

Heat Flux Kondensasi pada Media Arang Tempurung Kelapa (Cocos Nurifera)

Eko Yohanes, Sudjito Soeparman, Eko Siswanto
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan Mayjend Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
Phone: +62-341-587711, Fax: +62-341-554291
E-mail: yohanes_itn@yahoo.com

Abstract

Condensation in porous media can be applied for alternative of control air humidity. Which one for each temperature variation need an hour to complete the experiments. Coconut shell charcoal installed in the condensator chamber with height 2 cm. warm vapour then entered the condensator chamber. We observed temperature distribution and absorbed warm vapour among the condensation chamber and analyze how absorbed vapour will formed. The results showed forced convection that unown from value $Gr/Re^2 < 1$. With the results of the heat flux at the highest point of T_2 and T_1 . With Lyapunov Exponents $M = \log_2(\sum S_n + 1/\sum S_n)$ is always a positive value, due to increased average condensate growing over time and increase included in chaos areas because there is no repetition in each attractor.

Keywords : Heat Flux, Coconut Shell Charcoal and Ekspone Lyapunov.

PENDAHULUAN

Kondensasi merupakan perubahan keadaan fisik uap dari fase gas menjadi fase cair, terjadi ketika uap didinginkan akan berubah menjadi cair, kondensasi uap dimulai dengan pembentukan kelompok atom atau molekul yang lembab dalam volume udara antara fase gas dan permukaan cairan atau padatan [1].

Mengacu pada hasil kondensasi uap pada permukaan dinding *filmwise* dan *dropwise*, kasus ini terjadi ketika uap menempel dipermukaan yang tidak tersusun oleh partikel-partikel. Kondensasi ini juga tergantung pada kemampuan *porous media* untuk dapat meresapkan pada fase cair atau fase uap dalam keadaan cair. Mekanisme ini bisa terjadi karena *kapilaritas* dan *infiltrasi*, untuk *kapilaritas* penyerapan air hasil dari tarik-menarik antara air dan pori-pori serta tegangan permukaan air [2]. Sedangkan pada *infiltrasi*, dibutuhkan tekanan hidrostatik untuk penyerapannya. Terdapat dua jenis kondensasi yang dapat dibedakan, yaitu kondensasi

permukaan dan kondensasi mikro atau kondensasi kapiler.

Kondensasi permukaan terjadi pada permukaan media, sedangkan kondensasi kapiler dapat terjadi di pori-pori kapiler *porous media*. Sebagai sumber kondensat, pada studi ini aliran udara lembab atau uap dapat dialirkan secara tangensial menuju *porous media* [3].

Tujuan kondensasi pada *porous media* untuk mengontrol kelembaban udara dapat dipakai untuk aplikasi tertentu, sebagai alternatif yang penting pada aplikasi khusus. Penelitian kondensasi pada *porous media* yang dipakai untuk penyerap kondensat dan penghantar panas arang tempurung kelapa. Pemakaian arang tempurung kelapa didasarkan pada pemanfaatan limbah tempurung kelapa yang melimpah dan belum dimanfaatkan penggunaannya.

Limbah yang terbuang kelingkrungan akan menimbulkan masalah bagi kehidupan dan kesehatan [4], oleh karena itu perlu adanya upaya-upaya teknologi guna penanganan limbah untuk mengurangi masalah tersebut.

Arang tempurung kelapa untuk media kondensasi saat ini belum banyak digunakan [5], bahan alam tersebut dipakai sebagai pengganti silica gel dan glass bead [6] yang telah dipakai sebagai penyerap kelembaban. Arang tempurung kelapa sebagai salah satu bahan alam yang banyak tersedia di Indonesia, diharapkan dapat menjadi alternatif penyerap kelembaban yang baik.

Atas dasar ini, maka perlu dilakukan penelitian untuk mengkaji dan mengamati dinamika aliran kondensat dan panas yang terjadi pada kondensasi [7], guna pemahaman yang lebih baik *porous media* tempurung kelapa untuk aplikasi secara luas.

METODOLOGI PENELITIAN

Percobaan ini dilakukan pada *porous media* dari bahan arang tempurung kelapa, pada bagian pertama, penelitian ini mengamati fenomena perpindahan panas kondensasi di dalam *porous media*, pada bagian kedua penelitian ini dilakukan pada aliran massa, khususnya dalam dinamika propagasi aliran kondensat kedalam arang tempurung kelapa.

Ruang kondensasi utama dari bahan kaca, sehingga tampak aliran kondensat ke dalam *porous media* untuk proses pengamatan, ditambahkan 6 termokopel dalam ruang kondensasi untuk mengetahui suhu didalam ruang kondensasi, dan suhu yang ada diluar ruang kondensasi yang nantinya digunakan untuk menghitung *heat flux*. Untuk menjaga suhu yang lebih rendah, bagian bawah ruang kondensasi dialiri air dingin yang disirkulasikan oleh generator air dingin.

Pressure generator mengatur tekanan uap panas yang akan dialirkan ke dalam ruang kondensasi, agar tekanannya stabil sesuai dengan yang diinginkan. Untuk mengamati proses kondensasi dan migrasi kondensat disiapkan dua kamera untuk observasi.

