

MODEL PENDIDIHAN KOLAM PADA PERMUKAAN BERPORI DALAM CAIRAN REFRIJERAN

Ari Darmawan Pasek
Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung

Berdasarkan data-data penelitian sebelumnya^[1], dalam makalah ini akan dibahas model pendidihan dan mekanisme perpindahan panasnya pada permukaan berpori dalam cairan refrijeran. Ditunjang dengan suatu kajian analitik, diusulkan tiga model pendidihan yang terjadi pada tiga daerah fluks panas yang berbeda. Pada fluks panas rendah terjadi pendidihan pada dasar permukaan berpori dan pada fluks panas tinggi terjadi pendidihan pada permukaan. Sedangkan model pendidihan yang ketiga adalah pendidihan antara yang terjadi pada daerah transisi antara daerah fluks panas rendah dan tinggi. Pada makalah ini akan dibahas pula suatu metoda dan persamaan korelasi untuk memperkirakan koefisien perpindahan panas pada setiap daerah pendidihan.

1. PENDAHULUAN.

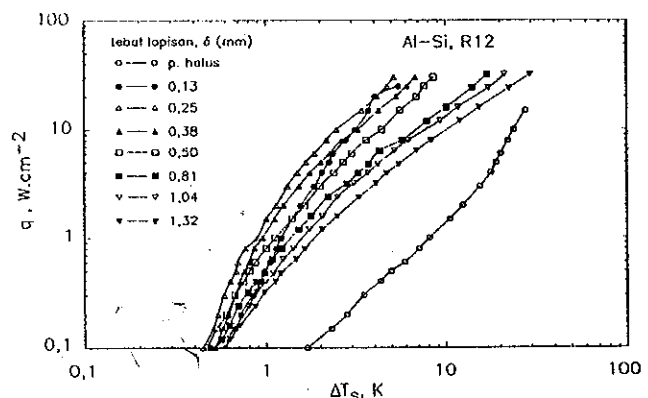
Salah satu cara untuk menghemat pemakaian energi pada suatu sistem termal adalah dengan menggunakan penukar kalor atau ketel yang mempunyai efisiensi yang tinggi. Khusus untuk sistem termal yang memerlukan pembangkitan uap, diperlukan permukaan pendidihan yang diperlakukan sedemikian rupa sehingga pendidihan dapat berlangsung pada beda temperatur yang serendah mungkin. Salah satu cara untuk mendapatkan hal ini adalah dengan melapisi suatu permukaan didih dengan lapisan berpori.

Pada makalah sebelumnya^[1], telah dibahas hasil-hasil pengujian karakteristik pendidihan pada permukaan berpori yang terbuat dari material Al-Si dengan proses plasma spray. Pengujian tersebut dilakukan untuk mencari pengaruh ketebalan lapisan berpori dan pengaruh kemiringan permukaan terhadap karakteristik pendidihan. Karakteristik pendidihan yang diamati antara lain koefisien perpindahan panas, histerisis pendidihan, dan perubahan gradien kurva pendidihan. Pengujian dilakukan dengan cara mengamati perubahan derajat superpanas dinding (ΔT_s) untuk beberapa fluks panas yang diberikan. Cairan yang digunakan adalah refrijeran R12 dan R11 pada tekanan 101 kPa. Beberapa hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 1, 2 dan 3.

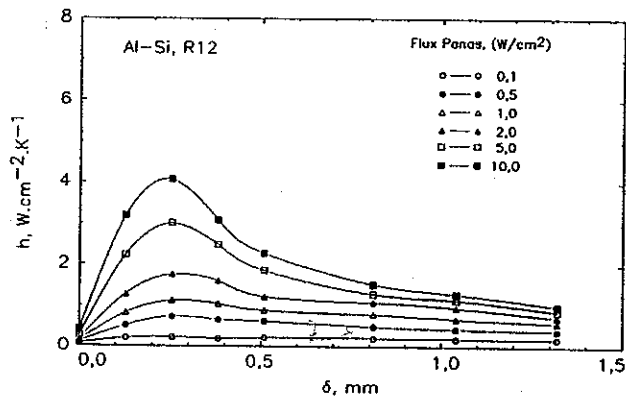
Gambar 1 memperlihatkan kurva-kurva pendidihan dari beberapa sampel pengujian dengan ketebalan lapisan berpori (δ) yang berbeda dalam

cairan R12. Ditunjukkan pula kurva pendidihan dari permukaan halus yang dipoles. Dapat dilihat bahwa kurva-kurva pendidihan permukaan berpori berada disebelah kiri dari kurva pendidihan permukaan halus. Hal ini menunjukkan bahwa permukaan berpori memberikan koefisien perpindahan panas pendidihan yang lebih besar daripada permukaan halus.

