

Studi Eksperimental Karakteristik Perubahan Energi Potensial Pada Material Karbon Aktif Bambu Betung Sebagai Material Pad Alternatif

Fikry Sapisandi, Hendra Wijaksana, Teddy Prananda Surya
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan listrik untuk sistim pendinginan, dikembangkan sistim pendingin direct evaporative yang lebih hemat energi, ramah lingkungan dan menghasilkan pendinginan yang cukup signifikan. Komponen utama sistim pendingin direct evaporative adalah material cooling pad. Dalam penelitian ini dikembangkan material cooling pad berbahan dasar bambu betung, yang kemudian dikarbonisasi pada variasi temperatur karbonisasi 400°C, 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C, selanjutnya material karbon tersebut diaktivasi pada temperatur 600°C dan menghasilkan material karbon aktif bambu betung. Langkah berikutnya dilakukan pengujian untuk mendapatkan karakteristik perubahan energi potensial pada material karbon aktif bambu betung tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 800°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C menghasilkan energi potensial pori yang tertinggi yakni sebesar 8.35×10^{-8} J, dengan ketinggian kenaikan kapiler tertinggi mencapai 0.748 m. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran jari pori material, semakin tinggi kenaikan kapilernya dan demikian pula energi potensial yang dihasilkan semakin besar. Untuk aplikasi sistim pendinginan direct evaporative, direkomendasikan untuk menggunakan material yang memiliki energi potensial pori yang lebih besar.

Kata kunci : Perubahan energi potensial, material karbon aktif bambu betung, material pad alternatif

Abstract

In an effort to increase the efficiency of electricity use for the cooling system, a direct evaporative cooling system was developed which is more energy efficient, environmentally friendly and produces significant cooling. The main component of a direct evaporative cooling system is the cooling pad material. In this research, a cooling pad material made from betung bamboo was developed, which was carbonized at various carbonization temperatures of 400°C, 500°C, 600°C, 700°C and 800°C, then activated at a temperature of 600°C and produced active carbon material from betung bamboo. The next test was carried out to obtain the characteristics of potential energy changes in the active carbon material of betung bamboo. The test results showed that the betung bamboo material which was carbonized at a temperature of 800°C and activated at a temperature of 600°C produced the highest pore potential energy, namely 8.35×10^{-8} J, with the highest capillary rise height reaching 0.748 m. As a result, it can be concluded that the smaller the pore size of the material, the higher the capillary rise and thus the greater the potential energy produced. For direct evaporative cooling system applications, it is recommended to use materials that have greater pore potential energy.

Keyword: Potential energy changes, betung bamboo activated carbon material, alternative pad material

1. Pendahuluan

Direct evaporative cooling merupakan salah satu sistim pendingin alternatif non-kompresi uap yang lebih hemat energi, ramah lingkungan dan menghasilkan pendinginan yang cukup signifikan. Komponen utama sistim direct evaporative cooling ini adalah material cooling pad. Penelitian-penelitian terbaru mengenai material pad telah banyak dilakukan untuk mengembangkan material pad yang lebih murah, efisien dan berbasis bahan dasar lokal. Berbagai jenis material pad yang banyak diteliti diantaranya coconut coir [1], aspen and cellulose material [2], porous ceramics material [3], local fibers [4], cellulosic evaporative cooling pads [5]. Namun demikian belum banyak dilakukan penelitian mengenai penggunaan bambu, khususnya material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif bagi sistem pendinginan direct evaporative. Penelitian mengenai bambu untuk berbagai macam

kegunaan telah banyak dilakukan. Putra Negara et.al telah melakukan penelitian kapasitas adsorpsi nitrogen dari karbon aktif bambu tabah [6]. Peng Liao et.al.,(2012) menguji kemampuan adsorpsi arang bambu (bamboo charcoal) terhadap methylene blue [7]. Qiang Ren et.al.,(2019) meneliti penggunaan arang bambu untuk pembuatan material penyerap kelembaban berbasis semen[8]. Penelitian awal mengenai karakteristik material karbon aktif bambu betung telah dilakukan diantaranya oleh Wahyu Wiwekanyana (2022) menguji secara eksperimental karakteristik kerja kapiler material karbon aktif bambu betung tanpa holding time[9]. Kemudian Ogie Indra Putra (2023) meneliti karakteristik energi kinetik (hambatan kekentalan fluida) material karbon aktif bambu betung tanpa holding time[10]. Sedangkan Ngurah Surya Nata (2022) menguji karakteristik capillary rise material karbon aktif bambu betung dengan holding time 30menit[11]

Pembuatan material karbon aktif bambu betung ini dilakukan melalui proses karbonisasi dengan variasi temperatur karbonisasi, yang selanjutnya dilakukan proses aktivasi hingga dihasilkan material karbon aktif bambu betung yang berpori karbon (porous carbonaceous material) dan memiliki karakteristik kapilaritas yang tinggi, sehingga mampu menarik fluida secara kapiler, masuk kedalam pori material dan membasahi permukaan material untuk proses pendinginan evaporative.

