

Fluks Termal pada Kondensasi dalam Porous Media dengan Mempertimbangkan Temperatur Sekitar

Eko Siswanto

Fakultas Teknik, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167, Malang, 65145
E-mail : eko_s112@ub.ac.id

Abstrak

Penggalian informasi yang lebih lengkap tentang fluks termal dan pengaruhnya pada pengekstrasi moist dalam proses kondensasi, guna pengendalian kelembaban udara pada sistem fuel cell, merupakan salah satu kebutuhan yang mendasar. Oleh sebab kemampuan dalam mengekstraksi moist dari udara menjadi fasa cair, dalam memisahkan fasa cair dan fasa gas secara sederhana, dan dalam memindahkan panas sekaligus massa, maka porous media menjadi material yang penting untuk tugas tersebut. Oleh karena alasan diatas, maka dengan menggunakan dua tipe porous media yang memiliki beda konduktivitas termal serta mempertimbangkan pengaruh dari temperatur sekitar, maka studi eksperimen pada kondensasi ini ditujukan untuk mengobservasi fluks termal serta pengaruhnya terhadap perpindahan panas dan perpindahan massa dalam porous media layer beserta kondensat yang terjadi.

Observasi ini dilakukan dengan cara mengalirkan udara laminar yang tervaporasi air diatas permukaan porous media layer. Porous media tersebut dari bahan glass beads dan alumina balls yang ditempatkan dalam condensation chamber, dimana bagian luar chamber tersebut dilingkupi oleh udara sekitar yang temperaturnya divariasikan. Udara yang tervaporasi air, yang juga memiliki variasi temperatur tersebut, dihembuskan secara tangensial pada permukaan atas porous media layer. Sementara, temperatur permukaan bawah porous media layer dijaga pada sebuah nilai yang konstan. Selanjutnya, temperatur udara sekitar diluar condensation chamber dibuat bervariasi untuk dipakai sebagai treatment pada kondensasi yang terjadi didalam chamber tersebut. Sebagai treatment-I, temperatur sekitar dijaga pada nilai tetap sedemikian hingga rasio antara temperatur udara-vapor (yang bervariasi tiap observasi) dan temperatur sekitar pada tiap-tiap observasi tidak berharga satu. Sebaliknya, untuk treatment-II, kenaikan temperatur udara-vapor pada tiap-tiap observasi dibarengi dengan kenaikan temperatur udara sekitar sedemikian hingga rasio antara temperatur udara vapor dan temperatur udara sekitar terjaga tetap bernilai satu.

Pada studi ini dapat disimpulkan bahwa fluks termal pada permukaan porous media layer dapat mempengaruhi produk kondensasi, sedangkan kenaikan air hasil kondensasi didalam porous media layer tersebut justru dapat menyebabkan penurunan fluks termal yang hilang saat proses kondensasi berlangsung. Akibat penurunan fluks termal saat proses tersebut, maka dapat diketahui bahwa produk kondensasi didalam porous media layer dapat mengakibatkan ke-taksteady-an heat transfer pada porous layer tersebut.

Keywords: fluks termal, kondensasi, glass beads, alumina balls, temperatur sekitar

1 Pendahuluan

Untuk pemahaman yang lebih baik dan guna pengoptimalan komponen-komponen heat transfer dan ekstraksi fase liquid dari udara tervaporasi, maka studi eksperimen yang ditujukan untuk mengeksplorasi karakteristik kondensasi yang terjadi pada porous media menjadi sebuah kebutuhan penting. Study kondensasi ini dilakukan pada porous glass-beads dan porous alumina-balls media, pada konveksi laminar, yang dilingkupi oleh udara ambient dengan variasi temperatur.