Pengaruh ketebalan lapisan berpori pada koefisien perpindahan panas (h) secara lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2. Dapat dilihat bahwa pengaruh ketebalan lapisan akan semakin besar dengan membesarnya fluks panas (q). Gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa terdapat



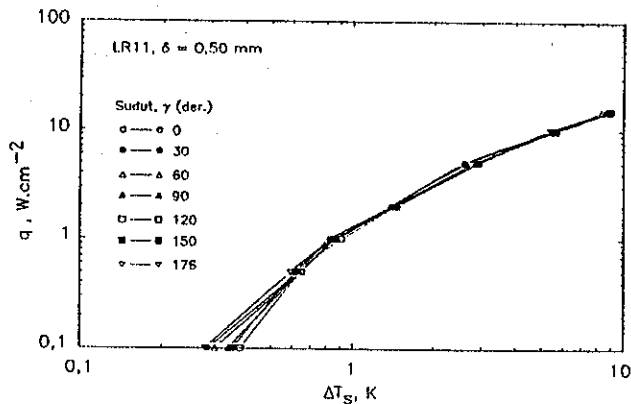
Gambar 1. Kurva pendidihan permukaan berpori dengan berbagai δ dalam cairan R12.



Gambar 2. Kurva h vs δ untuk berbagai harga q di dalam R12.

suatu ketebalan lapisan yang memberikan koefisien perpindahan panas yang maksimum. Tebal lapisan tersebut adalah 0,25 mm.

Gambar 3 memperlihatkan kurva-kurva pendidihan dari sampel dengan $\delta = 0,50$ mm dengan sudut kemiringan permukaan (γ) yang berbeda di dalam cairan R11. Gambar ini memperlihatkan bahwa karakteristik pendidihan pada permukaan berpori tidak dipengaruhi oleh sudut kemiringan permukaan. Hal yang sama juga ditemui pada sampel-sampel lainnya dan dalam cairan R12.



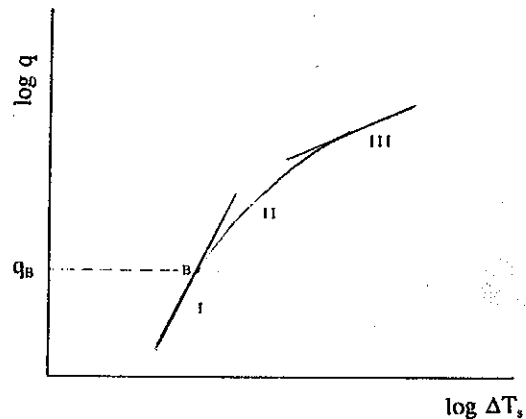
Gambar 3. Pengaruh sudut kemiringan permukaan (γ) terhadap karakteristik pendidihan dalam cairan R11.

2. MODEL PENDIDIHAN PADA PERMUKAAN BERPORI.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik pendidihan pada permukaan berpori tidak dipengaruhi oleh sudut kemiringan permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa

pendidihan terjadi di dalam lapisan berpori melalui mekanisme penguapan sehingga perilaku dan kondisi gelembung di permukaan tidak lagi mempengaruhi proses perpindahan panas. Proses pendidihan di dalam lapisan berpori ini dipengaruhi oleh fraksi uap atau fraksi cairan dalam lapisan berpori dan hal ini tidak bergantung kepada faktor-faktor gravitasi tetapi bergantung kepada faktor-faktor kapiler. Oleh sebab itu karakteristik pendidihan tidak bergantung kepada sudut kemiringan permukaan.

