

PENGEMBANGAN KORELASI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN INTI PADA PENUKAR PANAS BERKAS PIPA VERTIKAL

Aryadi Suwono, Bambang Susilo
Pusat Antar Universitas - Ilmu Rekayasa, ITB.

ABSTRAK

PENGEMBANGAN KORELASI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN INTI PADA PENUKAR PANAS BERKAS PIPA VERTIKAL. Karakteristik perpindahan panas pendidihan pada berkas pipa vertikal memegang peranan penting dalam perencanaan komponen-komponen sistem konversi energi seperti, boiler, evaporator, penukar panas pada reaktor nuklir berpendingin air, dll. Sampai saat ini informasi dan data untuk perencanaan belum tersedia. Oleh karena itu disini akan dicoba diketengahkan pengembangan korelasi karakteristik perpindahan panas pendidihan inti pada pemanas tunggal yang telah dikorelasikan oleh Rohsenow untuk diperluas berlakunya pada pemanas jamak, dalam hal ini pada penukar panas berkas pipa vertikal. Dari data pengujian untuk penukar panas berkas pipa vertikal yang mempunyai permukaan I 1,25 - 1,25 menghasilkan persamaan korelasi sebagai berikut:

$$\frac{C_i \Delta T}{h_{fg} \rho_r^{1,7}} = 0,0246 \left[\frac{q/A}{h_{fg} \mu_i} \left(\frac{g_c \sigma}{g(\rho_v - \rho_l)} \right)^{0,5,0,33} \right]$$

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A CHARACTERISTIC CORRELATION FOR BOILING HEAT TRANSFER OF THE CORE OF HEAT EXCHANGER CONSISTING OF BUNDLE OF VERTICAL PIPES. The characteristic of boiling heat transfer of a bundle of vertical pipes plays an important role in the design of components for energy conversion systems such as boilers, evaporators, heat exchanger of water cooled nuclear reactors etc. Until present information and data for design are unavailable. In the present study an attempt will be made to develop the characteristic correlation of boiling heat transfer of the core of a single heater correlated by Rohsenow to be applied to composite heaters i.e. heat exchanger consisting of a bundle of vertical pipes. The testing of heat exchanger consisting of a bundle of vertical pipes having a surface of I 1,25 - 1,25 yielded the following correlation equation:

$$\frac{C_i \Delta T}{h_{fg} \rho_r^{1,7}} = 0,0246 \left[\frac{q/A}{h_{fg} \mu_i} \left(\frac{g_c \sigma}{g(\rho_v - \rho_l)} \right)^{0,5,0,33} \right]$$

PENDAHULUAN

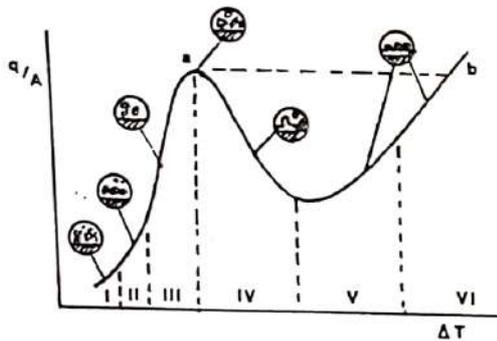
Perpindahan panas pendidihan memegang peranan penting dalam perencanaan komponen-komponen sistem konversi energi. Perpindahan panas yang terjadi pada pembangkit uap di dalam pipa-pipa ketel, evaporator suatu sistem pendingin, penukar panas reaktor nuklir berpendingin air, dll berlangsung secara pendidihan. Namun demikian sampai saat ini informasi yang lengkap mengenai penerapannya dalam perencanaan belum tersedia. Karakteristik perpindahan panas pendidihan yang telah dikorelasikan pada literatur-literatur masih terbatas untuk kasus-kasus yang sederhana, yaitu pada permukaan pemanas tunggal.

Beberapa penukar panas sering dijumpai berbentuk berkas (bundel) pipa vertikal, misalnya pada penukar panas reaktor nuklir berpendingin air dan ketel uap. Karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada kedua alat tersebut lebih kompleks dibandingkan dengan karakteristik perpindahan panas pendidihan yang telah dikorelasikan itu. Hal ini disebabkan adanya kompleksitas geometri pada penukar-penukar panas tersebut, misalnya pola susunan pipanya, diameter pipa, jumlah pipa dan jarak antar pipa. Perpindahan panas pendidihan yang terjadi pada masing-masing pipa tersebut akan saling berpengaruh satu terhadap yang lainnya.