Setelah batasan perpindahan panas konveksi paksa dan konveksi bebas pada lapisan batas laminar dapat dipisahkan secara analitis [1], maka laju pindah panas pada kondensasi pada lapisan film laminar

pada muka-bawah pada plat horizontal kemudian dilakukan secara eksperimen [2]. Berikutnya, masih tanpa menggunakan porous media, kasus kondensasi laminar pada muka-atas plat horizontal juga telah dilakukan [3]. Study analitis kondensasi tersebut dilakukan diatas plat berlubang-lubang, i.e. perforated plate, baik dengan maupun tanpa efek tarikan vakum dari bawah. Selanjutnya, study analitis yang lebih komprehensip tentang hubungan antara transport panas dan transport massa didalam proses kondensasi udara-moist juga telah dilakukan [4]. Study tersebut menggunakan uap jenuh yang dialirkan secara tangensial diatas permukaan plat rata. Study ini menperhitungkan fluks panas total dari campuran uap-udara yang didasarkan pada kombinasi

baik perpindahan panas konveksi dan perpindahan panas akibat perubahan fasa. Kemudian, formulasi dari fluks termal berikut parameter-parameter yang berhubungan disusun dan diusulkan bahwa formulasi tersebut dapat diaplikasikan baik pada aliran laminar maupun turbulen dari uap-udara.

Pada kasus porous media, study kondensasi pada aliran laminar diatas permukaan datar telah dilakukan secara analitis [5]. Selanjutnya, dikembangkan dari study tersebut, investigasi pada kondensasi film laminar diatas plat horizontal dibawah porous media telah dianalisis [6]. Investigasi-investigasi tersebut telah mengekspresikan tebal lapisan liquid pada dasar porous media. Akan tetapi, investigasi tersebut dilakukan pada plat horizontal tanpa pembatas tepi dalam menampung produk condensate, sehingga kondensate akan segera lepas dari penampungan tersebut saat melebihi batas tampungnya.

Kondensasi pada porous media didalam chamber, i.e. plat horizontal dengan pembatas tepi, dibawah aliran laminar uap-udara telah diinvestigasi [7,8]. Eksperimen ini mengekstrak kondensate dari campuran uap-udara dengan tujuan pengendalian kelembaban pada system fuel-cell. Pada eksperimen ini, kondensate yang terekstrak didalam porous media diukur dengan menggunakan metode needle-probe. Kemudian, metode tersebut diperbaiki [9] dengan metode visualisasi. Seluruh investigasi diatas telah dianalisa secara memadai, namun demikian, investigasi-investigasi tersebut masih dilakukan dengan mengabaikan pengaruh temperatur udara sekitar.

Study kondensasi pada penelitian kali ini ditujukan untuk memperbaiki eksperimen sebelumnya [7,8,9] dengan melingkupi chamber kondensasi dengan udara ambient, dengan variasi temperatur.

2 Metoda dan Fasilitas yang Digunakan

Pada study ini, secara skematis ditunjukkan pada gambar-1, porous media terletak didalam chamber kondensasi 20 mm x 20 mm x 240 mm yang transparan. Property dari glass beads dan alumina balls ditunjukkan pada tabel-1. Sedangkan porositas kedua media tersebut, berdasarkan pengujian, adalah sebesar 38%.

Tabel 1 Property partikel porous media

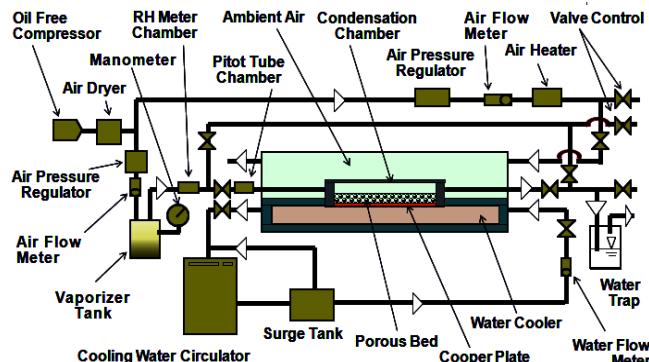
Particle (name)	Average particle diameter [mm]	Density [g/cm ³]	Thermal conductivity [W/m ⁰ K]	Material
Glass beads	1.0	2.60	1.035	Soda glass
Alumina balls	1.0	3.61	18.84	Al ₂ O ₃ : 94.5% SiO ₂ : 5.5%