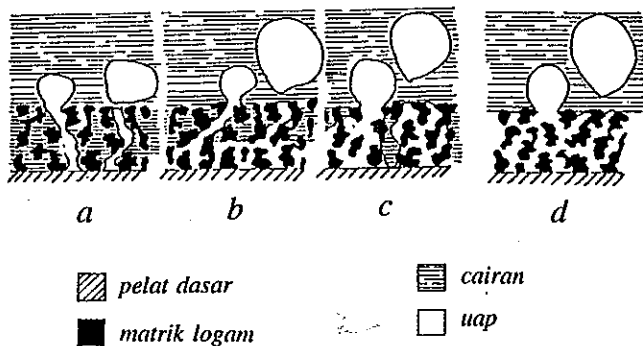
Jika dilihat secara teliti, kurva pendidihan yang dihasilkan terdiri dari tiga bagian yang berbeda kemiringannya (lihat gambar 4). Setiap perubahan kemiringan kurva berhubungan dengan perubahan model pendidihan di dalam lapisan berpori. Tiga bagian kurva pendidihan ini juga ditemui pada hasil pengujian pendidihan dari permukaan berpori dalam cairan kriogenika^[2,3,4]



Gambar 4. Skema kurva pendidihan pada permukaan berpori dalam cairan refrijeran.

Pada daerah I yaitu daerah q rendah, pendidihan atau penguapan diperkirakan terjadi pada dasar lapisan berpori. Uap yang dihasilkan mengalir keluar dari lapisan melalui saluran-saluran uap kecil yang terbentuk di dalam lapisan. Sedangkan cairan mengalir di antara saluran uap dari kolam ke dasar lapisan untuk mengganti cairan yang menguap (gambar 5 a.). Penguapan terjadi pada batas cairan dan uap dalam gelembung. Derajat superpanas dinding yang terjadi, diperlukan untuk menjaga eksistensi gelembung di dasar lapisan dan untuk mengatasi tahanan-tahanan termal di matriks logam dan lapisan cairan yang mengelilingi gelembung.

Daerah II merupakan daerah transisi. Terdapat dua kemungkinan model pendidihan. Kemungkinan pertama adalah terbentuknya lapisan



Gambar 5. Model pendidihan dalam lapisan berpori.

uap parsial di dalam lapisan berpori (lihat gambar 5.b). Uap yang dihasilkan akan bertambah dengan naiknya fluks panas yang diberikan. Cairan akan menjadi lebih sulit untuk memasuki lapisan berpori, akibatnya tebal lapisan uap bertambah dengan bertambahnya fluks panas. Panas dari dinding akan berpindah secara konduksi melalui lapisan berpori yang kering dan kemudian diserap oleh proses pendidihan di batas uap cairan. Dengan demikian laju fluks panas dapat dituliskan sebagai :

$$q = \frac{\Delta T_s}{(\delta^*/k_p) + (1/h_b)} \quad (1)$$

Kemungkinan kedua adalah terbentuknya saluran-saluran atau kolom-kolom uap yang besar di dalam lapisan berpori, semakin besar fluks panas semakin besar diameter kolom uap (lihat gambar 5.c).

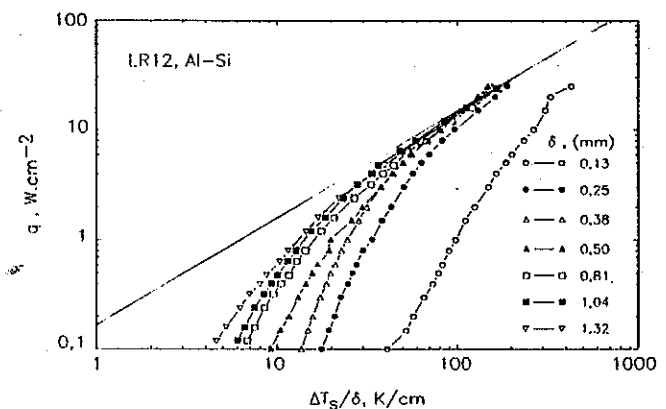
Pada daerah III yaitu daerah q tinggi, jumlah uap yang dihasilkan cukup besar sehingga cairan terdesak keluar dari lapisan berpori dan pendidihan terjadi di permukaan (gambar 5.d). Mekanisme perpindahan panas pada q tinggi didominasi oleh penguapan pada batas uap cairan. Oleh sebab itu meskipun pendidihan terjadi di permukaan, karakteristik pendidihan tetap tidak terpengaruh oleh sudut kemiringan permukaan. Panas dari dinding harus melalui lapisan berpori yang kering sebelum sampai pada batas cairan-uap. Persamaan perpindahan panasnya mirip dengan persamaan (1), dengan δ^* diganti oleh tebal lapisan berpori (δ). Tetapi pada fluks panas tinggi harga h_b sangat tinggi atau $1/h_b$ sangat kecil dibanding dengan δ/k_p . Dengan demikian

persamaan (1) menjadi :

$$q = \frac{\Delta T_s}{\delta/k_p} \quad (2)$$

Jika anggapan di atas benar, maka kurva yang diperoleh dengan memplotkan data q terhadap $\Delta T_s/\delta$ pada skala log-log akan cenderung menyatu menjadi garis dengan kemiringan sama dengan satu. Perpotongan garis tersebut dengan sumbu q menunjukkan harga konduktivitas termal lapisan berpori.

