

Laju Perpindahan Panas Pada Karbon bambu Betung Dengan Variasi Temperatur Karbonisasi 500°C, 600°C, 700°C, dan 800°C

Alex Wardana, Hendra Wijaksana, dan I Ketut Astawa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik laju perpindahan panas bambu betung sebagai material pad pada sistem direct evaporative cooling. Bambu betung akan di karbonisasi dengan variasi temperatur 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C dengan laju temperatur reaktor pemanasan 100 °C/jam. Dari hasil pengujian di dapatkan nilai laju perpindahan panas tertinggi pada spesimen bambu betung dengan temperatur 600 °C sebesar 21.55×10^{-5} watt dan nilai laju perpindahan panas terendah pada spesimen 700 °C sebesar 7.16×10^{-5} watt. Spesimen bambu betung dengan temperatur 600 °C berpotensi menjadi material pad sistem direct evaporative cooling.

Kata Kunci : Direct Evaporative Cooling, Bambu Betung, Karbonisasi, Laju Perpindahan Panas

Abstract

This study aims to determine the characteristics of the heat transfer rate of bamboo betung as a pad material in a direct evaporative cooling system. Bamboo betung will be carbonized with temperature variations of 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C with a heating reactor temperature of 100 °C/hour. From the test results, the highest heat transfer rate value was found in the bamboo betung specimen with a temperature of 600 °C at 21.55×10^{-5} watts and the lowest heat transfer rate value at 700 °C specimen at 7.16×10^{-5} watts. Bamboo betung specimens with a temperature of 600 °C have the potential to be pad materials for direct evaporative cooling systems.

Keywords: Direct Evaporative Cooling, Betung Bamboo, Carbonization, Heat Transfer Rate

1. Pendahuluan

Di era modern ini, penggunaan sistem pendingin semakin meningkat seiring dengan kebutuhan hidup manusia, dengan pengaplikasian yang meliputi berbagai aspek kehidupan, dimulai dari sektor industri, komersial, rumah tangga, dan transportasi. Jenis pendingin yang sering kita temukan adalah AC (*Air Conditioning*).

Prinsip kerja AC pada umumnya menyerap panas dari udara di dalam ruangan, kemudian melepaskan panas tersebut di luar ruangan, dengan demikian, temperatur udara di dalam ruangan akan berangsur-angsur turun sehingga dapat menghasilkan temperatur udara yang dingin. Dalam pengoperasiannya, AC memerlukan energi listrik, dan hampir seluruh komponennya memerlukan energi listrik. Disamping kebutuhan energi listrik yang tinggi, penggunaan refrigerant pada sistem AC dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan, dimana akan mengakibatkan pemanasan global. Untuk mengurangi dampak krisis energi dan efek yang di timbulkan oleh AC di perlukan suatu sistem pendingin ruangan yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan.

Evaporative cooling adalah salah satu sistem pendingin alternatif. *Evaporative cooling* adalah suatu proses pendinginan dimana dalam fase cair berkontak langsung dengan udara dan menghasilkan fase gas. *Direct evaporative cooling* terdiri dari media evaporasi (pad yang dapat dibasahi dan berpori), kipas yang menghembuskan udara melalui media yang dibasahi. *Direct evaporative cooling* merupakan proses pendinginan adiabatik, dimana total entalpi udara konstan selama proses berlangsung. Air menyerap panas sensible dari udara suplai dan menguap menyebabkan suhu udara menurun dan kelembapannya meningkat. Salah satu komponen yang dibutuhkan di dalam sistem *direct evaporative cooling* adalah cooling pad. Cooling pad pada sistem *direct evaporative cooling* adalah material berpori (*porous material*) yang memiliki daya serap dan daya tampung air yang cukup besar untuk bisa 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 yang makin luas, sehingga akan meningkatkan jumlah panas sensible udara suplai yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut, dan

temperature udara produk menjadi semakin rendah (lebih dingin). Dalam penelitian ini permasalahan yang akan dibahas adalah, bagaimana pengaruh variasi temperatur terhadap karakteristik laju perpindahan panas bambu betung sebagai material pad. Batasan yang di tetapkan di penelitian ini antara lain:

1. Material yang digunakan bambu betung lokal bali
2. Temperatur karbonisasi di tetapkan 500°C, 600°C, 700°C, dan 800°C
3. Proses laju perpindahan panas yang di perhitungkan hanya yang terjadi di pori bambu.