Plat tembaga dipasang dibawah lapisan porous media sebagai pengalir panas dari porous media ke air

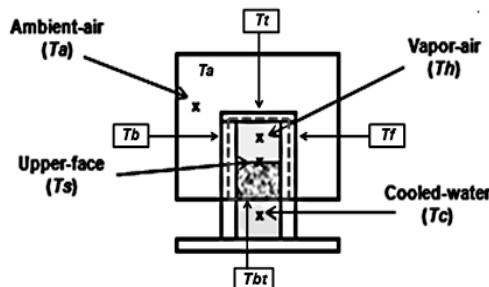
pendingin. Temperatur uap-udara yang dialirkan pada muka-atas porous media masing-masing, 35, 40, 45, 50, and 55 °C dengan kelembaban relative 99 RH%.

Terhadap chamber-kondensasi, dua perlakuan temperatur udara diberikan. Untuk perlakuan pertama, temperatur udara ambient dijaga pada nilai konstan pada $T_a=35$ °C. Sedangkan yang kedua, rasio temperatur udara ambient terhadap temperatur uap-udara dipertahankan tetap pada $T_a/T_h=1$.

Pada saluran uap-udara, udara terkompresi dihembuskan kedalam vaporizer tank. Sedangkan pada saluran udara-ambien, udara terkompresi 0.175 MPa dengan kapasitas 40 liter/minute dijaga temperaturnya dengan dengan air-heater. Valve-controls dipakai untuk mengeluarkan gas keadaan transien sebelum mulai observasi, dan untuk menjamin uap-udara dan udara-ambient dalam keadaan stabil. Water-trap tank disediakan untuk menurunkan efek perubahan tiba-tiba, i.e. tekanan dan temperatur, saat system saluran kontak dengan udara atmosfir. Untuk menjaga temperatur plat tembaga, air 750 CCM pada $T_c=10$ °C disirkulasikan dengan paket water-cooler yang dilengkapi dengan surge tank. Perilaku kondensate yang terekstrak, dipantau oleh kamera video selama 60 menit, dari chamber kondensasi yang transparan.



Gambar 1. Skema apparatus eksperimen

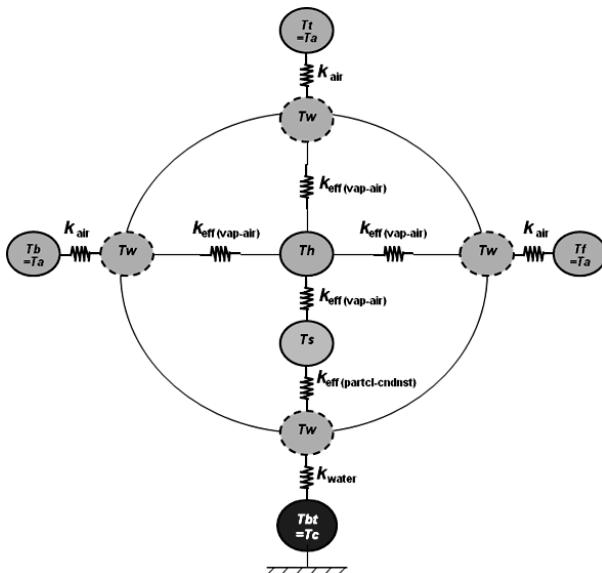


Gambar 2. Titik-titik ukur temperatur kondensasi pada porous media didalam duct

Agar dapat mengkonfirmasi aliran panas didalam chamber kondensasi, maka penting untuk ditunjukkan hubungan antar titik-titik temperatur didalam system tersebut. Kondensasi yang terjadi pada porous media yang terletak didalam chamber tersebut dapat pula

dipandang sebagai kondensasi pada porous media yang terletak didalam sebuah duct. Gambar-2 menunjukkan titik-titik ukur temperature didalam duct, dari pandangan melintang. Selanjutnya, hubungan titik-titik temperature tersebut disajikan pada gambar-3.