Perangkat yang mendukung untuk sistem pelembab udara lembab yaitu pada tangki humidifier dan circulator pendingin air, yang dikontrol arah alirannya dapat dilihat pada gambar 1. Skema peralatan eksperimen ruang kondensasi, sebagai unsur utama dalam penelitian ini yang terletak dibagian gambar

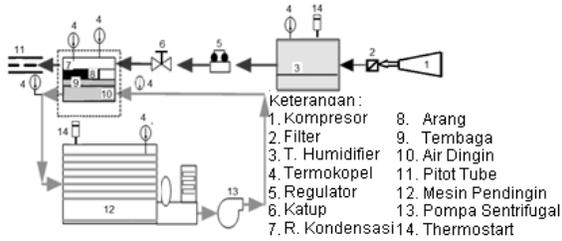
tersebut. Adapun sebagai informasi tambahan bagian *condensation chamber* terbuat dari bahan *polycarbonate*. Alasan memilih bahan ini adalah mempermudah dalam pengambilan data karena bahan bisa dilihat dengan kasat mata atau transparan dan juga material *polycarbonate* dapat bekerja dengan suhu tinggi. Dengan dimensi ruang kondensasi 20mm x 40mm x 240mm, seperti yang terlihat pada gambar 2. Dimensi seksi uji yang bertujuan untuk memvisualisasikan perilaku kondensat yang sudah terekstrak

Mekanisme ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Dari kompresor yang digunakan sebagai penghasil udara yang ditambahkan oil filter yang bertujuan menyaring minyak, yang masuk ke dalam tangki humidifier untuk mengurangi pencemaran minyak dalam ruang kondensasi.

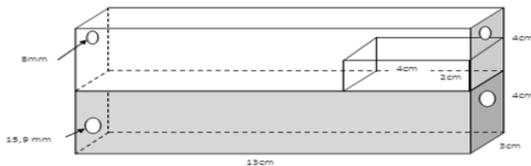
Untuk menjaga tekanan udara lembab, digunakan regulator tekanan. Dimana air dalam tangki humidifier dipanaskan oleh elemen listrik yang sudah dikontrol dengan thermostat untuk mendapatkan temperatur yang stabil dan kemudian dialirkan untuk menghasilkan udara lembab dengan tekanan udara yang sudah diatur dari kompresor.

Ditetapkan aliran udara pada tekanan maksimal 1 psi, pengendalian udara lembab agar mencapai suhu yang diinginkan dan pada system pendinginan air yang menuju ruang kondensasi temperatur dikontrol 10°C. Digunakan plat CU, Sebagai lantai ruang kondensasi untuk menjaga temperatur, digunakan pompa untuk circulator air pendingin yang masuk ke ruang kondensasi.

Dalam dimensi seksi uji digunakan tambahan sekat pada gambar 2. Dari bahan polycarbonate dalam ruang kondensasi yang digunakan untuk efisiensi dalam penyerapan kondensat, dimana aliran uap terakselerasi jauh lebih luas dalam penyebaran udara lembab dalam ruang kondensasi. Sehingga menyebabkan terjadinya percampuran yang dapat meningkatkan laju transfer panas atau massa pada suatu aliran. Pola seksi uji pada gambar 3.



Gambar 1. Skema Peralatan Eksperimen.



Gambar 2. Dimensi Seksi Uji.



Gambar 3. Pola Seksi Uji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aliran kondensat pada *porous media* arang tempurung kelapa, yang semakin tebal dengan pertambahan temperatur yang teramati secara visualisi. Untuk aliran panas yang terjadi akan disajikan dalam bentuk gambar grafik *Heat flux* per titik temperatur dalam ruang kondensasi. Perubahan konduktivitas termal efektif pada *porous media* terhadap waktu pada gambar 6. Grashof number dan Reynolds number aliran kondensat dalam *porous media* arang tempurung kelapa.

Konduktivitas Termal Efektif Pada Porous Media.

Berdasarkan gambar 4. Secara umum konduktivitas termal efektif (K_{eff}) terhadap waktu (t), yang ditunjukkan oleh grafik mencapai puncak tertinggi pada $t : 60$ menit. Grafik tersebut juga menunjukkan peningkatan (K_{eff}) memiliki trend yang berimpit, ini sesuai dengan persamaan konduktivitas termal yang merupakan fungsi pertambahan tebal kondensat yang terserap pada *porous media*.

Fenomena tersebut sesuai dengan persamaan berikut :

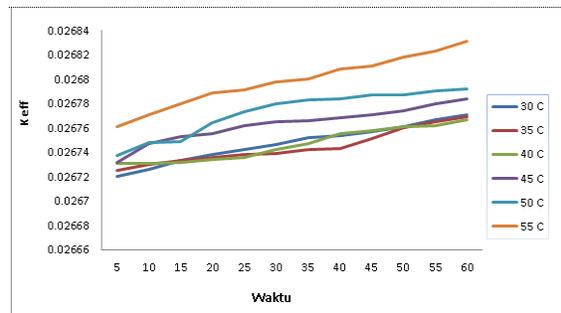
$$k_{eff} = \frac{k'k''z}{[k''\delta + k'(1-\delta)]} \tag{1}$$

$$k' = \left\{ \left(1 - \varepsilon^{\frac{2}{3}} \right) + \frac{\varepsilon^{\frac{2}{3}}}{\left(1 - \varepsilon^{\frac{1}{3}} \right) + \varepsilon^{\frac{1}{3}} \left(\frac{k_p}{k_a} \right)} \right\} k_p \tag{2}$$

$$k'' = \left\{ \left(1 - \varepsilon^{\frac{2}{3}} \right) + \frac{\varepsilon^{\frac{2}{3}}}{\left(1 - \varepsilon^{\frac{1}{3}} \right) + \varepsilon^{\frac{1}{3}} \left(\frac{k_p}{k_a} \right)} \right\} k_p \tag{3}$$