2. Dasar Teori

2.1. Pembuatan Arang Karbon

Proses pembuatan arang karbon dimulai dari proses pemanasan material bambu betung di oven atau dapur listrik dengan temperatur 105°C selama 6 jam untuk menghilangkan kadar air material bambu betung, kemudian dilakukan 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. Tujuan proses karbonisasi adalah meningkatkan kandungan karbon dan menghasilkan porositas awal pada material. Produk dari proses karbonisasi adalah berupa arang (*charcoal*) yang merupakan produk hasil dekomposisi material organik alami atau sintesis.

2.2. Kapilaritas

Kapilaritas adalah kemampuan cairan mengalir pada ruang sempit tanpa adanya bantuan atau energi tambahan dan bertentangan dengan kekuatan eksternal seperti gravitasi [1]. Terjadinya kapilaritas disebabkan oleh adanya gaya tarik menarik antara molekul-molekul zat cair dan zat padat, sehingga *porous* media dengan saluran (pori) yang cukup kecil akan menyebabkan terjadinya kombinasi antara tegangan permukaan.

2.3. Permeabilitas

Permeabilitas merupakan makroskopik ukuran kemudahan mengalirnya cairan melalui rongga porous material. Permeabilitas di definisikan sebagai kemampuan cairan mengalir melalui lubang porous material.

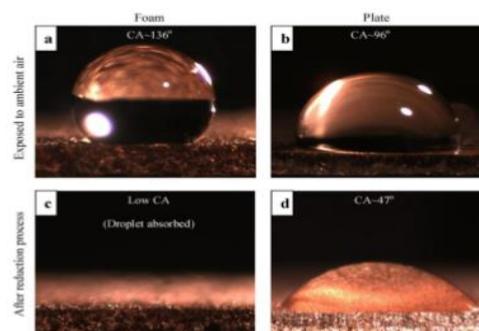
Nilai dari permeabilitas dapat di tentukan dengan rumus berikut:

$$K = \frac{dp^2 \cdot \delta^3}{122(1 - \delta)^2} \quad (1)$$

Dimana K adalah permeabilitas material, dp adalah diameter pori (μm), 122 merupakan nilai faktor geometrik arang bambu [2], dan adalah porositas (%).

2.4 Wettability

Sifat mampu basah (*wettability*) adalah kemampuan suatu fluida untuk membasahi permukaan zat padat, dan *wettability* sangat mempengaruhi kapilaritas dari suatu material. Untuk dapat memiliki kapilaritas, suatu material harus memiliki sifat mampu basah sebagai syarat utamanya. *Wettability* material dipengaruhi oleh sudut kontak. Semakin kecil sudut kontak yang terbentuk antara fluida dan material padat, maka material tersebut akan memiliki *wettability* yang makin besar [3]. dan sebaliknya *wettability* dan kapilaritas material akan menurun dengan bertambah besarnya sudut kontak.



Gambar 1. Wettability Material

2.5 Laju Aliran Massa Fluida

Laju aliran massa fluida dalam hal ini adalah jumlah massa fluida yang dapat dipompakan secara kapiler kedalam material berpori per satuan waktu. Dimana kemampuan nilai laju aliran massa fluida berpengaruh terhadap kemampuan absorpsi air pada material pad yang akan berguna untuk menjamin ketersediaan air dalam material pad, guna berlangsungnya terjadinya proses evaporasi yang menghasilkan efek pendinginan udara.