Symbol T_h adalah untuk temperature uap-udara, dan itu berarti T_h adalah heat source pada system. Temperature air pendingin T_c dijaga tetap konstan pada 10°C , sehingga T_c adalah heat sink pada system. Selanjutnya, udara-ambien T_a , dapat dianggap sebagai isolator system kondensasi terhadap atmosfir. Anggapan itu berlaku pada treat-II, karena temperature ambien T_a memiliki nilai yang sama dengan temperature uap-udara T_h , i.e. $T_a/T_h=1$. Sebaliknya, temperature-ambien T_a dapat dipandang sebagai heat sink pada system kondensasi pada treat-I, dikarenakan temperatur ambient T_a memiliki nilai yang lebih kecil dari temperatur uap-udara T_h .



Gambar 3. Hubungan titik-titik ukur temperatur

Untuk mengetahui pengaruh treat-I dan treat-II secara terpisah, study ini menggunakan mean duct-walls temperature T_w , dimana T_w adalah nilai rerata dari temperature dinding-dinding duct. Pada temperature dinding-dinding, masing-masing T_f , T_t , T_b , dan T_{bt} merujuk pada temperature front-, top-, back- dan bottom- dari duct. Untuk T_f , T_t , T_b , dikarenakan bersentuhan langsung dengan temperatur ambien T_a , maka dapat temperatur-temperatur tersebut dapat dianggap sama dengan temperatur ambien T_a . Selanjutnya, T_s adalah temperatur permukaan dari porous bed, dimana aliran panas yang melalui porous media terlebih dulu menembus area permukaan tersebut.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondensasi uap

Jika diberikan panas latent dari uap yang terkondensasi, maka tinggi nilai Jacob number J mewakili besarnya jumlah uap yang terkondensasi pada permukaan dinding-dinding. Jacob number J dalam study ini didefinisikan sebagai,

$$J = Cp_1 (T_h - T_w) / L \quad (1)$$

Selanjutnya, dimensionless temperature Ω yang dapat memisahkan efek kedua treatment terhadap Jacob number didefinisikan pada persamaan (2). Dimensionless temperature Ω ini adalah rasio beda temperatur uap-udara dan permukaan media (T_h-T_s) terhadap beda temperatur antara uap-udara dan mean walls (T_h-T_w).

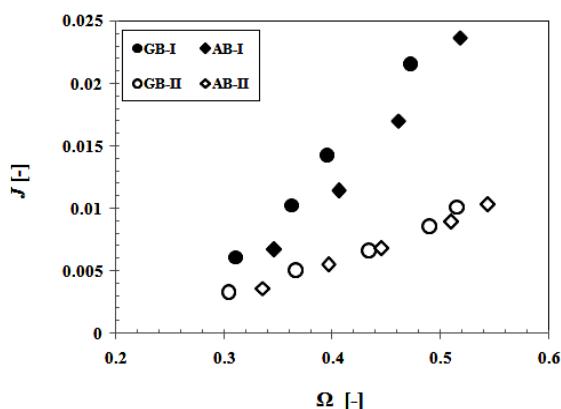
$$\Omega = (T_h - T_s) / (T_h - T_w) \quad (2)$$

Dimensionless temperature Ω tersebut juga dapat mewakili rasio sensible heat fluxes dari vapor yang melalui porous-surface terhadap (mean) walls-surface.

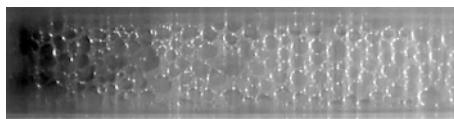
Hubungan antara Jacob number J dan rasio heat-fluxes tersebut dapat dilihat pada gambar-4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pada type media yang sama, treat-I dapat menghasilkan vapor terkondensasi yang lebih besar daripada treat-II. Situasi tersebut disebabkan treat-I meningkatkan suku $(T_h - T_w)$ dari Jacob number. Peningkatan $(T_h - T_w)$ ini karena temperatur ambien T_a pada treat-I memiliki nilai yang lebih kecil dibanding T_a pada treat-II.