Dimana :

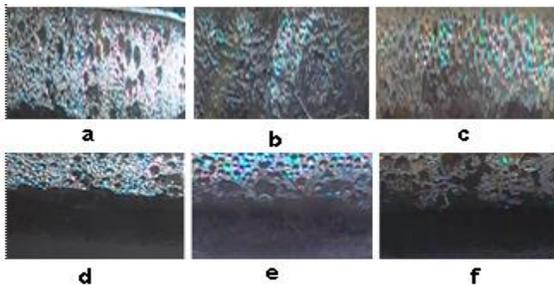
- k_{eff} = konduktivitas termal efektif keseluruhan lapisan *porous media*.
- k' = konduktivitas termal *porous media* dengan kondensat.
- k'' = konduktivitas termal *porous media*.
- δ = ketebalan kondensat.
- z = ketebalan *porous media*.
- ε = porositas.
- k_a = konduktivitas termal udara.
- k_L = konduktivitas termal kondensat.
- k_p = konduktivitas termal partikel.



Gambar 4. Grafik Konduktivitas Termal Efektif Pada Porous Media Terhadap Waktu.

Secara detail, peningkatan k_{eff} terhadap waktu pada temperatur vapor 30°C, 35°C dan 40°C menunjukkan kemiripan posisi trend, atau saling bersinggungan diantara ketiganya. Ini

menunjukkan tidak terdapat signifikansi peningkatan penyerapan kondensat pada k_{eff} terhadap ketiga temperatur tersebut. Ini dapat dibuktikan dengan jumlah kondensat yang terserap oleh *porous media* pada ketiga temperatur tersebut. Fenomena tersebut dapat terjadi karena daya serap *porous media* terhadap kondensat (*drop wise*) yang tersedia tidak menunjukkan signifikansi yang nyata, atau kekurangmampuan *porous media* menyerap *drop wise* pada temperatur T: 30°C, 35°C dan 40°C.



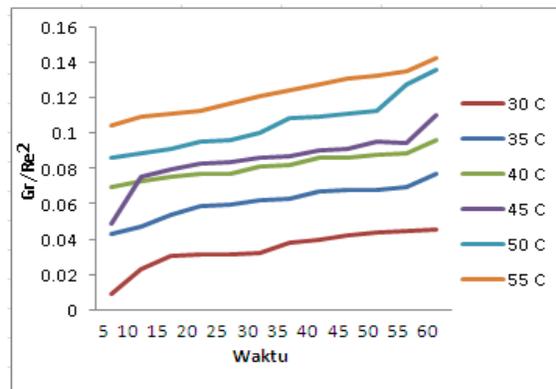
Gambar 5. visualisasi Kondensat pada menit 50 pada temperatur a. 30°C b.35°C c.40°C d. 45°C e. 50°C f.55°C

Dari gambar 5, terlihat *drop wise* yang terbentuk semakin padat dengan butiran *drop wise* yang semakin banyak dengan meningkatnya temperatur. Ini berarti benar bahwa kemampuan arang tempurung kurang menyerap kondensat.

Selanjutnya, pada temperatur vapor 45°C, 50°C dan 55°C. menunjukkan signifikansi yang nyata perbedaan posisi kemiringan trend. Berdasarkan persamaan (1) dapat dijelaskan bahwa fenomena itu disebabkan oleh tebal kondensat yang terserap dalam *porous media*, memiliki beda yang nyata antara temperatur 45°C, 50°C dan 55°C. Dapat dijelaskan bahwa ketersediaan *drop wise* dan daya serap *porous media* menunjukkan peningkatan terhadap kenaikan temperatur 45°C, 50°C dan 55°C dapat dibuktikan pada gambar 5. Pada ruang kondensasi yang membuat *drop wise* semakin padat pada dinding kaca ruang kondensasi seiring dengan meningkatnya temperatur. Kemampuan *porous media* arang tempurung

kelapa menyerap kondensat pada temperatur 45°C, 50°C dan 55°C. Mengalami pertambahan ketebalan kondensat seiring dengan kenaikan temperatur. Kemungkinan tingkat penguapan meningkat sebagai fungsi daya serap *porous media* pada peningkatan perbedaan temperatur uap pada tangki humidity yang dialirkan ke ruang kondensasi pada penelitian ini. Dimungkinkan juga sifat dari *porous media* tempurung kelapa yang bersifat hidrofilik θ *contact angle* kurang dari 90° yang menghasilkan kondensat dapat menyerap lebih mudah pada temperatur tinggi pada permukaan *porous media* yaitu dengan sudut *contact angle* yang dimiliki arang tempurung kelapa sebesar 89.92°.

Grashof Number Dan Reynolds Number



Gambar 6. Grafik Grashof Number dan Reynolds Number Aliran Kondensasi.

