$ ),  $V_w$  adalah volume total material ( $cm^3$ ),  $M_a$  adalah massa air yang terserap (gr), dan  $V_s$  adalah volume spesifik air saat jenuh ( $cm^3/gr$ ).

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1 Pembuatan Arang dan Karbon Aktif Bambu Betung

1. Bambu betung dikeringkan terlebih dahulu dibawah paparan sinar matahari selama 10 hari, kemudian dipotong-potong dengan ukuran  $P \times L \times T = 2,5cm \times 1,7cm \times 3,1cm$ , sebanyak 3 sampel dan selanjutnya dikeringkan kembali pada dapur listrik pada suhu  $120^\circ C$  selama 6 jam.
2. Proses karbonisasi  $500^\circ C$  dan  $600^\circ C$  : (a) 3 sampel uji pertama dimasukkan ke dalam reaktor karbonisasi untuk proses karbonisasi  $500^\circ C$ ; (b) reaktor karbonisasi dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 L/min selama 15 menit untuk mendapatkan kondisi bebas oksigen (inert atmosfir), kemudian temperatur reaktor karbonisasi ditingkatkan dengan laju pemanasan  $500^\circ C/jam$  dan diatur hingga mencapai  $500^\circ C$  tanpa *holding time*. (c) Sampel didinginkan dalam *furnace* selama 12 jam dan akan dihasilkan sampel arang bambu betung KB 1, KBA 1, dan KBA 3.
3. Proses karbonisasi selanjutnya dilakukan dengan pengulangan langkah 2a –2c dengan peningkatan temperatur karbonisasi  $600^\circ C$ , dan akan dihasilkan sampel arang bambu betung KB 2, KBA 2, dan KBA 4.
4. Proses aktivasi spesimen tanpa *Holding Time*: (a) Sampel KBA 1 dan KBA 2 di *inject* gas nitrogen dan dimasukkan kedalam reaktor. (b) Reaktor dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 Liter/menit selama 12 detik dan di *setting* suhunya  $600^\circ C$  dengan laju pemanasan  $500^\circ C/jam$ . (c) Ketika suhu sudah mencapai  $600^\circ C$ , reaktor dimatikan lalu spesimen dikeluarkan.
5. Proses aktivasi spesimen dengan *holding time* 60 menit: (a) Sampel KBA 3 dan KBA 4 di *inject* gas nitrogen dan dimasukkan kedalam reaktor. (b) Reaktor dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 Liter/menit selama 12 detik dan di *setting* suhunya  $600^\circ C$  dengan laju pemanasan  $500^\circ C/jam$ . (c) Ketika suhu sudah mencapai  $600^\circ C$ , spesimen tetap dipanaskan didalam reaktor dengan suhu  $600^\circ C$  selama 60 menit. (d) Setelah 60 menit, spesimen dikeluarkan dari reaktor.
6. Selanjutnya dilakukan uji SEM pada spesimen KB 1, KB 2, KBA 1 KBA 2, KBA 3, dan KBA 4.

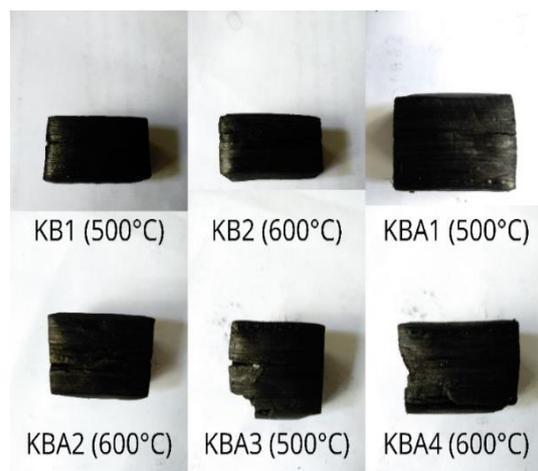
### 3.2 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

1. Membuat spesimen dengan ukuran  $2mm \times 2mm$  dari arang bambu yang dihasilkan melalui pengujian karbonisasi.
2. Meletakkan 6 spesimen (KB 1, KB 2, KBA 1 KBA 2, KBA 3, dan KBA 4) tersebut ke dalam alat *Scanning Electron Microscope* (SEM).
3. Melakukan analisis struktur pori pada masing-masing spesimen.