Perbedaan hasil yang disebabkan oleh kedua treatment tersebut juga didukung melalui bukti pada gambar-5 dan 6, dimana treat-I menghasilkan banyak dropwise pada dinding atas condensation chamber (gambar-5), sementara treat-II menunjukkan hampir tanpa dropwise (gambar-6).

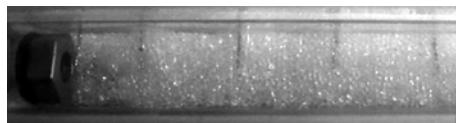
Pada gambar-4 juga dapat diperoleh informasi bahwa pada kedua treatment, media alumina balls (AB) dapat menghasilkan lebih banyak vapor-terkondensasi daripada media glass beads (GB). Kondisi ini disebabkan alumina balls memiliki lebih besar nilai $(T_h - T_s)$ daripada media glass beads. Alasan kondisi ini terjadi adalah karena konduktivitas thermal alumina balls lebih besar daripada konduktivitas thermal glass beads.



Gambar 4. hubungan Jacob number J dan dimensionless temperature Ω



Gambar 5. Tinggi jumlah dropwise pada dinding atas chamber, pada GB dibawah $T_h=55^\circ\text{C}$ (I)



Gambar 6. Hampir tanpa dropwise pada dinding atas chamber, pada GB dibawah $T_h=55^\circ\text{C}$ (II)

3.2 Fluks termal pada interface

Berdasar persamaan analitik yang diusulkan pada [4] untuk kondensasi pada permukaan horizontal dengan mempertimbangkan perubahan fasa dan hubungan perpindahan panas dan perpindahan massa, maka rasio fluks termal yang dikonsumsi oleh vapor terkondensasi q_j terhadap total fluks termal yang melalui interface Q_w , dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$q_j/Q_w = Le^n b_{ld} K / (1 + Le^n b_{ld} K) \quad (3)$$

Pada study ini, rasio fluks termal dari eksperimen dinotasikan sebagai $[q_j^\# / Q_w^\#]$. Kemudian, dengan menggunakan rasio fluks termal eksperimen dan juga rasio fluks termal analitik (q_j/Q_w) tersebut, akan memberikan sebuah nilai F . Nilai F tersebut mendefinisikan rasio fluks termal eksperimen $[q_j^\# / Q_w^\#]$ terhadap rasio fluks termal analitik (q_j/Q_w) , yaitu :

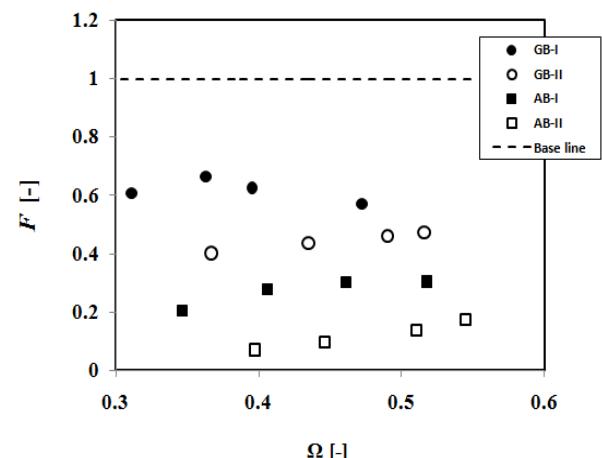
$$F = [q_j^\# / Q_w^\#] / (q_j/Q_w) \quad (4)$$

Dan sebagai hasilnya disajikan pada gambar-7. Sebagai base-line dari F , yang diperoleh dari asumsi

bahwa nilai observasi $[q_j^\# / Q_w^\#]$ sama dengan nilai analitik (q_j/Q_w) dari [4]. Tergambarkan, dari gambar-7, keberadaan porous media secara umum membuat nilai F lebih rendah daripada (ideal) baseline.

Dapat dilihat bahwa nilai F untuk uap-udara memiliki nilai tertinggi. Kemudian secara berturut-turut untuk nilai-nilai yang lebih rendah adalah dimiliki $F_{GB-I} > F_{GB-II} > F_{AB-I} > F_{AB-II}$. Nilai-nilai F tersebut dipengaruhi oleh effective thermal conductivity k_{eff} . Itu dapat diterangkan bahwa suku $[q_j^\# / Q_w^\#]$ tergantung pada $Q_w^\#$, sedangkan nilai $Q_w^\#$ adalah fungsi dari $q_c^\#$, dan nilai $q_c^\#$ tergantung pada nilai k_{eff} .