Secara umum: karakteristik $Gr/Re^2 < 1$ pada semua kondensasi, berarti semua kondensasi pada *porous media* tersebut adalah didalam lingkup konveksi secara paksa [8] ($0 \leq Gr/Re^2 \leq 1$) Tingkat penguapan perbedaan tekanan kurang dari satu untuk konveksi paksa dan lebih besar dari satu untuk rezim konveksi campuran dimana menggunakan persamaan seperti dibawah ini :

$$\frac{Gr}{Re} = \frac{\text{kekuatan konveksi laminer}}{\text{kekuatan konveksi paksa}} \tag{4}$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{\infty}-T_b)D_h^3}{\nu^3} \quad (5)$$

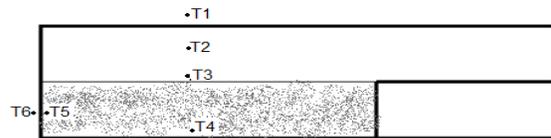
$$Re = \frac{U D_h}{\nu} \quad (6)$$

Berdasarkan data gambar 9. Hubungan antara temperatur terhadap density dan viscosity adalah berbanding terbalik, jika temperatur udara tinggi maka density dan viscosity rendah, hal itu disebabkan ikatan antar molekul udara merenggang akibat dari kenaikan temperatur dan menghasilkan kenaikan pada gambar grafik Gr/Re^2 dalam gambar 6. Gambar grafik diatas menunjukkan Distribusi *Grashof* dan *Reynolds number* meningkat dalam ruang kondensasi dengan temperatur: 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C. Dari gambar grafik dapat terlihat bahwa dengan perbedaan temperatur dalam ruang kondensasi sangat berpengaruh pada besarnya angka *Grashof* number dan angka *Reynolds number*. Angka *Grashof* yang merupakan indikator jenis aliran yang terjadi pada perpindahan panas secara konveksi laminar. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi temperatur laminar terjadi akibat beda temperatur antara titik temperatur yang satu dengan titik temperatur yang lainya didalam ruang kondensasi. Ini dipengaruhi oleh penyerapan yang terjadi pada *porous media* dalam ruang kondensasi. Pada penelitian ini dapat dikatakan penyerapan kondensasi hampir berfungsi optimal seperti terlihat pada gambar 6. Dengan lama waktu pengujian 60 menit per temperatur mampu menyerap kondensat pada ruang kondensasi. Dari grafik tersebut dapat dilihat juga bahwa garis angka *Grashof* dan *Reynolds* Koefisien perpindahan panas konveksi yang merupakan indikator besarnya laju perpindahan panas konveksi, distribusi temperatur dalam ruang kondensasi dengan temperatur yang sudah ditentukan, dalam penelitian ini.

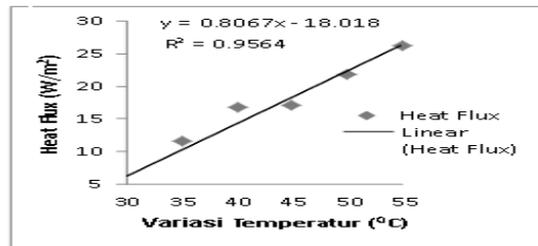
Heat Flux pada Ruang Kondensasi

Ruang kondensasi terbuat dari bahan *polycarbonate* untuk mempermudah dalam pengambilan data karena bahan bisa melihat gerakan pertambahan kondensat dalam *porous media* secara transparan, dan juga material

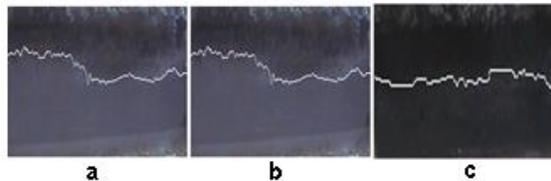
polycarbonate dapat bekerja dengan suhu tinggi. Dengan ditambahkan 6 titik termokopel dalam ruang kondensasi seperti terlihat pada gambar 7. Dimensi seksi uji *heat flux* yang bertujuan untuk mengetahui *heat flux* pada *porous*.



Gambar 7. Dimensi Seksi Uji *Heat Flux*.



Gambar 8. Grafik Hubungan Antara *Heat Flux* T3 -T4 Terhadap Waktu.



Gambar 9. Penyerapan *Porous Media* pada Menit Ke-45 pada Temperatur a. 45°C b. 50°C c. 55°C

Heat flux kondensasi pada *porous media* arang tempurung kelapa difokuskan pada penyerapan panas per satuan luas area pada lapisan *porous media* arang tempurung kelapa. *Heat flux* tersebut merupakan perpindahan panas yang mengalir pada lapisan *porous media* arang tempurung kelapa sebagai akibat pelepasan kalor uap saat menjadi kondensat dengan menggunakan persamaan 7 dibawah ini.

Heat flux yang terjadi disamping akibat pelepasan kalor oleh uap tersebut dan juga dapat terjadi akibat beda temperatur antara uap itu sendiri dengan permukaan paling bawah

porous media arang tempurung kelapa. Sehingga *heat flux* yang melewati lapisan *porous media* merupakan kondensasi kalor laten yang menimbulkan *heat flux* dengan perbedaan temperatur di sisi dalam dan luar ruang kondensasi yang diwakili pada titik T₃-T₄ seperti terlihat pada Gambar 7.