### 4. Hasil dan Pembahasan

#### 4.1. Proses Pengujian Karbonisasi

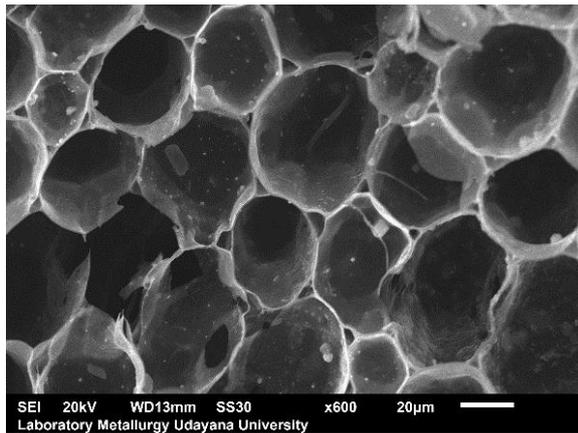
Dari pengujian karbonisasi maka dihasilkan arang dan karbon aktif bambu betung. Dalam penelitian ini, diharapkan struktur pori yang dihasilkan dari spesimen arang dan karbon aktif bambu betung yang telah dikarbonisasi memiliki diameter pori yang relatif besar, agar spesimen bambu betung yang telah dikarbonisasi mempunyai nilai porositas yang tinggi dan nilai permeabilitas yang tinggi. Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian karbonisasi berupa arang bambu betung.



**Gambar 2.** Spesimen Hasil Karbonisasi dan Aktivasi.

#### 4.2 Karakteristik Permeabilitas

Berdasarkan rumus diatas dibutuhkan data diameter pori dan porositas untuk mendapatkan hasil permeabilitas. Dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan analisis menggunakan aplikasi ImageJ dan didapatkan diameter pori spesimen arang bambu. Gambar 3 Menunjukkan gambar hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada spesimen arang bambu betung.



**Gambar 3.** Struktur Pori Pada Spesimen KB 2 (600 °C).

Dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan analisis menggunakan aplikasi ImageJ didapatkan data yang terdapat dalam Tabel Gambar 1 Sebagai berikut:

**Tabel 1.** Hasil Pengolahan Data Struktur Pori Pada Bambu Betung.

Nama Spesimen	Jari-Jari Pori (µm)	Diameter Pori (µm)
<b>Karbonisasi</b>		
KB 1 (500°C)	3.520227197	7.040454393
KB 2 (600°C)	4.262234668	8.524469335
<b>Aktivasi Tanpa HT</b>		
KBA 1 (500°C)	3.172657572	6.345315144
KBA 2 (600°C)	2.581197669	5.162395338
<b>Aktivasi HT 60 menit</b>		
KBA 3 (500°C)	3.615470371	7.230940742
KBA 4 (600°C)	2.681850643	5.363701286

Setelah didapatkan diameter pori maka selanjutnya dicari nilai porositas spesimen arang bambu betung. Porositas adalah perbandingan antara volume pori dan volume total yang terbentuk pada material bambu betung yang telah dikarbonisasi. Didapatkan volume pori dengan cara massa air tertahan didalam spesimen dikalikan dengan volume jenis spesifik air jenuh dan volume total material dengan cara menghitung dimensi dari spesimen arang bambu betung. Tabel 2 menunjukkan hasil porositas bambu betung dari pengolahan data yang telah dilakukan.

**Tabel 2.** Hasil Pengolahan Data Porositas Pada Bambu Betung

Nama Spesimen	Massa Awal (gr)	Massa Akhir (gr)	Massa Air Yang Tertahan (gr)	Volume Pori Spesifik (cm <sup>3</sup> )	Volume Total Material (cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)
<b>Karbonisasi</b>						
KB 1 (500°C)	3.14	6.5	3.36	3.37	19.46	17.34
KB 2 (600°C)	3.06	6.06	3.01	3.01	16.92	17.81
<b>Aktivasi Tanpa HT</b>						
KBA 1 (500°C)	2.1	5.45	3.35	3.36	15.59	21.57
KBA 2 (600°C)	2.38	5.84	3.46	3.47	14.26	24.4
<b>Aktivasi HT 60 menit</b>						
KBA 3 (500°C)	2.46	5.29	2.83	2.84	14.86	19.12
KBA 4 (600°C)	1.5	3.14	1.64	1.64	10.12	16.24

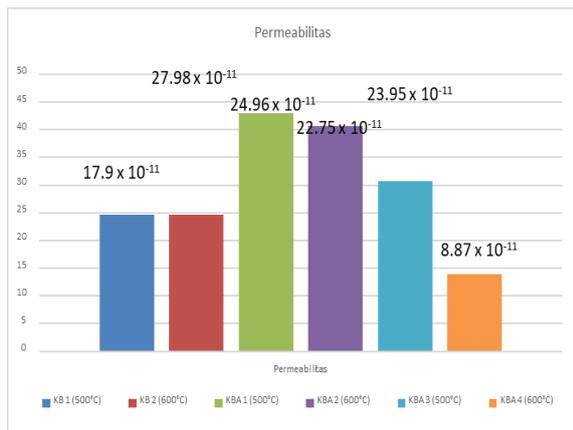
Dari hasil porositas dan diameter pori dapat dicari nilai permeabilitas dari arang bambu betung. Dengan menggunakan rumus diatas maka didapatkan hasil nilai permeabilitas. Tabel 3 menunjukkan hasil permeabilitas bambu betung dari pengolahan data yang telah dilakukan. Berdasarkan tabel tersebut, spesimen KBA 4 (600°C) memiliki nilai permeabilitas terendah, yaitu  $8.87 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$  dan spesimen KB 2 (600°C) memiliki nilai permeabilitas tertinggi, yaitu  $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ . Spesimen yang memiliki diameter pori dan porositas yang besar akan menghasilkan permeabilitas yang besar.