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa fluida kapiler dalam material pad, yang besarnya dapat dituliskan sebagai

$$\dot{m} = \frac{\rho_1 \cdot K \cdot A_w}{\mu \cdot l_{eff}} \left\{ \frac{2\sigma_1}{\mu l_{eff}} \cos \theta - \rho_1 \cdot g \cdot l_{eff} \sin \theta \right\} \quad (2)$$

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa fluida (kg/s), K adalah Permeabilitas sumbu kapiler (m^2), r_{eff} adalah jari jari efektif pori (μm), A_w adalah Luas Penampang pad (m^2), l_{eff} adalah panjang efektif pipa kalor (m), σ adalah tegangan permukaan fluida (N/m), μ_1 adalah viskositas fluida kerja pipa kalor ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$), \cos adalah sudut kontak wettability, \sin adalah sudut posisi pad, adalah massa jenis fluida (Kg/m^3).

2.6 Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas yang udara total dapat dianggap sama dengan laju aliran kalor maksimum yang terdapat pada material pad

berdasarkan prinsip kerja sumbu pipa kalor. panas udara akan ditransfer secara konveksi dari udara ke permukaan luar kulit bambu, kemudian panas ini akan ditransfer dari permukaan kulit luar bambu secara konduksi ke permukaan dalam kulit bambu (tebal kulit bambu setelah karbonisasi dan aktivasi kurang lebih 0.3 cm), kemudian dari permukaan kulit dalam bambu, panas ditransfer secara konveksi ke aliran massa fluida, hingga akhirnya terjadi penguapan.

Nilai dari laju perpindahan panas dapat ditentukan dengan rumus berikut :

$$Q_T = \dot{m} \times L \quad (3)$$

Dimana Q_T adalah laju perpindahan panas maksimum, \dot{m} adalah laju aliran massa fluida dan L adalah kalor laten penguapan.

3. Metode penelitian

Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1. Alat

1. Bambu Betung (*Dendrocalamus Asper*).
2. Timbangan.
3. Peralatan Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM).
4. Aluminium Foil.
5. Alat Karbonisasi .
6. Gergaji.
7. Image J.

3.2. Proses Karbonisasi

Adapun tahapan proses karbonisasi sebagai berikut :

1. Bambu betung yang kering di potong dengan ukuran P x L x T : 2.5 cm x 1.7 cm x 3.1 cm, kemudian di panaskan pada oven dengan temperatur 105°C selama 6 jam untuk mengilangkan kadar air.
2. Sampel uji dimasukkan ke dalam reaktor pemanasan untuk proses karbonisasi, reaktor pemanasan di tingkatkan dengan laju 100°C/jam hingga mencapai tempratur 500,600,700,dan 800°C.

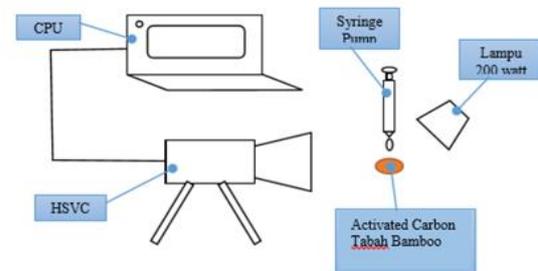
3.3. Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopoe*) dimaksudkan untuk mendapatkan karakteristik struktur pori sampel KRBB 500, KRBB 600, KRBB 700 dan KRBB 800 yang meliputi ukuran pori, distribusi pori dan porositas sampel.

3.4. Pengujian Sudut Kontak

Pengujian sudut kontak untuk menentukan sifat mampu basah (wettability) dari material yang sudah di karbonisasi. Dengan tahapan arang bamboo diletakan tepat

dibawah syringe pump kemudian di injeksikan air berupa droplet tepat di permukaan pori dan kulit pada seluruh spesimen uji, dan dilakukan pengambilan video menggunakan kamera HSVC (High Speed Video Camera) kemudian dalam bentuk gambar dianalisis dengan aplikasi image J.