TEORI DASAR

Perpindahan panas pendidihan adalah suatu proses konveksi yang menyangkut perubahan fasa dari cairan menjadi uap. Perpindahan panas pendidihan jauh lebih rumit bila dibandingkan dengan perpindahan panas konveksi satu fasa tanpa perubahan fasa. Karena disini tidak hanya melibatkan besaran-besaran konveksi tapi juga besaran-besaran lain yang menyangkut perubahan fasa, seperti kondisi permukaan, tegangan permukaan, panas laten penguapan, tekanan, densitas dan sifat-sifat fisik uap juga memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik perpindahan panas pendidihan.

Melalui penelitian percobaan, bila suatu permukaan padat tercelup di dalam cairan dipanaskan maka hubungan fluks panas yang terjadi dengan perbedaan temperatur antara permukaan dan cairan secara kualitatif dapat ditunjukkan dalam gambar 1.



Gambar 1. Kurva pendidihan

Kurva pendidihan dibagi menjadi beberapa daerah, yaitu :

- I. Daerah konveksi bebas
- II. Daerah permulaan pendidihan inti
- III. Daerah pendidihan inti
- IV. Daerah transisi
- V. Daerah pendidihan film
- VI. Daerah perpindahan panas radiasi

Disini pembahasan dibatasi untuk daerah II dan III. Pada daerah II temperatur permukaan pemanas telah cukup untuk menghasilkan gelembung uap pada permukaan pemanas, kemudian gelembung uap akan semakin banyak pada daerah III. Gelembung-gelembung uap tersebut akan naik ke permukaan bebas. Puncak daerah III merupakan titik maksimum (burn out point), peningkatan temperatur permukaan panas justru akan mengurangi laju perpin-

dahan panas yang terjadi. Hal ini terjadi akibat pembentukan uap berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan gerakannya meninggalkan permukaan panas. Sehingga sebagian besar permukaan pemanas terlapis oleh uap yang memberikan tahanan termal yang lebih besar.

KORELASI DATA UNTUK PENDIDIHAN INTI

Korelasi data untuk pendidihan inti dapat dianalogikan dengan korelasi data untuk perpindahan panas secara konveksi paksa pada regim aliran turbulen, yaitu :

$$Nu = C_1 \cdot Re_b^x \cdot Pr^y \quad (1)$$

Re_b adalah bilangan Reynolds yang mewakili ratio antara gaya inerti dan gaya gesek per satuan luas atau menyatakan tingkat pengadukan. Untuk pendidihan dengan andaian bahwa gelembung-gelembung uap merupakan penyebab pergerakan fluida maka definisi Re_b adalah,

$$Re_b = \frac{G_b \cdot D_b}{\mu_l} \quad (2)$$

Secara empirik dengan andaian bahwa gaya apung dan tegangan permukaan saja yang berpengaruh, Fritz (5) mengusulkan rumus untuk diameter gelembung pada saat pelepasan adalah,

$$D_b = C_d \cdot \beta \left[\frac{g_c \sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

Substitusi Persamaan (1) ke dalam Persamaan (2) dan mengingat bahwa fluks panas dapat dinyatakan sebagai,

$$q/A = C_q \cdot h_{fg} \cdot G_b \quad (4)$$

maka,

$$Re_b = C_r \beta \frac{q/A}{\mu_l h_{fg}} \left[\frac{g_c \sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5} \quad (5)$$

Sedangkan,

$$Nu = \frac{h_b D_b}{K_l} \quad (6)$$

Menurut analisa dimensional bilangan Nuselt dapat diganti oleh kelompok bilangan tak berdimensi yang lain yaitu, ratio entalpi tingkat panas lanjut terhadap entalpi jenuh, $C_l \Delta T / h_{fg}$.

Berdasarkan data pengujian yang dilakukan Addons [8], dimana digunakan fluida kerja air dan pemanas kawat platina dengan orientasi

horizontal, Rohsenow [4] mengusulkan korelasi,

$$\frac{C_l \Delta T}{h_{fg}} = C_{ef} \cdot Re^x Pr^y \quad (7)$$

Sehingga setelah dilakukan substitusi persamaan (5) dan persamaan (7) ke dalam persamaan (2) menghasilkan:

$$\frac{C_l \Delta T}{h_{fg}} = C_{ef} \left[\frac{q/A}{\mu_l h_{fg}} \left(\frac{g_c - \sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right)^{0,5} \right]^x \left[\frac{C_p \mu_l}{k_l} \right]^y \quad (8)$$

C adalah koefisien yang menyatakan korelasi antara permukaan pemanas dan fluida kerja. sedangkan x dan y adalah konstanta-konstanta yang harganya masing-masing 0,33 dan 1,7.