Gambar 6 menunjukkan garis yang dimaksud. Dari gambar tersebut diperoleh konduktivitas termal lapisan berpori adalah sebesar 15 W/mK pada temperatur cair jenuh refrijeran. Harga tersebut hanya $\pm 8\%$ dari harga konduktivitas termal aluminium murni. Hal ini disebabkan karena buruknya kontak antar partikel logam Al-Si dalam lapisan berpori.



Gambar 6. Kurva q vs $\Delta T_s/\delta$ untuk cairan R12.

2.1. Batas Atas Daerah I.

Jika dianggap pada daerah II terjadi lapisan uap parsial di dalam lapisan berpori (kemungkinan I), maka batas atas daerah I atau q dimana mulai terjadi daerah II (q_B) dapat ditentukan secara analitik. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan teori-teori aliran dua fasa dalam media berpori untuk memprediksi distribusi fraksi cairan di dalam lapisan berpori pada setiap q yang diberikan. Harga q yang memberikan fraksi cairan pada dasar sama dengan nol menunjukkan dimulainya pembentukan lapisan uap atau batas atas daerah I.

Jika pendidihan terjadi di dasar lapisan berpori, maka laju aliran massa uap yang dihasilkan adalah sama dengan laju aliran massa

cairan yang masuk ke dalam lapisan dan akan sama dengan fluks panas yang diberikan dibagi dengan panas laten evaporasi, atau:

$$\rho_v V_v = -\rho_l V_l = q/h_{fg} \quad (3)$$

Jika dapat diasumsikan bahwa baik aliran uap maupun cairan adalah laminar dan satu dimensi, maka penurunan tekanan cairan dan uap sepanjang tebal lapisan dapat dicari dari persamaan Darcy^[5]. Dengan menerapkan persamaan ini terhadap aliran uap dan cairan, kemudian didefinisikan tekanan kapiler sebagai $p_c = p_v - p_l$, maka gradien tekanan kapiler di dalam lapisan berpori dapat dinyatakan sebagai:

$$-\frac{dp_c}{dy} = \left[\frac{\mu_v V_v}{K_v} - \frac{\mu_l V_l}{K_l} \right] - \Delta \rho g \quad (4)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3) ke persamaan (4) diperoleh:

$$-\frac{dp_c}{dy} = \Delta \rho g \left[J \left[\left[\frac{1}{K_v} \right] + \left[\frac{C_v}{K_l} \right] \right] - 1 \right] \quad (5)$$

dimana

$$J = \frac{qv_v}{h_{fg} H \Delta \rho g}, \quad C_v = \frac{v_l}{v_v}$$

$$K_v = \frac{K_v}{K}, \quad K_l = \frac{K_l}{K}$$

K_v dan K_l masing-masing adalah permeabilitas relatif uap dan cairan yang didefinisikan sebagai :

$$K_v = s^3, \quad K_l = (1 - s)^3$$

R. Lipinski^[6] dan K.S. Udell^[7] menggunakan persamaan korelasi:

$$p_c = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{\epsilon}{K}} f(s) \quad (6)$$

untuk menghubungkan tekanan kapiler dengan fraksi cairan s , dimana $f(s)$ adalah fungsi Leveret dan dapat dinyatakan sebagai^[7]:

$$f(s) = \frac{(s^{-1} - 1)^{0.175}}{\sqrt{s}} \quad (7)$$

Biasanya sudut kontak cairan refrijeran adalah lebih kecil dari 10° ^[8]. Oleh sebab itu $\cos \theta = 1$. Substitusi persamaan (6) ke dalam persamaan (5) menghasilkan:

$$-\sigma \sqrt{\frac{\epsilon}{K}} \frac{df(s)}{dy} = \Delta \rho g \left[J \left[\left[\frac{1}{K_v} \right] + \left[\frac{C_v}{K_l} \right] \right] - 1 \right] \quad (8)$$

Karena fungsi Leveret's hanya merupakan fungsi s saja, maka

$$\frac{df(s)}{dy} = \frac{df(s)}{ds} \frac{ds}{dy} = f'(s) \frac{ds}{dy} \quad (9)$$