Gambar 2. Skematik Pengambilan Data Sudut Kontak

3.5. Pengujian Kapilaritas

Pengujian kapilaritas ini bertujuan untuk mengetahui nilai dari porositas. Adapun tahapan pengujian nya yaitu :

1. Timbang spesimen untuk mendapat nilai massa spesimen sebelum menyerap air.
2. Lakukan pengujian dengan menempelkan tisu dipermukaan atas salah satu spesimen yang akan diuji.
3. Mengisi gelas beker dengan air dan letakkan diatas timbangan.
4. Memegang spesimen dengan posisi bagian bawah spesimen menempel dengan permukaan air di gelas beker dan menhidupkan stopwatch.
5. Ketika seluruh bagian tisu sudah basah, matikan stopwatch dan angkat spesimen dari gelas beker dan timbang massa spesimen setelah penyerapan.
6. Catat data ketinggian air (tinggi spesimen), waktu penyerapan, dan perubahan massa air dari sebelum terjadi penyerapan dan sesudah proses penyerapan sebagai data kapilaritas karbon aktif dan tegangan permukaan.

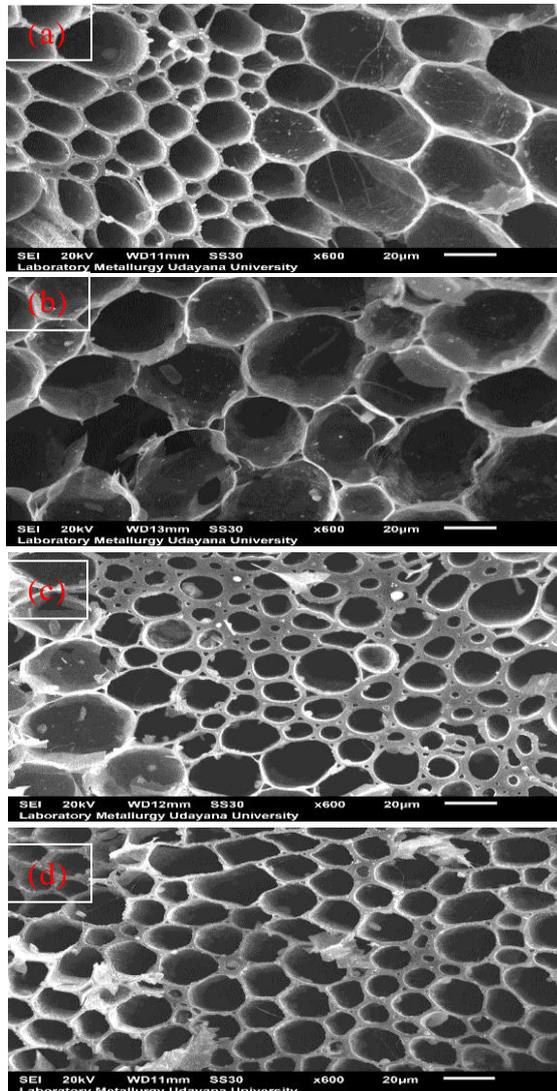
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakteristik Struktur Pori



Gambar 3. Spesimen arang aktif bambubetung, AKRB 400, 500, 600, 700 dan 800

Gambar 3 merupakan gambar hasil bambu betung setelah melalui proses karbonisasi dengan variasi temperatur, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C. Spesimen bambu betung yang telah melalui uji SEM di dapatkan struktur pori yang terdiri dari jari-jari pori, luas permukaan pori, distribusi pori, dan volume pori dengan aplikasi Image J.



Gambar 4. Gambar Struktur Pori dari spesimen (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, dan (d) 800 °C

Tabel 1. Data Struktur Pori

Nama Spesimen	Jari-Jari Pori(µm)
KRBB 500	3.52
KRBB 600	4.26
KRBB 700	2.52
KRBB 800	2.91

4.2. Karakteristik Porositas

Porositas ialah perbandingan antara volume pori yang terbentuk pada material dan volume total material. Pada penelitian ini, perhitungan nilai porositas berdasarkan pada perhitungan yang telah dilakukan Midiani [4]. Dimana pengukuran dilakukan dengan mengukur massa awal spesimen saat dalam keadaan kering dan massa akhir spesimen saat jenuh dengan air. Pengurangan antara keduanya adalah volume air yang terserap atau volume rongga yang ada pada arang. Dimana volume pori diketahui dari hasil perkalian volume air yang terserap dengan volume spesifik air saat jenuh. Diketahui volume spesifik air saat jenuh adalah 1003 mm³/gr.