$$q'' = k \frac{T_a - T_b}{L} \tag{7}$$

Keterangan:

k = Konduktivitas Termal

T_a = Temperatur Dinding Luar

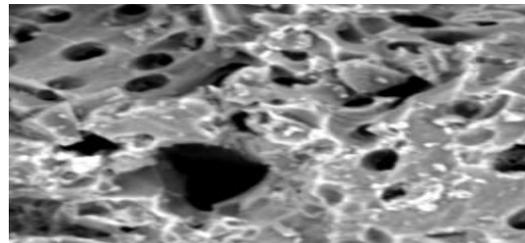
T_b = Temperatur Dinding Dalam

L = Tebal Material *Porous media*

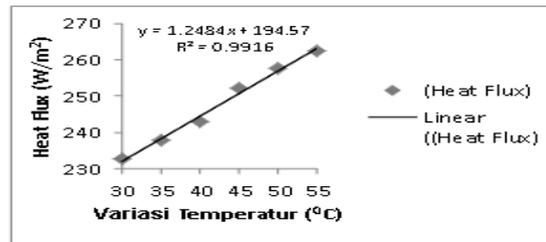
Grafik *heat flux* diatas secara umum rata-rata mengalami peningkatan dari temperatur 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C dan 55°C. Dengan lama waktu kondensasi selama 60 menit. Dapat dilihat pada titik T₃ yang mewakili temperatur pada bagian atas *porous media* arang tempurung kelapa pada ruang kondensasi yang mewakili temperatur dibawah *porous media* didalam ruang kondensasi pada titik T₄. Dimana temperatur T₃ lebih tinggi dibanding temperatur T₄ karena ada tekanan uap dari tangki *humidity* yang berada di depan T₄. Sedangkan T₃ temperturnya lebih rendah karena dibawah T₃ ada aliran air dingin dengan temperatur 10°C Sehingga bagian bawahnya yang menunjukkan adanya kecenderungan menyerap panas melalui *porous media* arang tempurung. Dengan stratifikasi ini, temperatur yang lebih tinggi akan cenderung menempati posisi lebih rendah karena perpindahan panas secara konveksi, sedangkan desitasnya semakin tinggi temperatur akan semakin kecil, karena turunnya tekanan uap dari tangki *humidity* hingga lebih rendah dari tekanan udara luar dalam ruang kondensasi ini berarti pengaruh terhadap *heat flux* pada T₃ dan T₄, dikarenakan titik T₃ menjadi dominan terhadap tingginya temperatur kondensasi. Sehingga grafik diatas menunjukkan semakin bertambahnya temperatur akan meningkatkan nilai *heat flux*. Hal ini menunjukkan bahwa aliran

uap bisa dikatakan telah terkondensasi semua. Dari pengamatan visual juga dapat dilihat pada gambar 9. Adanya penambahan aliran kondensat seiring bertambahnya temperatur 45°C; 50°C; 55°C. dengan jalan aliran kondensat melewati *porous media* arang tempurung kelapa.

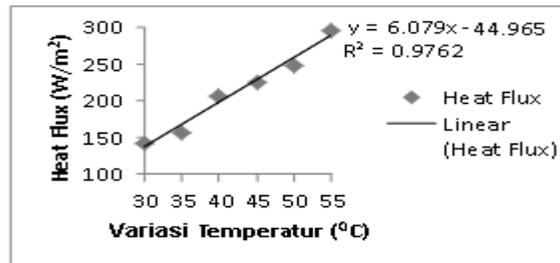
Dikarenakan morfologi dari hasil foto SEM terlihat tidak seragam, memiliki diameter *porous media* yang tidak seragam yang bisa digunakan untuk menyebarkan kondensat. dalam ruang kondensasi.



Gambar 10. Foto SEM arang Kelapa 6000x perbesaran.



Gambar 11. Grafik Heat Flux T₂-T₃.

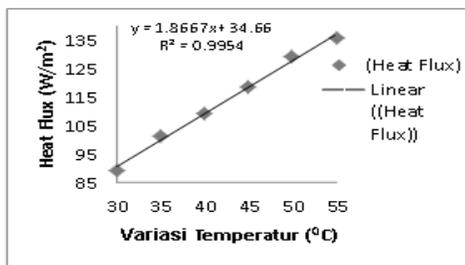


Gambar 12. Grafik Heat Flux T₂-T₁.

Gambar grafik 11. *Heat flux* pada temperatur titik T₂ dan T₃ di dalam ruang kondensasi, dengan variasi temperatur 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C dan 55°C. Setelah

dilakukan penelitian dalam berbagai temperatur *Heat flux* yang dihasilkan terus meningkat seiring dengan bertambahnya variasi temperatur yang sudah diset dalam tangki *humidity*, dari hasil pengamatan visualisasi dengan bertambahnya nilai *heat flux* makin menjadi tebal lapisan kondensat, karena penyerapan yang sudah dilakukan *porous media* arang tempurung kelapa, karena *heat flux* yang terjadi pada titik T₂ dan T₃ sudah dialiri oleh uap pada permukaan *porous media* yang mengalami perubahan fase uap menjadi air.

Gambar grafik 12 Secara umum mengalami kenaikan nilai *Heat Flux* dalam ruang kondensasi, kenaikan pada menit pertama sampai menit ke-60. ini dikarenakan adanya temperatur udara dalam ruang kondensasi yang keluar ruang kondensasi dikarenakan temperatur letak pada titik T₁ lebih rendah dibandingkan dengan titik T₂. Yang mengakibatkan titik T₂ dominan terserap oleh *porous media* arang tempurung kelapa. Seperti terlihat pada gambar 5 dan 6 dimana letak T₁ yang berada diatas ruang kondensasi atau berada pada dinding terluar pada ruang kondensasi, sedangkan T₂ berada didalam ruang kondensasi. Yang menyebabkan perbedaan temperatur, oleh karena itu perpindahan panas konduksi berpengaruh terhadap *heat flux* yang dihasilkan dalam penelitian ini. Dikarenakan temperatur yang tinggi mengisi temperatur yang lebih rendah yang berada pada luar ruang kondensasi yang dibatasi dengan kaca seperti pada penelitian ini pada titik T₂ –T₁.