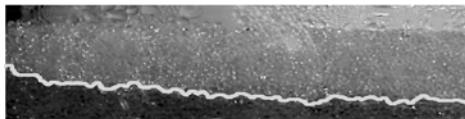
Untuk nilai k_{eff} , dapat dicatat bahwa k_{eff} dari uap-udara, i.e. k_{eff} (vap-air), memiliki harga terkecil dari k_{eff} yang lain. Untuk k_{eff} dapat dituliskan secara berturut-turut sebagai $k_{eff(GB-I)} < k_{eff(GB-II)} < k_{eff(AB-I)} < k_{eff(AB-II)}$. Itu dikarenakan nilai k_{eff} tergantung hanya pada tebal lapisan kondensat δ didalam porous media, oleh karena itu, produk kondensat berdampak mempengaruhi aliran panas yang terjadi. Berdasar alasan tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa meningkatnya produk kondensat δ didalam porous media menyebabkan meningkatnya pula resistansi pada hilangnya fluks termal, saat proses kondensasi berlangsung. Perubahan hilangnya fluks termal karena berangsur-angsur meningkatnya tebal lapisan kondensat didalam porous media menyebabkan aliran panas melalui porous media, dari muka-atas menuju dasar, juga berubah terhadap waktu selama proses. Oleh karena itu, perpindahan panas yang melewati porous media berubah terhadap waktu, atau un-steady.



Gambar 7. Nilai F dan dimensionless temperature Ω

Jika diberikan nilai vapor-terkondensasi hasil observasi, i.e. yang terwakili oleh $q_j^\#$, semakin tinggi nilai F dapat diartikan semakin rendah heat loss melalui muka atas porous media. Didalam proses kondensasi semakin kecil heat loss berarti semakin kecil pula energy yang dibutuhkan didalam

mengkondensikan vapor. Sehingga, prosesnya akan lebih efisien. Sehingga, gambar-7 menunjukkan efisiensi tertinggi dalam memproduksi kondensat, i.e. nilai F tertinggi, terjadi pada media glass beads dibawah treat-I.



Gambar 8. Tebal lapisan kondensat δ dalam GB (I)

Kesimpulan

- Berdasar diskusi diatas, hasil utama dari study kali ini dapat disimpulkan sebagai berikut,
1. Peningkatan bertahap produk kondensat didalam porous media akan meningkatkan resistansi terhadap hilangnya fluks termal saat proses kondensasi. Itu mengakibatkan perpindahan panas yang melalui porous media menjadi un-steady.
 2. Berdasar pada termal fluks yang terkonsumsi oleh vapor yang terkondensasi ($q_j^{\#}$), study kali ini menemukan bahwa efisiensi kondensasi yang tertinggi ada pada media glass beads dibawah treat-I.

Ucapan Terima kasih

Terimakasih ditujukan kepada Maizul Majeed, Ryuichi Nagata, dan Takahiro Taguma atas segala bantuan berharganya.

Nomenklatur

A_p	: Area interface	$[m^2]$
b_{ld}	: Parameter difusi vapor	$[-]$
Cp_l	: Kapasitas panas kondensat	$[J/kg \cdot K]$
F	: Rasio fluks termal observasi dengan- dan tanpa-porous media $= [q_j^{\#}/Q_w^{\#}] / (q_j/Q_w)$	$[-]$
J	: Jacob number	$[-]$
k_{eff}	: Overal konduktivitas termal lapisan porous media $= k' k'' z / [k'' \delta + k'(1-\delta)]$	$[W/m \cdot K]$
k'	: Konduktivitas termal efektif porous media dengan condensate-void	$[W/m \cdot K]$
k''	: Konduktivitas termal efektif porous media dengan air-void	$[W/m \cdot K]$
K	: Kutaleladze number	$[-]$
\dot{m}	: Laju aliran massa	$[kg/s]$
L	: Panas latent kondensasi	$[J/kg]$
Le	: Lewis number	$[-]$
n	: Index untuk regime aliran	$[-]$
q_c	: Fluks termal yang disupplai oleh vapor ke interface	$[W/m^2]$
q_j	: Fluks termal yang terkonsumsi oleh vapor terkondensasi	$[W/m^2]$