Tabel 2. Data porositas material

Nama Spesimen	Massa Awal (gr)	Massa Akhir (gr)	Massa Air Yang Terserap (gr)
KRBB500	3.14	6.5056	3.3656
KRBB600	3.06	6.0655	3.0055
KRBB700	2.26	4.7264	2.4664
KRBB800	2.96	5.1967	2.2367

Volume Pori (cm ³)	Volume Material (cm ³)	Porositas (%)
3.3755621	19.465	17.341701
3.0143962	16.923	17.812422
2.4737005	15.008	16.482254
2.2433206	12.354	18.158658

4.3. Sudut Kontak

Pengukuran sudut kontak yang di gunakan pada penelitian ini, berdasarkan pada pengukuran yang telah dilakukan Xu [5]. Pengukuran dengan cara menambahkan garis bantu antara permukaan pori bambu betung dan menambahkan garis bantu yang menyinggung busur lingkaran pada droplet sehingga kedua garis bantu membentuk sudut. dengan aplikasi image j.

Tabel 3. Data sudut kontak dan jari pori efektif

Nama spesimen	Sudut Kontak(°)	Jari-jari Pori Efektif (m)
KRBB 500	19.279	0.00000373
KRBB 600	21.809	0.00000459
KRBB 700	32.658	0.00000301
KRBB 800	30.498	0.00000338

4.4. Karakteristik Permeabilitas

Permeabilitas diartikan sebagai kemampuan cairan mengalir melalui lubang porous material, dengan kata lain permeabilitas mencerminkan efektivitas interaksi antara cairan dan porous material, dan bukan merupakan properti dari cairan ataupun porous material [6].

Nilai permeabilitas dipengaruhi oleh nilai porositas dan diameter pori dari spesimen arang bambu betung. Spesimen yang memiliki diameter pori dan porositas yang besar akan menghasilkan permeabilitas yang lebih besar

Tabel 4. Tabel nilai permeabilitas spesimen

Spesimen	Faktor geometrik	Diameter pori (mm)	Porositas (%)	Permeabilitas (m^2) 10^{-15}
KRBB 500	122	7.04	0.173	3.1
KRBB 600	122	8.52	0.178	4.98
KRBB 700	122	5.05	0.165	1.35
KRBB 800	122	5.82	0.182	2.48

4.5. Karakteristik Laju Aliran Massa

Tabel 5. Hasil perhitungan laju aliran massa fluida

Nama Spesimen	K (m^2) 10^{-15}	l_{eff} (m)	A_w (m)
KRBB 500	3.1	0.0296	0.000658
KRBB 600	4.98	0.0283	0.000598
KRBB 700	1.35	0.0286	0.000525
KRBB 800	2.48	0.0246	0.000502

r_{eff} (m)	Sudut kontak (°)	\dot{m} (kg/s) 10^{-8}
0.00000373	19.28	8.55
0.00000459	21.81	9.55
0.00000301	32.66	3.17
0.00000338	30.49	4.38

Dalam menentukan besarnya laju aliran massa fluida pada material arang bambu betung terdapat beberapa pengujian seperti yang telah dilakukan sebelumnya yaitu wettability untuk mendapatkan nilai sudut kontak, uji permeabilitas, uji scanning electron microscope (SEM) untuk mendapatkan struktur pori, dan uji kapilaritas untuk mendapatkan tegangan permukaan.

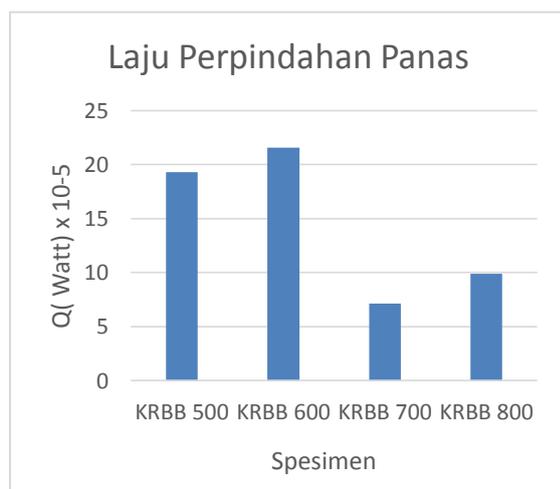
4.6. Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas yang di perhitungkan hanya yang terjadi di pori bambu saja, untuk mengetahui besarnya nilai laju perpindahan pans di butuhkan nilai \dot{m} .