Gambar 13. Grafik *Heat Flux* T₅-T₆.

Kenaikan beberpa variasi temperatur pada gambar 13. Pengaruh dari perpindahan panas

secara konveksi paksa akan meningkatkan nilai *Heat Flux* seiring dengan meningkatnya Temperatur yang sudah ditentukan di tangki *humidity*, yang akan menyebabkan bertambahnya ketebalan lapisan kondensat didalam *porous media* arang tempurung kelapa yang akan bertambah dari paling belakang menuju ke depan ruang kondensasi dan juga beberapa temperatur udara luar yang mengalir kedalam ruang kondensasi. Dikarenakan temperatur titik T₅ yang lebih kecil dari pada titik T₆ yang berada diluar ruang kondensasi.

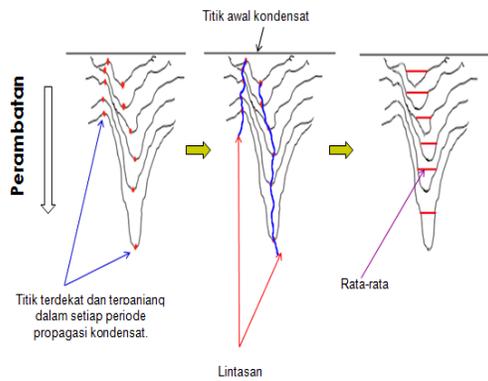
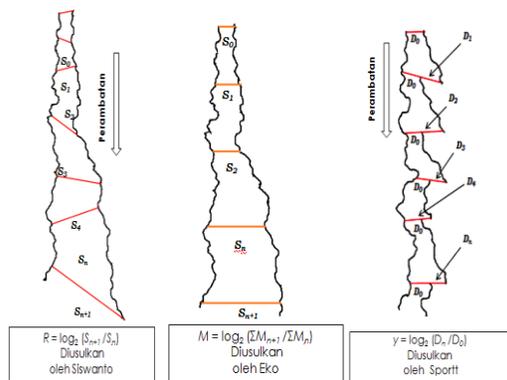
Dinamika Propagasi Aliran

Merupakan dinamika berpindahan kondensat yang disebabkan oleh propagasi perpindahan dalam *porous media* arang tempurung kelapa, yaitu pergerakan kondensat yang meresap kedalam *porous media* arang tempurung kelapa.

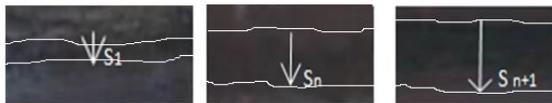
Oleh karena itu penting untuk mengklasifikasikan *propagasi* untuk memperoleh karakteristik arang tempurung kelapa dan aliran fluida di dalam ruang kondensasi. Untuk mengklasifikasi dinamika *propagasi* kondensat ke dalam *porous media* digunakan *eksponen Lyapunov*, untuk memperoleh informasi dinamika dengan menggunakan pertambahan jarak, antara titik terpanjang dan titik terdekat dari bertambahnya kondensat, dalam menghitung lintasan *eksponen Lyapunov* ada beberapa lintasan virtual pada setiap perambatan kondensat diantaranya yang digunakan dalam penelitian ini, yang diusulkan oleh Sprott [9] dan Siswanto [10] seperti pada gambar 14.

Dari gambar diatas seri *eksponen Lyapunov* akan selalu bernilai positif karena tidak terulang kembali, seri *eksponen Lyapunov* R_n, seperti yang disebutkan dalam penelitian Siswanto, di mana ia mendefinisikan, *propagasi* terpanjang kondensat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_n = \log_2 (S_{n+1} / S_n) \tag{8}$$



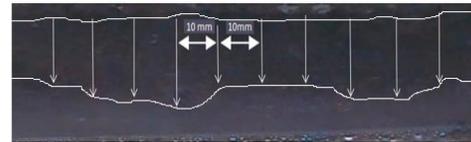
Gambar 14. Lintasan kondensat.



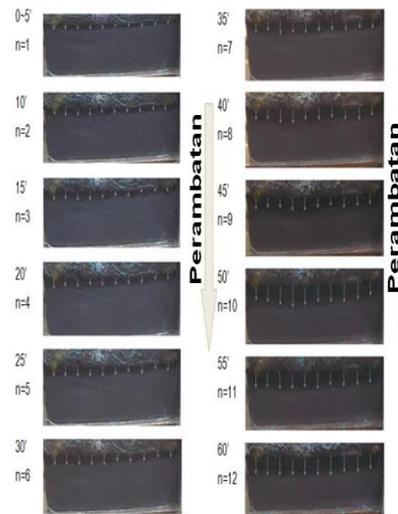
Gambar 15. Rambatan Kondensat Pada Porous Media Arang Tempurung Kelapa.