Dalam hal ini, sehubungan dengan karakteristik kapilaritas material karbon aktif bambu betung, akan dilakukan pengkajian mengenai karakteristik perubahan energi potensial, ketinggian kapiler dan struktur pori material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif sistem pendinginan evaporative.

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Bahan material yang digunakan adalah bambu betung (*dendrocalamus asper*) lokal Bali yang berumur 4-5 tahun.
2. Pengujian hanya meliputi proses karbonisasi, proses aktivasi karbon dan uji scanning electron microscope (SEM)
3. Ukuran material uji dianggap uniform yakni panjang x lebar/tebal x tinggi=25mm x 17mm x 30mm
4. Pori material yang dihasilkan dianggap seragam berbentuk silinder
5. Fluida yang digunakan adalah air.

2. Dasar Teori

Kesetimbangan energi untuk capillary rise (kenaikan ketinggian permukaan fluida) terdiri dari 3 besaran energi yakni kerja yang dilakukan untuk mengangkat air dalam pori material (W), energi kinetik yang berhubungan dengan pengaruh viskositas dalam aliran fluida (K) dan energi potensial yang berhubungan dengan energi yang tersimpan dalam kolom fluida. Kesetimbangan energi dalam kolom fluida material berpori dapat dirumuskan dalam persamaan: [12]

$$W - K = -\Delta U \quad (1)$$

Ketinggian kenaikan permukaan fluida dalam pori material, h dapat ditentukan bila telah terjadi kesetimbangan gaya vertikal yakni antara gaya keatas dan gaya kebawah pada pori material, dimana gaya keatas dalam hal ini adalah gaya kapiler dan gaya kebawah adalah gaya berat air, yang dapat dirumuskan sebagai persamaan kesetimbangan gaya vertikal: [13]

$$2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos \gamma = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho_w \cdot g \quad (2)$$

gaya keatas gaya kebawah

Sehingga besarnya kenaikan ketinggian permukaan fluida, h dapat dirumuskan sebagai:

$$h = \frac{2\sigma \cos \gamma}{\rho_w \cdot g \cdot R} \quad (3)$$

h = ketinggian kenaikan kapiler (m)

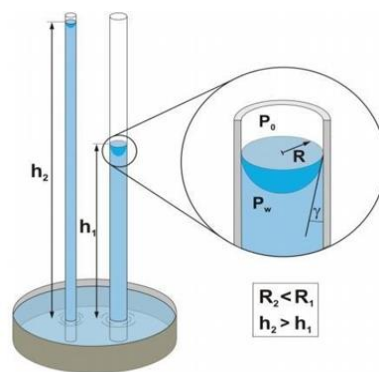
R = jari-jari meniskus = jari-jari pori (m)

σ = tegangan permukaan cairan = 0.00727 N/m (untuk air pada suhu 20°C)

γ = sudut yang terbentuk antara meniskus cairan dengan dinding pori (°) = 0

ρ_w = massa jenis air = 1000 kg/m³

g = percepatan gravitasi = 10 m/s²



Gambar 1. Ketinggian kenaikan kapiler

Besarnya perubahan energi potensial di dalam material berpori dapat ditentukan dengan mengintegrasikan gaya hidrostatik (f_i) yang bekerja di dalam pori akibat meningkatnya permukaan air pada pori material dari $z=0$ hingga $z=h$,

$$-\Delta U = \int_0^h f_i \cdot dz \quad (4)$$

Dimana gaya hidrostatik adalah hasil perkalian antara tekanan hidrostatik lokal (Δp) dan luas penampang pori (A_c) yang dapat diwakili oleh diameter pori, serta massa jenis fluida dan ketinggian permukaan air, seperti yang tertulis pada persamaan

$$f_i = \Delta P \cdot A_c = \pi/4 \cdot \rho \cdot g \cdot D^2 \cdot z \quad (5)$$