**Tabel 3.** Hasil Pengolahan Data Permeabilitas Pada Bambu Betung.

Nama Spesimen	Porositas	Faktor Geometrik Bambu	Diameter Pori (µm)	Permeabilitas (cm <sup>2</sup> )
<b>Karbonisasi</b>				
KB 1 (500°C)	0.1734	122	7.04	$17.9 \times 10^{-11}$
KB 2 (600°C)	0.1781	122	8.52	$27.98 \times 10^{-11}$
<b>Aktivasi Tanpa HT</b>				
KBA 1 (500°C)	0.2157	122	6.34	$24.96 \times 10^{-11}$
KBA 2 (600°C)	0.2440	122	5.16	$22.75 \times 10^{-11}$
<b>Aktivasi HT 60 menit</b>				
KBA 3 (500°C)	0.1912	122	7.23	$23.95 \times 10^{-11}$
KBA 4 (600°C)	0.1624	122	5.36	$8.87 \times 10^{-11}$

Gambar 4 menunjukkan hasil perhitungan permeabilitas berupa grafik antara nilai permeabilitas dengan temperatur karbonisasi pada spesimen KB 1, KB 2, KBA 1, KBA 2, KBA 3, dan KBA 4. Berdasarkan grafik tersebut, ditunjukkan bahwa spesimen arang bambu betung KB 2 (600°C) memiliki nilai permeabilitas tertinggi yaitu  $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$  dan spesimen KBA 4 (600°C) memiliki

nilai permeabilitas yang paling rendah yaitu sebesar  $8.87 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ .



**Gambar 4.** Grafik Hasil Data Permeabilitas Pada Bambu Betung.

## 5. Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan, karakteristik permeabilitas arang dan karbon aktif bambu betung, dapat disimpulkan bahwa :

Spesimen arang bambu betung temperatur karbonisasi 600°C (KB 2) memiliki nilai permeabilitas yang paling besar yaitu  $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$  jika dibandingkan dengan spesimen dengan temperatur karbonisasi yang lain. Berdasarkan hasil pengambilan data diatas, maka dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan temperatur karbonisasi 600 °C (KB 2) memiliki potensi yang besar untuk dijadikan material *pad* baru pada sistem *direct evaporative cooling* karena memiliki karakteristik nilai permeabilitas yang paling besar diantara spesimen arang bambu yang diujikan. Spesimen KB 2 dan KBA 1 memiliki nilai permeabilitas yang besar dikarenakan suhu karbonisasi yang tinggi dan proses aktivasi yang dilakukan pada material setelah proses karbonisasi akan memperbesar pori awal yang telah terbentuk pada saat proses karbonisasi dan juga menghasilkan pori-pori kecil yang baru. Sedangkan spesimen KBA 4 dengan aktivasi menggunakan *holding time* 60 menit menghasilkan nilai permeabilitas yang rendah, dikarenakan kemungkinan ada sejumlah pori yang terbakar (*burn off*) sehingga mengurangi porositas dan hasil permeabilitas pada material arang bambu betung.

## Daftar Pustaka

[1] Zhao, X., Liu, S., & Riffat, S. B., 2008, *Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems*, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 11, pp. 1902-1911.

- [2] Li, Jinwang & Lu, Ningxiang & Cong, Tianshu, 2019, *Experimental study on evaporation-capillary pumping flow in capillary wick and working fluid system*, *Thermal Science*, Vol. 25, No. 413-413, pp. 10.2298/TSCI180918413L.
- [3] Isa, S. S. M., Ramli, M. M., Hambali, N. A. M. A., Kasjoo, S. R., Isa, M. M., Nor, N. I. M., ... & Ahmad, N., 2016, *Adsorption properties and potential applications of bamboo charcoal: a review*, In *MATEC Web of Conferences*, Vol. 78, p. 01097, EDP Sciences.
- [4] Huang, Pei-Hsing., Jhan, Jhih-Wei., Cheng, Yi-Ming., Cheng, Hau-Hsein, 2014, *Effect of Carbonization Parameters of Moso-Bamboo Based Porous Charcoal on Capturing Carbon Dioxide*, *Scientific World Journal*.
- [5] Berti, L. F., Santos, P. H. D., Bazzo, E., Janssen, R., Hotza, D., & Rambo, C. R., 2011, *Evaluation of permeability of ceramic wick structures for two phase heat transfer devices*, *Applied thermal engineering*, Vol. 31, No. 6-7, pp. 1076-1081.
- [6] Solomon, A. B., Mahto, A. K., Joy, R. C., Rajan, A. A., Jayprakash, D. A., Dixit, A., & Sahay, A., 2020, *Application of bio-wick in compact loop heat pipe* *Applied Thermal Engineering*, Vol. 169, No. 114927.