Substitusi persamaan (9) ke dalam persamaan (8) menghasilkan:

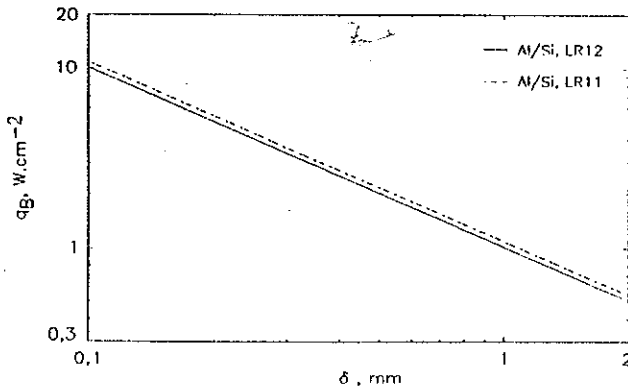
$$-\frac{f'(s)}{J \left[\left[\frac{1}{K_v} \right] + \left[\frac{C_v}{K_l} \right] \right] - 1} ds = \frac{\Delta \rho g \sqrt{\frac{K}{\epsilon}}}{\sigma} dy \quad (10)$$

Untuk suatu harga q atau J tertentu, persamaan (10) dapat diintegrasikan dengan syarat batas $s = 0$ pada $y = 0$ dan $s = s_\delta$ pada $y = \delta$. Syarat batas pertama menunjukkan kondisi pengeringan dasar lapisan, atau saat awal terbentuknya lapisan uap parsial di dalam lapisan. Oleh sebab itu harga q yang berhubungan dengan $s = 0$ adalah batas atas daerah I yang dicari (q_B). Telah dibuktikan s_δ adalah sama dengan 1 dan K diperoleh dari pengujian^[9] sama dengan $1.85 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Dengan aturan Simpson persamaan (10) dapat diintegrasikan untuk mencari hubungan q_B dengan δ . Hasilnya ditunjukkan pada gambar 7.

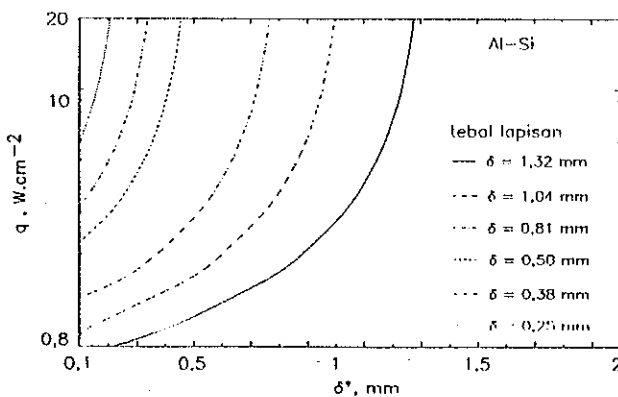
2.2. Tebal Lapisan Uap.

Persamaan (10) dapat diintegrasikan dengan syarat batas yang lain, yaitu : $s = 0$ pada $y = \delta^*$ dan $s = 1$ pada $y = \delta$, dimana δ^* adalah tebal lapisan uap. Integrasi akan menghasilkan suatu hubungan antara δ^* dengan fluks panas untuk $q > q_B$. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 8. Dari

gambar tersebut dapat dilihat bahwa lapisan uap akan membesar dengan naiknya fluks panas, dan untuk suatu harga q yang sama lapisan berpori yang lebih tebal akan mempunyai lapisan uap yang lebih tebal pula. Oleh sebab itu untuk $q > q_B$, lapisan berpori yang lebih tebal akan menghasilkan koefisien perpindahan panas pendidihan yang lebih kecil.



Gambar 7. Harga q_B sebagai fungsi dari δ .



Gambar 8. Variasi δ^* terhadap q .