Kombinasi Persamaan (4) dan (5) yang kemudian diintegrasikan, akan menghasilkan Perubahan Energi Potensial akibat adanya kenaikan kapiler seperti pada persamaan dibawah:

$$-\Delta U = \int_0^h \frac{\pi}{4} \rho g D^2 z \cdot dz = \frac{\pi}{8} \rho g D^2 h^2 \quad (6)$$

ΔU = perubahan energi potensial ($\text{kg m}^2/\text{s}^2=\text{Nm}$)
 ρ_w = massa jenis air = $1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)
 D = diameter pori (m)
 h = ketinggian kenaikan kapiler (m)

3. Metode Penelitian

Penelitian ini meliputi pembuatan material karbon aktif bambu betung dan pengujian struktur pori. Adapun tahapan pembuatan dan pengujian material uji meliputi:

1. Pemotongan bambu betung kedalam ukuran panjang x lebar(tebal) x tinggi = 25mm x 17mm x 30mm
2. Material bambu yang telah dipotong-potong tersebut, kemudian dimasukkan kedalam oven pada suhu 120°C selama 6 jam untuk pengeringan.
3. Material uji yang telah kering tersebut, kemudian dilakukan proses karbonisasi pada electric furnace dengan variasi temperature karbonisasi 400°C , 500°C , 600°C , 700°C dan 800°C .
4. Material uji yang telah selesai dikarbonisasi diberikan kode nama material sesuai dengan temperature karbonisasinya, masing-masing secara berurutan sebagai PB 400, PB 500, PB 600, PB 700, dan PB 800.
5. Selanjutnya material hasil proses karbonisasi diatas dimasukkan satu persatu untuk diaktivasi karbon pada temperature furnace 600°C
6. Material hasil proses aktivasi (material karbon aktif bambu betung) tersebut kemudian diberikan kode nama material masing-masing secara berurutan sebagai PBC 400, PBC 500, PBC 600, PBC 700 dan PBC 800
7. Selanjutnya dilakukan Uji SEM terhadap masing-masing material karbon aktif tersebut diatas, untuk mendapatkan struktur pori dan ukuran jari pori material.

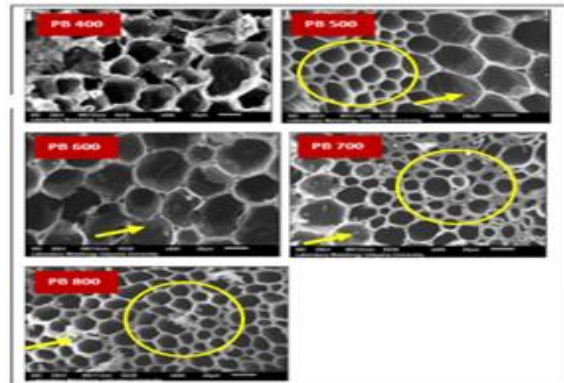
Pengkodean nama masing-masing material hasil proses karbonisasi dan aktivasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Proses Nama Material	Karbonisasi		Aktivasi	
	T $^\circ\text{C}$	Kode	T $^\circ\text{C}$	Kode
PAD 1	400°C	PB 400	600°C	PBC 400
PAD 2	500°C	PB 500	600°C	PBC 500
PAD 3	600°C	PB 600	600°C	PBC 600
PAD 4	700°C	PB 700	600°C	PBC 700
PAD 5	800°C	PB 800	600°C	PBC 800

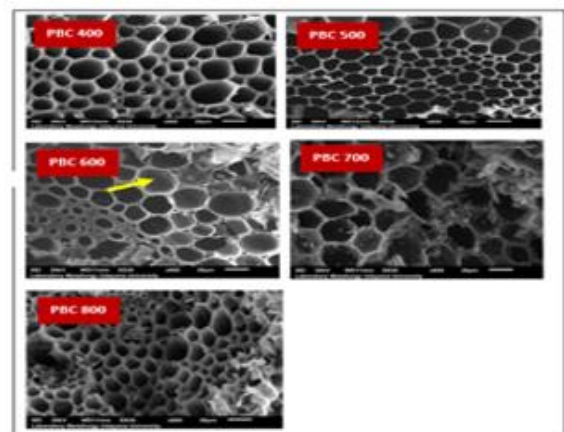
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Struktur Pori dan Ukuran Jari Pori Material

Dari hasil uji SEM didapat struktur pori dan ukuran jari pori material seperti terlihat pada Gambar 2 dan Tabel 2.