Tabel 6. Hasil Perhitungan Laju Perpindahan Panas

Nama Spesimen	L (joule/k)	\dot{m} (kg/s) 10^{-8}	Q (Watt) 10^{-5}
KRBB 500	2257	8.55	19.30
KRBB 600	2257	9.55	21.55
KRBB 700	2257	3.17	7.16
KRBB 800	2257	4.38	9.89

Berdasarkan tabel 6, ditunjukkan bahwa spesimen KRBB 600 memiliki nilai laju perpindahan panas tertinggi yaitu 21.55×10^{-5} watt dan spesimen KRBB 700 memiliki nilai laju perpindahan panas terendah yaitu 7.16×10^{-5} watt. Hal ini disebabkan oleh ukuran pori yang cukup besar dan porositas yang cukup tinggi pada material KRBB 600 menghasilkan permeabilitas yang paling besar dan dengan sudut kontaknya yang kecil material bersifat lebih hidrofilik (lebih mampu basah) dibandingkan dengan yang lainnya. Dengan demikian, semakin tinggi permeabilitas dan sifat mampu basah (wettability) material, menghasilkan laju aliran massa fluida yang besar, maka menghasilkan laju perpindahan panas yang besar.



Gambar 5. Grafik Nilai Laju Perpindahan Panas

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat di simpulkan spesimen dengan temperatur karbonisasi 600°C (KRBB 600) memiliki karakteristik laju perpindahan panas tertinggi yaitu sebesar 21.55×10^{-5} watt sedangkan laju perpindahan panas terkecil dihasilkan oleh Spesimen dengan temperatur karbonisasi 700°C (KRBB 700) yaitu sebesar 7.16×10^{-5} watt. Dengan karakteristik laju perpindahan panas tertinggi yang dimiliki oleh Spesimen dengan temperatur karbonisasi 600°C (KRBB 600), maka material ini sangat berpotensi digunakan sebagai material pad sistem direct evaporative cooling, karena mampu menyerap panas udara lebih banyak, sehingga proses evaporasi pada material pad menjadi semakin besar dan menghasilkan efek pendinginan yang lebih besar pula.

Daftar Pustaka

- [1] Lago, M., Araujo, M., 2001, *Capillary Rise In Porous Media*, Physica A: Statistical Mechanics And Its Applications, 289, 1-17.
- [2] 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 pip*, Applied Thermal Engineering, 169, 114927.
- [3] Shirazy M. R., Blais S., Fr chet L. G., 2012, *Mechanism Of Wettability Transition In Copper Metal Foams: From Superhydrophilic To Hydrophobic*, Applied Surface Science, 258, 6416-6424.

- [4] Midiani L.P., Suprpta IN.S., Septiadi, W.N., Sucipta M., 2019, *Characterization of capillary pumping amount in novel sintered zeolites and hybrid zeolite-Cu for heat pipe applications*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 145.
- [5] Xu B., Liu D., Xu, G., Zhang X., Bi L., 2013, *A Measurement Method For Contact Angle Based On Hough Transformation*. *Measurement*, 46, 1109-1114.
- [6] Berti L.F., Bazzo E., Santos P.H.D., Janssen R., 2011, *Evaluation of permeability of ceramic wick structures for two phase heat transfer devices*.



Alex Wardana menyelesaikan studi program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2017 sampai 2021. Ia menyelesaikan program sarjana dengan topik penelitian: Laju Perpindahan Panas Pada Bambu Betung Dengan Variasi Temperatur Karbonisasi 500, 600, 700, 800°C

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan perpindahan panas, mekanika fluida, dan termodinamika.