3. PREDIKSI KURVA PENDIDIHAN.

3.1. Persamaan korelasi untuk daerah I.

Seperti telah dibahas sebelumnya, derajat superpanas yang terjadi merupakan penjumlahan beda temperatur yang diperlukan untuk mengatasi tahanan termal dan beda temperatur untuk mempertahankan eksistensi gelembung di dalam pori yang aktif. Penurunan persamaan eksak untuk mencari hubungan fluks panas dengan derajat superpanas adalah sangat sulit dilakukan karena jumlah pori aktif tidak dapat diketahui secara pasti dan bentuk dari pori tidak beraturan. Alternatif lain yang dapat dilakukan adalah mencari persamaan fluks panas secara empirik. Persamaan

empirik biasanya terdiri dari beberapa kelompok variabel yang berpengaruh terhadap pendidihan. Pada kasus pendidihan di permukaan berpori dipilih variabel berikut :

$$h \propto q^a k_l^b C_p^c h_{fg}^d \mu_l^e \sigma^f (\Delta \rho g)^g \delta^h \quad (11)$$

$$(K/\epsilon)^i k_p^j M^k T_r^l$$

Dengan analisis dimensional variabel tersebut dapat dikelompokkan menjadi delapan parameter tak berdimensi :

$$\left[\frac{h\delta}{k_l} \right] = C \left[\frac{q\delta}{h_{fg}\mu_l} \right]^a \left[\frac{C_p\mu_l}{k_l} \right]^c \left[\frac{\sigma}{\Delta \rho g \delta^2} \right]^f$$

$$\left[\frac{K/\epsilon}{\delta^2} \right]^i \left[\frac{k_p}{k_l} \right]^j (M)^k (T_r)^l \quad (12)$$

Kelompok variabel pada ruas kiri adalah bilangan Nusselt yang menggunakan tebal lapisan berpori sebagai panjang karakteristik. Kelompok pertama dan kedua di ruas kanan masing-masing adalah bilangan Reynolds dan bilangan Prandtl.

Kebanyakan data koefisien perpindahan panas pendidihan dalam cairan refrijeran berbanding lurus dengan $Pr^{0.35}$, $M^{-0.25}$, and T_r^7 . Dengan demikian pangkat-pangkat ini akan digunakan dalam persamaan empirik.

Data-data pengujian pendidihan^[10,11] menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas berbanding terbalik dengan tegangan permukaan sebagai $(1/\sigma)^{0.16}$. Oleh sebab itu pangkat $(\Delta \rho g \delta^2 / \sigma)$ dipilih sama dengan 0,16.

Data-data pengujian pendidihan^[9, 11] menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan konduktivitas cairan. Oleh sebab itu h dalam persamaan (12) juga harus berbanding lurus dengan k_l . Karena pangkat k_l dalam bilangan Prandtl sudah ditetapkan sebesar - 0,35, maka pangkat dari (k_p/k_l) dalam persamaan (12) haruslah lebih kecil dari 0,65 sedemikian rupa sehingga pangkat k_l pada ruas kanan adalah positif.

Pangkat (k_p/k_l) , konstanta C , pangkat $(K/\epsilon \delta^2)$ dan pangkat dari bilangan Reynolds dicari secara serempak dengan teknik regresi tak linier dan menggunakan data hasil pengujian pendidihan yang dilaporkan pada makalah sebelumnya^[1]. Semua sifat cairan diambil pada temperatur jenuhnya. Persamaan empirik yang diperoleh

adalah :

$$Nu = 4.04 \times 10^3 Z_c \quad (13)$$

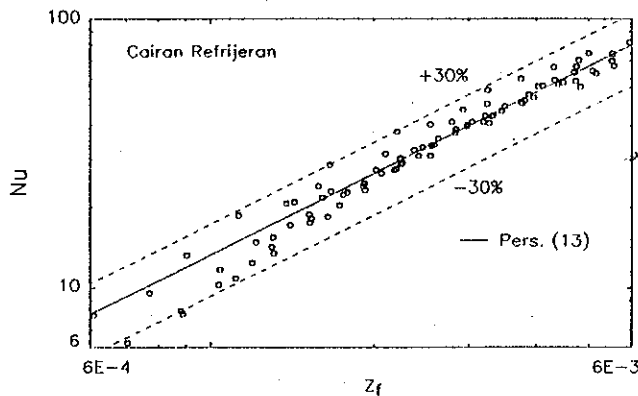
dimana

$$Nu = \left[\frac{h\delta}{k_l} \right]$$

$$Z_c = \left[\frac{q\delta}{h_{fs}\mu_l} \right]^{0.66} \left[\frac{C_{pl}\mu_l}{k_l} \right]^{0.35} \left[\frac{\sigma}{\Delta\rho d\delta^2} \right]^{-0.16}$$

$$\left[\frac{K/\epsilon}{\delta^2} \right]^{0.01} \left[\frac{k_p}{k_l} \right]^{0.5} (M)^{-0.25} (T_r)^7$$

Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara harga-harga yang dihitung dari persamaan (13) dengan harga yang diperoleh dari pengujian.