Gambar 2.a. Struktur pori material hasil proses karbonisasi



Gambar 2.b. Struktur pori material hasil proses aktivasi karbon

Pada Gambar 2.a. dapat dilihat bahwa proses karbonisasi menghasilkan struktur pori material, dimana pori yang terbentuk yang masih banyak tertutup lapisan tipis serta belum banyak pori kecil yang terbentuk. Hal ini disebabkan oleh rendahnya penetrasi panas yang diterima oleh material, sehingga masih banyak padatan-padatan material bambu yang belum terdekomposisi. Dapat dikatakan bahwa proses karbonisasi menghasilkan atau membuka pori awal material.

Pada Gambar 2.b. terlihat bahwa telah banyak terbuka pori kecil akibat tingginya penetrasi panas yang diterima material, yang telah mampu lebih banyak mendekomposisi padatan-padatan yang masih tertinggal pada proses karbonisasi. Semakin tinggi penetrasi panas yang diterima material, semakin

banyak pori kecil yang terbentuk, dan semakin meningkatkan karakteristik kapilaritas material.

Dari gambar struktur pori hasil uji SEM pada Gambar 2.b. akan dapat ditentukan jumlah pori yang dihasilkan oleh setiap material karbon aktif bambu betung beserta ukuran jari-jari masing-masing porinya, yang kemudian didapatkan ukuran jari pori rata-rata setiap material karbon aktif bambu betung tersebut, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran jari-jari pori material

No	Nama Material	ΣPori	Σ Ukuran jari pori (μm)	Ukuran jari pori (μm)
1	PBC 400	105	331,892	3,161
2	PBC 500	137	445,289	3,250
3	PBC 600	112	297,945	2,660
4	PBC 700	69	208,013	3,015
5	PBC 800	165	320,957	1,95

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa material karbon aktif yang dikarbonisasi pada temperature 800°C dan diaktivasi pada temperature 600°C yakni PBC 800 memiliki jari pori rata-rata terkecil 1.95 mikrometer, sedangkan jari pori terbesar dimiliki oleh material karbon aktif bambu betung PBC 500 yakni sebesar 3.25 mikrometer. Besarnya ukuran jari pori rata-rata didapat dengan membagi jumlah total ukuran jari pori masing-masing material dengan jumlah porinya. Dengan didapatnya ukuran jari pori rata-rata setiap material karbon aktif tersebut diatas, akan dapat selanjutnya digunakan untuk menentukan kenaikan kapiler serta energi potensial pori material tersebut.

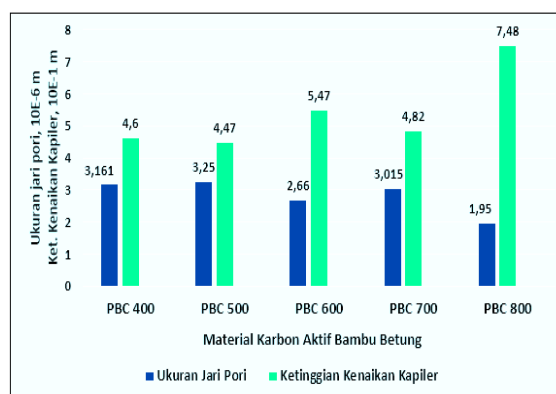
4.2. Ketinggian Kenaikan Kapiler

Besarnya ketinggian kapiler dapat ditentukan menggunakan persamaan (3), dan hasil perhitungan ketinggian kenaikan kapiler masing-masing material uji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Ketinggian kenaikan kapiler

No	Nama Material	Tegangan. Permukaan Air (N/m)	Ukuran Jari Pori (10 ⁻⁶ m)	Ketinggian Kenaikan Kapiler (m)
1	PBC 400	0,00727	3,161	0,460
2	PBC 500	0,00727	3,250	0,447
3	PBC 600	0,00727	2,660	0,547
4	PBC 700	0,00727	3,015	0,482
5	PBC 800	0,00727	1,95	0,748

Ketinggian kenaikan kapiler merupakan kesetimbangan antara gaya keatas (gaya kapiler) dan gaya kebawah (gaya berat air) dalam pori material. Ketinggian kenaikan kapiler yang dicapai merupakan ketinggian kenaikan maksimum permukaan air pada material. Ketinggian kenaikan kapiler ini berbanding terbalik dengan ukuran jari pori material, semakin kecil ukuran jari pori material, semakin tinggi kenaikan kapiler yang dapat dicapai oleh material tersebut. Pada Tabel 3 dan Gambar 3 dapat dilihat bahwa material karbon aktif bambu betung PBC 800 dengan ukuran jari pori terkecil yakni 1.95 mikrometer, menghasilkan ketinggian kenaikan kapiler tertinggi yakni sebesar 0.748 m dan kenaikan kapiler terendah dicapai oleh material PBC 500 yakni sebesar 0.447 m dengan ukuran jari pori terbesar 3.25 mikrometer.