Q_w	: Fluks termal total yang melewati interface $= q_c + q_j$	$[W/m^2]$
(q_j/Q_w)	: Rasio fluks termal analitik $= Le_{n_{ld}}^n b_{ld} K / (1 + Le_{n_{ld}}^n b_{ld} K)$	$[-]$
$q_c^{\#}$: Fluks termal akibat beda temperature di porous bed $= k_{eff} (T_s - T_w) / z$	$[W/m^2]$
$q_j^{\#}$: Fluks termal akibat vapor terkondensasi $= \dot{m} L / A_p$	$[W/m^2]$
$Q_w^{\#}$: overall fluks termal melalui upper face $= q_j^{\#} + q_c^{\#}$	$[W/m^2]$
$[q_j^{\#}/Q_w^{\#}]$: Rasio fluks termal observasi	$[-]$
T_a	: Temperature udara ambien	$[^{\circ}C]$
$T_{bt,f,b,t}$: Temperature bottom-, front-, back-, and top- chamber kondensasi	$[^{\circ}C]$
T_c	: Temperature air pendingin	$[^{\circ}C]$
T_h	: Temperature uap-udara	$[^{\circ}C]$
T_s	: Temperature upper-face porous media	$[^{\circ}C]$
T_w	: Temperature rerata dinding-dinding chamber $[T_{bt} + T_f + T_b + T_t] / 4$	$[^{\circ}C]$
z	: Tebal porous media layer	$[m]$

Greek Letters

Ω	: Temperature takberdimensi	$[-]$
δ	: Rerata tebal kondensat tak berdimensi	$[-]$

Subscripts

I	: Treat-I, $T_a = 35^{\circ}C$ $T_h : 35, 40, 45, 50, 55^{\circ}C$	
II	: Treat-II, $T_a/T_h = 1$ $T_h : 35, 40, 45, 50, 55^{\circ}C$	

Referensi

- [1] Acrivos, A., "On the combined effect of forced and free convection heat transfer in laminar boundary layer," *Chemical Engineering Science*, 21(1966), 343-352.
- [2] Gerstmann, J., and Griffith, P., "Laminar film condensation on the underside of horizontal and inclined surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 10(1966), 567-580.
- [3] Yang, S.A., and Chen, C.K., "Laminar film condensation on a finite-size horizontal plate with suction at the wall," *Appl. Math. Modelling*, 16(1992), 325-329.
- [4] Terekhov VI., Terekhov VV., and Sharov KA., "Heat and mass transfer in condensation of water vapor from moist air," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 71, No. 5, pp. 771-777, 1998.
- [5] Wang, S.C., et. al., "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*, 46(2003), 4003-4011.
- [6] Chang, TB., "Laminar film condensation on a horizontal plate in a porous medium with surface tension effects," *Journal of Marine Science and Technology*, 13, 4(2005), 257-264.
 - [7] Katoh Y, Kurima J, Yamaguchi S, "A study on condensation phenomena on a horizontal cooled flat plate in a porous medium, *proc. of the 44th National Heat Transfer Symp. of Japan*, Nagasaki, (2007)
 - [8] Katoh Y, Kurima J, Yamaguchi S, "A study on heat and mass transfer phenomena on a horizontal cooled flat plate in a porous medium," *proc. of 45th-JSME Chugoku-shikoku Branch Annual Meeting*, 075-1, (2007), 241-242.
 - [9] Katoh Y, Kujirai T," Characteristic of condensation heat transfer on a flat plate in a porous media," *proc. of 47th- JSME Chugoku-shikoku Branch Annual Meeting*, 095-1, (2009) , 31-32.