Gambar 9. Perbandingan antara persamaan (13) dengan data pengujian.

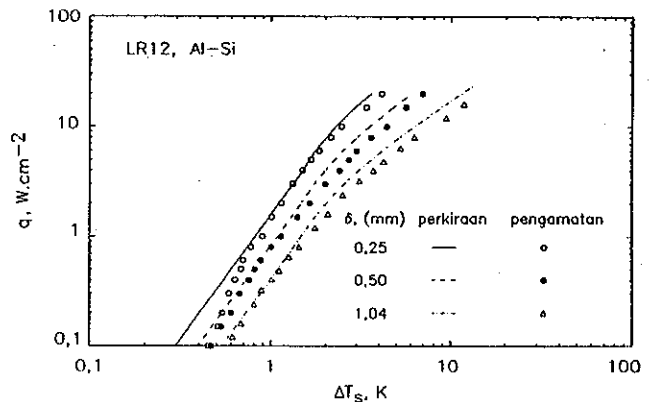
3.2. Persamaan perpindahan panas untuk daerah II dan III.

Seperti telah disinggung sebelumnya, bahwa pada daerah II terjadi lapisan uap parsial di dalam lapisan berpori. Fluks panas pada daerah II dinyatakan oleh persamaan (1). Koefisien perpindahan panas pendidihan h_b dapat dihitung dari persamaan (13) dengan mengganti δ dengan $\delta' = \delta - \delta^*$, yaitu tebal lapisan berpori yang masih terbasahkan. Cara mencari δ^* telah dibicarakan pada pasal 2.2.

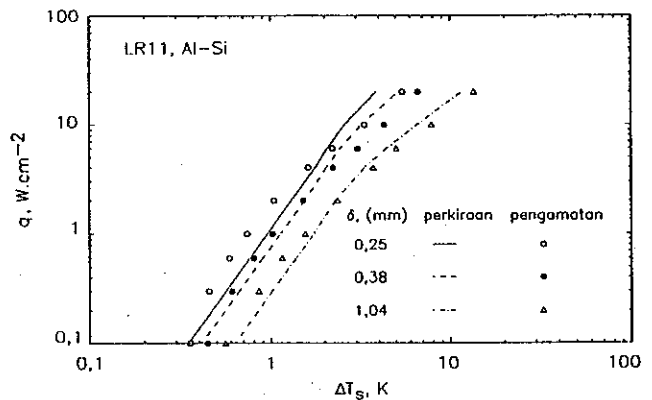
Dengan demikian kurva pendidihan untuk suatu permukaan berpori dapat diperkirakan

dengan cara sebagai berikut :

Untuk permukaan berpori yang diketahui tebal lapisan, konduktivitas termal, porositas dan permeabilitasnya, maka batas atas daerah I atau (q_b) dapat dicari dari persamaan (10) dengan menerapkan syarat batas yang pertama. Kemudian untuk $q < q_b$ derajat superpanas dinding dapat dicari dari persamaan (13). Untuk $q > q_b$ derajat superpanas dinding dapat dicari dari persamaan (1). δ^* dapat ditentukan dari persamaan (10) dengan menerapkan syarat batas yang kedua dan h_b dicari dari persamaan (13) dengan mengganti δ dengan δ' . Perbandingan antara hasil perkiraan



Gambar 10. Perbandingan antara kurva hasil pengamatan dan hasil prediksi dalam cairan R12.



Gambar 11. Perbandingan antara kurva hasil pengamatan dan hasil prediksi dalam cairan R11.

dengan data pengujian dapat dilihat pada gambar 10 dan 11. Secara umum dapat dikatakan bahwa metoda yang dibicarakan pada makalah ini dapat memprediksi kurva pendidihan dengan ketelitian yang dapat diterima.

4. PENUTUP.

Metoda dan persamaan empirik yang dibahas di atas hanya dapat digunakan untuk lapisan berpori dengan ketebalan $\delta > 0,13$ mm. Permukaan dengan lapisan berpori yang paling tipis ($\delta = 0,13$ mm) menunjukkan karakteristik pendidihan yang berbeda. Permukaan ini mempunyai karakteristik yang mirip dengan permukaan kasar. Hal ini disebabkan karena partikel Al-Si yang digunakan mempunyai ukuran rata-rata 100 μ m, sehingga lapisan dengan tebal 0,13 mm hanya terdiri dari satu partikel saja dan tidak dapat dianggap sebagai lapisan berpori.