Gambar 3. Hubungan ukuran jari pori dan kenaikan kapiler

4.3. Perubahan Energi Potensial Pada Pori Material

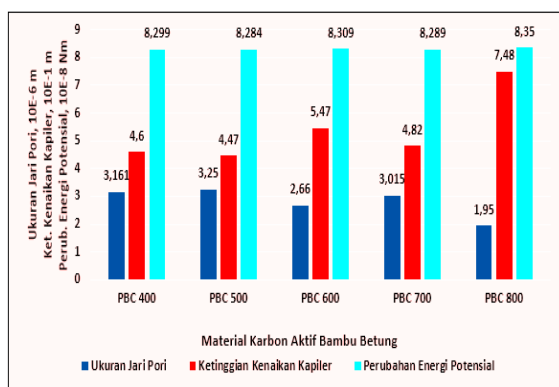
Besarnya energi potensial yang dihasilkan akibat kenaikan kapiler dalam pori material tersebut diatas dapat ditentukan menggunakan persamaan (6). Besarnya energi potensial pada pori untuk masing-masing material uji dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perubahan energi potensial pori material

No	Nama Material	Ukuran Jari Pori (10 ⁻⁶ m)	Ketinggian Kenaikan Kapiler (m)	Perubahan Energi Potensial (10 ⁻⁸ N.m)
1	PBC 400	3,161	0,460	8,299
2	PBC 500	3,250	0,447	8,284
3	PBC 600	2,660	0,547	8,309
4	PBC 700	3,015	0,482	8,289
5	PBC 800	1,95	0,748	8,350

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa energi potensial terbesar dihasilkan oleh material karbon aktif bambu betung PBC 800 yakni sebesar 8.35×10^{-8} Nm dengan ukuran jari porinya yang terkecil yakni 1.95 mikrometer. Sedangkan material karbon aktif PBC 500 dengan pori terbesarnya yaitu 3.25 mikrometer menghasilkan energi potensial terendah sebesar 8.284×10^{-8} Nm. Hal ini menunjukkan semakin kecil ukuran jari pori material, semakin besar energi potensial yang dihasilkan, karena ukuran pori yang kecil akan menghasilkan ketinggian kenaikan kapiler yang lebih tinggi.

Hubungan ukuran jari pori, ketinggian kenaikan kapiler dan energi potensial yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan ukuran jari pori, kenaikan kapiler dan energi potensial

Gambar 4 menjelaskan hubungan antara ukuran jari pori material, ketinggian kenaikan kapiler dan perubahan energi potensial pada pori material karbon aktif bambu betung. Semakin kecil ukuran jari pori yang dimiliki material, maka semakin tinggi kenaikan kapilernya serta perubahan energinya. Dalam konteks ini, energi potensial sebenarnya adalah energi yang berlawanan dengan energi kapiler (kerja kapiler), Dimana kerja kapiler mengangkat cairan keatas masuk kedalam pori material dengan ketinggian tertentu dan pada saat yang bersamaan ketinggian kenaikan kapiler akan menghasilkan perubahan energi potensial pori material, yang bekerja kearah yang berlawanan dengan arah kerja kapiler. Semakin tinggi kenaikan kapiler, semakin besar pula perubahan energi potensial pori material.

Dalam aplikasinya untuk material pad alternative sistim pendinginan direct evaporative, lebih diharapkan material karbon aktif bambu betung yang memiliki energi potensial tinggi. Energi potensial yang tinggi menunjukkan kenaikan kapiler yang tinggi. Dengan kenaikan kapiler yang lebih tinggi, untuk ukuran material yang sama, akan memiliki area terbasahi yang lebih luas. Area terbasahi yang lebih luas, memungkinkan

perpindahan panas dari udara ke air pada material pad akan menjadi lebih besar, yang menghasilkan pendinginan udara secara evaporative yang lebih besar pula, dalam artian udara yang melewati material pad (udara produk) akan menjadi lebih dingin. Namun demikian, walaupun arah kerja energi potensial adalah kebawah melawan arah kerja kapiler, hal ini tidak akan mengurangi kerja kapiler untuk mengangkat sejumlah massa air masuk kedalam pori material. Dengan kata lain, besarnya energi potensial hanya menunjukkan ketinggian maksimum kenaikan kapiler material, dimana terjadi kesetimbangan antara gaya keatas (gaya kapiler) dan gaya kebawah (gaya berat air).