Dalam penelitian ini M berarti kondensat merambat sampai titik terpanjang (S_{n+1}) yang digerakkan dari dua titik yang berbeda seperti pada gambar 15. Jika $M < 0$ maka lintasan akan konvergen secara eksponensial, sedangkan jika $M > 0$ maka lintasan akan divergen secara eksponensial. Dengan menggunakan pertumbuhan jarak dan jangka waktu yang sudah ditentukan yaitu per 5 menit selama 60 menit dalam penelitian ini, M dapat membedakan antara periodicity dan nonperiodicity dari propagasi. Dengan distribusi dinamika memiliki hubungan langsung dengan kapasitas kondensat. Setelah itu distribusi

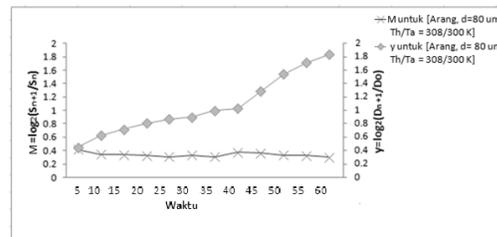
dinamika yang tergantung pada perpindahan aliran kondensat melalui porous media arang tempurung kelapa, akan dibagi 10 bagian per 10mm dalam ruang kondensasi seperti pada gambar 16.



Gambar 16 Panjang Propagasi Pada Porous Media Arang Tempurung Kelapa Per-10 mm.



Gambar 17. Panjang Propagasi Kondensat Arang Tempurung Kelapa.



Gambar 18. Grafik Perbandingan M Series Dan Y Series Berdasarkan propagasi Penyerapan Terpanjang pada Arang Tempurung Kelapa $T_h/T_a = 308/300 K$, $d = 80 \mu m$. Secara umum pada gambar grafik 18. Diatas mengalami kenaikan propagasi

penyerapan kondensat perbandingan M series dan Y series dari mulai pertama penyerapan kondensat pada *porous media* sampai pada menit ke-60. Pengamatan pada *propagasi* sampai dengan titik terpanjang pada *porous media* pada seri M rata-rata *eksponen Lyapunov* dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$M = \log_2(\Sigma S_{n+1} / \Sigma S_n) \tag{9}$$

Selain itu, *eksponen Lyapunov* didasarkan pada pemisahan jarak awal yang diamati. Jika y adalah ekponen Lyapunov - eksponen yang menggunakan persamaan dari Sprott sebagai berikut :

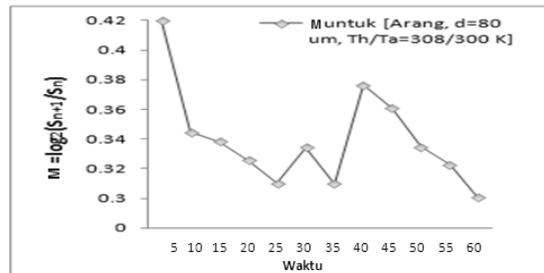
$$y = \log_2 (D_n / D_0) \tag{10}$$

pada persamaan diatas didapatkan grafik R series dan Y series terhadap waktu 60 menit yang diambil nilai rata-rata per 5 menit sekali. Pada hasil grafik yang ada diatas didapat *propagasi* periodik - dominan atau *propagasi* seragam yaitu dengan bertambahnya waktu bertambah juga kondensat dalam *porous media* arang tempurung kelapa, informasi lebih lanjut dinamika dapat diperoleh:

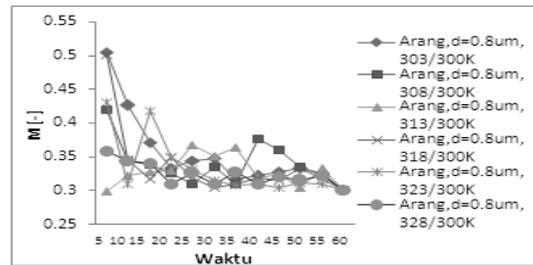
- M = positif, dua titik berbeda, (un-periodik *propagasi*)
- M = negatif, dua titik konvergen, (un-periodik *propagasi*)
- M = 0, dua poin kuasi-statis, atau *harmonik*, (*propagasi* periodik)
- M ≠ 0 ada pengulangan pada titik sebelumnya, (*propagasi* periodik)
- M ≠ 0 tidak pernah terulang pada titik sebelumnya (atau salah satu titik) adalah *Chaos*.

Dapat dijelaskan pada gambar grafik 19. Dalam waktu 60 menit pengambilan data ketebalan kondensat per-5 menit sekali di dalam ruang kondensasi. Grafik diatas merupakan susunan secara acak atau tidak teratur dan hampir tidak ada pengulangan dari setiap *attractor*, yang merupakan bertambahnya ketebalan kondensat yang tidak sama seperti

sebelumnya secara statistik bisa dinyatakan sebuah *chaos*. Dalam penelitian ini, penyebab dari *chaos* dikarenakan pengaruh udara luar yang mencoba masuk kedalam ruang kondensasi, sehingga dengan bertambahnya tebal kondensat tidak pernah sama atau tidak *harmonic* karena temperatur diluar ruang kondensasi selalu berubah-ubah terbukti dari *heat flux* diatas yang hasilnya secara acak.



Gambar 19. Grafik Perbandingan M Series Berdasarkan *Propagasi* Penyerapan Terpanjang pada Arang Tempurung Kelapa $Th/Ta = 308/300 K, d= 80 \mu m$.



Gambar 20. Grafik Mn Arang Tempurung Kelapa, $d=80\mu m, Th/Ta$.