Persamaan empirik diatas diperoleh dari data yang sangat terbatas, oleh sebab itu pemakaian persamaan tersebut untuk permukaan berpori yang lain masih harus diteliti keabsahannya.

NOTASI.

C_p	=	kapasitas panas, J/kg.K.
$f(s)$	=	fungsi Leveret.
g	=	percepatan gravitasi, m/s ² .
h, h_b	=	koefisien perpindahan panas, W/m ² K.
h_g	=	panas laten, J/kg K.
J	=	fluks panas tak berdimensi.
k	=	konduktivitas termal, W/mK.
K	=	permeabilitas lapisan berpori, m ² .
K_{rl}	=	permeabilitas relatif cairan.
K_{rv}	=	permeabilitas relatif uap.
M	=	massa molekul.
Nu	=	bilangan Nusselt.
p	=	tekanan, Pa.
p_c	=	tekanan kapiler, Pa.
Pr	=	bilangan Prandtl.
q	=	fluks panas, W/m ² atau W/cm ²
q_B	=	batas atas daerah I, W/m ² atau W/cm ² .
Re	=	bilangan Reynolds.
s	=	fraksi cairan.
ΔT_s	=	derajat superpanas dinding, K.
v	=	volume spesifik.
Yunani		
γ	=	sudut kemiringan permukaan, der.
δ	=	tebal lapisan berpori, m atau mm.
δ^*	=	tebal lapisan uap, mm.
δ'	=	tebal lapisan berpori yang masih terbasahkan, mm.

ϵ	=	porositas lapisan berpori.
μ	=	viskositas dinamik, N.s/m ² .
ν	=	viskositas kinematik, m ² /s.
ρ	=	massa jenis, kg/m ³ .
$\Delta\rho$	=	$\rho_l - \rho_v$.

Subskrip

l	=	cairan.
p	=	lapisan berpori.
v	=	uap.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pasek, A.D., Pengujian Karakteristik Pendidihan Inti Dari Suatu Permukaan Berpori Dalam Cairan Refrijeran, Seminar Nasional Perpindahan Panas Dan Massa, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 16 - 17 November 1992.
2. Pasek, A.D., Ashworth, S.P., Beduz, C., Mayne, J., Scurlock, R.G., Evaluation of a Novel Enhanced Boiling Surface in Cryogenic Liquids, in Advances in Cryogenic Engineering, ed. R.W. Fast, Vol. 35, pp. 429 - 435, Plenum Press, New York, 1990.
3. Pasek, A.D., Ashworth, S.P., Beduz, C., Harrison, K., Lavin, T., Scurlock, R.G., The Effect of Coating Thickness and Material on A Porous Enhanced Boiling Surface, Proc. Low Temperature Engineering and Cryogenics Conf., Southampton. section 11-2, 1990.
4. Pasek, A.D., Experimental Studies of a Porous Boiling Surface in Cryogenic Liquids, Transport Phenomena Science and Technology, ed. Bu-Xuan Wang, pp. 777 - 783, Higher Education Press, Beijing, 1992.
5. Brinkman, H.C., On The Permeability of Media Consisting of Closely Packed Porous Particles. Applied Science Research, Vol.A1, pp. 81 - 86, 1947.
6. Lipinski, R.J., A coolability Model for Postaccident Nuclear Reactor Debris, Nuclear Technology, Vol. 65, pp. 53 - 66, 1984.
7. Udell, K.S., Heat Transfer in Porous Media Heated From Above With Evaporation, Condensation and Capillary Effect. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33., no.1, pp. 91 - 103, 1983.
8. Tong, W., Bar-Cohen, A.T., Simon, T.W.,

- You, S.M., Contact Angle Effect on Boiling Incipience of Highly Wetting Liquids, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 33, no.1, pp. 91 - 103, 1990.
9. Pasek, A.D., Pool Boiling on Porous Surfaces in Cryogenic and Refrigerant Liquids, PhD Thesis, University of Southampton, UK, 1991.
 10. Vishnev, I.P., Molecular and Thermodynamic Method of Heat Transfer Generalization and Classification of Boiling Substances, Cryogenics, Vol. 28, pp. 770 - 778, 1988.
 11. Rohsenow, W.M., A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids, Trans. of ASME J. Heat Transfer, Vol. 74, pp. 969 - 975, 1952.