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perubahan energi potensial material karbon aktif bambu betung seperti paparan diatas, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Energi potensial tertinggi dihasilkan oleh material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 800°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C (PBC 800) yakni sebesar $8,35 \times 10^{-8}$ N.m
2. Energi potensial terendah dihasilkan oleh material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 500°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C (PBC 500) yakni sebesar $8,284 \times 10^{-8}$ N.m
3. Dalam aplikasi sistem direct evaporative cooling lebih dipilih material yang memiliki energi potensial yang lebih tinggi, yakni material PBC 800 yang memiliki energi potensial terbesar yakni $8,284 \times 10^{-8}$ N.m dengan kenaikan kapiler tertinggi yakni sebesar 0,748 m, dimana kenaikan kapiler material yang lebih tinggi akan menghasilkan area basah material yang lebih luas, yang memperbesar perpindahan panas yang terjadi.

Daftar Pustaka

- [1] Akintunji, L.L., Haruna, I.U. et.al., 2014. Theoretical Performansi Analysis of Coconut Coir as Media in Evaporative Cooler, International Journal of Scientific & Technology Research 3 (3)
- [2] Kulkarni, R.K., S.P.S. Rajput (2011) Comparative performance of evaporative cooling pads of alternative material.

- [3] Boukhanouf, R. 2014. Investigation of An Evaporative Cooler for Building in Hot and Dry Climates, *Journal of Clean Technologies*, Vol.2, No. 3..
- [4] Al-Sulaiman F., 2002. Evaluation of the performance of new evaporative cooling pad materials, *Energy Conversion and Management* 43, 2267-2273
- [5] Malli, A. et al., 2011. Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads. *Energy Conversion and Management*, 52(7), pp.2598–2603. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.015>.
- [6] Putra Negara. D.N.K., Tirta Nindia T.G., Surata, I.W., Hidayat F., Sucipta, M. 2019. Nanopore Structure, Surface Morphology and Adsorption Capacity of Tabah Bamboo-Activated Carbon, *Surface and Interface*. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.04.002>
- [7] Liao, P., Ismael, Z.M., Zhang, W., Yuan, S., Tong, M., Wang, K. 2012. Adsorption of Dyes from Aqueous by Microwave Modified Bamboo Charcoal, *Chemical Engineering Journal* 195-196, 339-346.
- [8] Ren, Q., Zeng, Z., Jian, Z., Chen, Q. 2019. Incorporation of Bamboo Charcoal for Cement-based Humidity Adsorption Material, *Construction and Building Materials* 215, 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.173>
- [9] Wahyu Wiwekanyana, 2022. Studi eksperimental karakteristik kerja kapiler material karbon aktif bambu betung tanpa holding time
- [10] Ogie Indra Putra, 2023. Studi eksperimental karakteristik hambatan kekentalan fluida pada material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif.
- [11] Ngruh Surya Pranata, 2022. Studi eksperimental karakteristik capillary rise material karbon aktif bambu betung dengan holding time 30 menit sebagai material pad alternative
- [12] Extrand C.W. and Sung In Moon, 2013. *Experimental measurement of forces and energies associated with capillary rise in a vertical tube*. *Journal of Colloid and Interface Science* 407 (2013) 488-492. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2013.06.017>
- [13] Dani Or, 2018. *Capillary Processes in Porous Media (An introduction to Soil Physics)*. Department of Environmental System Science (D-USYS), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich)



Fikry Sapisandi menempuh pendidikan program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2017 dan menyelesaikannya pada tahun 2024 dengan topik Studi Eksperimental Karakteristik Perubahan Energi Potensial Pada Material Karbon Aktif Bambu Betung Sebagai Material Pad Alternatif

Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi pada penelitian tersebut adalah KONVERSI ENERGI



Hendra Wijaksana menyelesaikan studi S1 Teknik Mesin di ITS Surabaya, kemudian melanjutkan studi S2 Energy Technology di Salford University, U.K dan menyelesaikan studi S3 di Program Doktor Ilmu Teknik, UNUD