Secara umum kenaikan temperatur pada Mn terhadap waktu per-5 menit selama 60 menit mengalami rata-rata penurunan, dalam hal ini kemungkinan terjadi *propagasi* didalam *porous media* arang tempurung kelapa. Tetapi studi eksperimental ini menyebabkan aliran *propagasi* seragam dan tidak seragam. Dalam *propagasi* ini berhubungan dengan ketebalan kondensat, fenomena ini memang tidak terduga. Karena dinamika *propagasi* aliran disebabkan oleh *eksponen Lyapunov* yang dapat ditunjukkan oleh Mn, yang dapat

mengevaluasi secara langsung dan memberikan lebih banyak informasi dinamika *propagasi* dalam setiap siklus kondensat yang terjadi didalam *porous media* arang tempurung kelapa.

Secara khusus grafik diatas memiliki karakter kondensat tidak dapat diprediksi karena (\neq) kondensat ini bersifat tidak stabil atau *chaos* dan memiliki nilai eksponen Lyapunov yang berubah - ubah menyebabkan kekacauan (*chaos*) pada kondensat, berdasarkan fenomena yang ada, ini dikarenakan tidak berulang kembali angka bertambahnya ketebalan kondensat. Hal ini seperti terlihat pada gambar 20.

Tabel 1. Daerah Dinamika *Propagasi* aliran

Partikel	T_H/T_a	Region
Arang	303/300	Chaos
Tempurung	308/300	Chaos
Kelapa 80	313/300	Chaos
μm	318/300	Chaos
	323/300	Chaos
	328/300	Chaos

Dalam studi eksperimental ini membuktikan bahwa aliran yang diamati, dari hasil pengujian kondensasi yang berbentuk tabel diatas dapat memberikan informasi, bahwa semua variasi dalam penelitian ini masuk dalam daerah *chaos*, dikarenakan dinamika *propagasi* acak memang berhubungan langsung dengan pertambahan kondensat yang tak terduga dengan mengevaluasi secara langsung dan memberikan lebih banyak dinamika informasi pada setiap variasi temperatur dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Dari studi eksperimental ini, berdasarkan hasil penelitian ini, karakteristik dari *porous media* arang tempurung kelapa dari fenomena heat flux dan aliran kondensat pada ruang kondensasi dapat disimpulkan.

- Konduktivitas termal dari pada *porous media* dan uap dengan variasi peningkatan temperatur pada ruang kondensasi

meningkatkan konduktifitas termal efektif dengan fenomena ketebalan kondensat bertambah.

- *Heat flux* yang ada dalam ruang kondensasi diantara 6 titik temperatur menghasilkan peningkatan dengan bertambahnya temperatur, dengan hasil *heat flux* tertinggi pada titik T2 dan T1 dibandingkan dengan titik temperatur lainnya.
- K_{eff} terhadap waktu pada variasi temperatur meningkatkan vapor yang terserap oleh *porous media* arang tempurung kelapa meningkat dikarenakan *contact angle* kurang dari 90° yang menyebabkan kondensat dapat menyebar lebih mudah pada permukaan *porous media* arang.
- *Eksponen Lyapunov* dapat memberikan informasi yang terjadi mengenai dinamika aliran pada *porous media* arang tempurung kelapa dalam penelitian ini.

SARAN

Kondensasi merupakan persoalan yang kompleks dan rumit. Oleh karena itu masalah kondensasi tidak bisa dipecahkan dengan mudah perlu adanya metode yang menganalisa tentang kekacauan gerakan yang disebabkan oleh kondensat seperti *Eksponen Lyapunov*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Hermana Joni dan Boedisantoso Rachman, 2010, *Kondensasi*, Buku Ajar softcopy file. Surabaya.

[2] Wang, S. C., Yang, Y. T. and Chen, C. K., 2003, "Effect of uniform suction on laminar filmwise condensation on a finite-size horizontal flat surface in a porous medium", *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, Vol. 46, 4003-4011.

[3] Balasubramaniam, Ravi, Nayagam, V., Mahmud, Hasan and Khan, L., 2006, "Analysis of heat and mass transfer during condensation over a porous substrate," *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, Vol. 1077,459-470.

[4] Anonim dan Departemen Perindustrian, 1983, *Prototipe Alat Pembuatan Arang*

- Aktif dan Asap Cair Tempurung*, Badan Penelitian dan Pengembangan Industri.
- [5] Sembiring dan Sinaga, 2003, *Arang Aktif, Pengenalan dan Proses Pembuatannya*, USU Digital Library.
- [6] Siswanto, Eko, Yasuo. Katoh and Hiroshi Katsurayama, 2010, "Forced laminar convective condensation in porous media", *Proc. 47th National Heat Transfer Symp.*, Japan., 135-136.
- [7] Katoh, Y., Yamaguchi, S. and Kurima, J., 2007, "A study on condensation phenomena on a horizontal cooled flat plate in a porous medium," *Transl. Japan, The JSME.*, Vol. 45, 241-242.
- [8] Jodat. A. and Moghiman. M., 2011, "An experimental assessment of the evaporation correlations for natural, forced and combined convection regimes" *Journal of Mechanical Engineering Science.*, 226:145
- [9] Sprott J. C., 1993, "Automatic generation of strange attractors," *Chaos & Graphics*, Vol. 17, No. 3, 325-332.
- [10] Siswanto, Eko, Hiroshi, Katsurayama and Yasuo, Katoh, 2011, "Instability on condensate propagation in porous media" *International Journal of Mechanics.*, Japan. Vol.5, No.4.