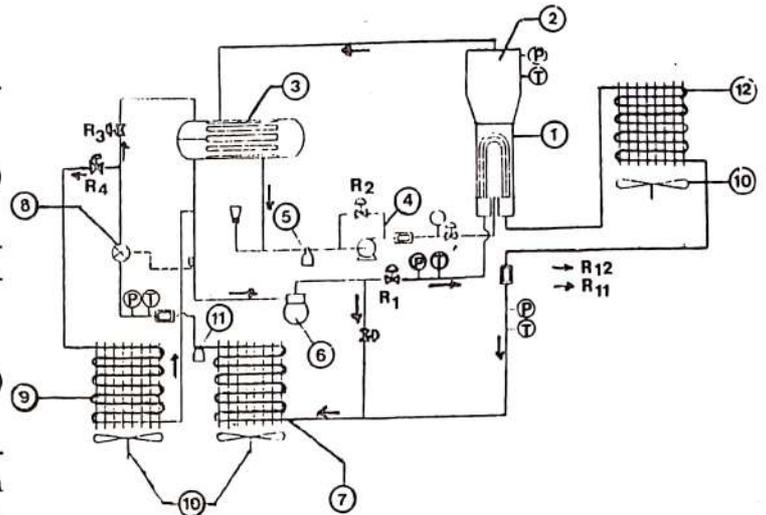
Karakteristik perpindahan panas pendidihan yang terjadi pada penukar panas susunan pipa vertikal selain melibatkan besaran-besaran pada kasus pemanas tunggal juga melibatkan faktor geometri dari penukar panasnya., yaitu pola susunan pipa, diameter pipa, jarak antar pipa dan jumlah pipa.

PERANGKAT UJI

Perangkat uji yang direncanakan pada prinsipnya terdiri dari dua buah loop, yaitu loop primer berupa siklus kompresi uap dengan refrigeran R-12 dan loop sekunder dengan fluida kerja R-11. Uap R-12 yang keluar dari kompresor siklus kompresi uap berfungsi sebagai fluida pemanas pada pipa-pipa penukar panas, sedangkan R-11 pada siklus sekunder berfungsi sebagai fluida yang dididihkan. Uap R-11 yang terbentuk diembunkan kembali di dalam kondensator R-11, sedangkan kondensat yang terjadi kemudian disirkulasikan kembali ke dalam tabung uji untuk menggantikan R-11 yang menguap. Pendinginan di dalam kondensator R-11 dilakukan oleh efek pendinginan yang terjadi pada sistem pendingin siklus kompresi uap R-12.

Untuk pengaturan laju pemanasan pada pipa-pipa pemanas, perangkat uji dilengkapi dengan katup bypass yang dipasang paralel terhadap penukar panas berkas pipa vertikal. Sehingga fluida pemanas dapat diatur lajunya sesuai dengan yang diinginkan. Jadi kondensator R-12 selain berfungsi untuk membuang panas juga untuk pengaturan laju pemanasan pada berkas pipa vertikal.

Perangkat uji selengkapnya ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Perangkat uji

Bagian-bagian utama dari perangkat uji ini adalah sebagai berikut:

1. Penukar panas berkas pipa vertikal dan penampung uap.
2. Kondensator R-11
3. Pompa sirkulasi
4. Kompresor
5. Kondensator R-12
6. Evaporator R-12
7. Katup ekspansi termostatik
8. Alat-alat ukur tekanan, temperatur dan laju aliran.

Pemilihan Geometri Penukar Panas

Penukar panas yang dipilih berbentuk berkas (bundel U) vertikal. Geometri permukaan yang dipilih adalah permukaan I 1,25-1,25 dari Pustaka (6), yang mempunyai karakteristik sebagai berikut:

$d_{\text{pipa}} = 0,009525 \text{ m}$
 $\text{pitch} = 0,011913 \text{ m}$
 pola susunan pipa = in line
 jumlah pipa = 21 buah

Diameter terkecil U adalah (3-4) kali d_o pipa

Berkas pipa vertikal ini dikelilingi oleh shell (penutup) yang terbuat dari bahan kaca. Sedangkan dimensi shell yang diperoleh adalah sebagai berikut:

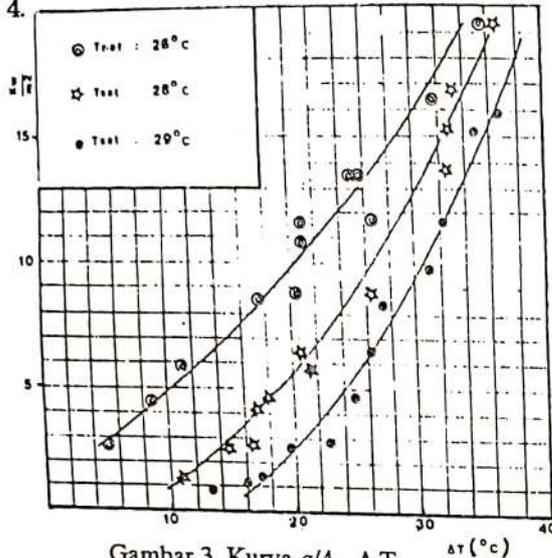
$d_o = 150 \text{ mm}$
 $d_t = 136 \text{ mm}$
 tinggi = 280 mm

PENGUJIAN DAN ANALISIS

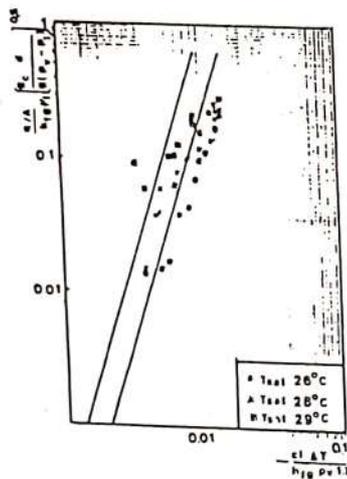
Pengujian dilakukan untuk beberapa variasi tekanan jenuh R-11 yaitu , 2,9000: 4,3512 dan 5,0764 psig.

Kurva $q/A - \Delta T$ hasil pengujian dan kurva

perbandingan antara hasil pengujian dengan korelasi Rohsenow ditunjukkan pada gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Kurva $q/A - \Delta T$.



Gambar 4. Kurva perbandingan hasil pengujian dengan korelasi Rohsenow.

Konstanta Korelasi, C_{sf}

Untuk permukaan pemanas tunggal C_{sf} merupakan konstanta yang mewakili korelasi antara permukaan pemanas dengan fluida kerja. Besaran-besaran yang mempengaruhi C_{sf} ini adalah sudut kontak antara gelembung dan permukaan pemanas, yang merupakan ukuran terbasahnya permukaan pemanas oleh fluida kerja. Derajat kebasahan permukaan pemanas oleh fluida kerja menentukan keefektifan

perpindahan panas yang berlangsung. Semakin basah permukaan pemanas, makin kecil sudut kontak yang terjadi sehingga perpindahan panas yang berlangsung akan semakin efektif. Gambar 5. menunjukkan beberapa sudut kontak antara permukaan pemanas dan fluida kerja untuk tingkat kebasahan tertentu.



Gambar 5. Sudut kotak gelembung

Selain itu besaran lain yang mempengaruhi C_{sf} adalah kekasaran permukaan pemanas, yang menentukan jumlah tempat terbentuknya inti-inti gelembung uap.

Sedangkan untuk permukaan pemanas jamak, seperti penukar panas yang diuji selain besaran-besaran tersebut juga dipengaruhi oleh faktor geometri dari penukar panas yaitu : Jarak antar pipa, pola susunan pipa, Jumlah pipa

Berdasarkan data pengujian untuk penukar panas vertikal dan dengan bantuan regresi linier maka C_{sf} untuk penukar panas vertikal dapat ditentukan yaitu, $C_{sf} = 0,0246$. Data yang diperoleh Rohsenow adalah 0,013. Dari data tersebut ternyata faktor geometri penukar panas berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan pendidihan yang terjadi.

Dari kedua kurva pada gambar 4. terlihat bahwa pada kondisi yang sama yaitu, pada harga ΔT yang sama kurva hasil pengujian bergeser kearah kanan, berarti untuk ΔT yang sama fluks panas yang diberikan pada kombinasi penukar panas berkas pipa vertikal dan fluida kerja R-11 akan turun. Hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Besaran-besaran faktor geometri akan menaikkan tahanan termal fluida. Adanya berkas pipa maka terjadi interaksi gelembung antar pipa-pipa pemanas sehingga gerakan gelembung uap ke permukaan bebas akan terhambat. Terhambatnya gerakan gelembung-gelembung uap tersebut akan menaikkan tahanan termal pada permukaan pipa-pipa pemanas.

- Adanya besaran-besaran faktor geometri akan menurunkan tingkat pengadukan dari fluida kerja, hal ini dapat dibuktikan dari

kurva diatas dimana pada harga ΔT yang sama bilangan Reynold gelembung menurun. Sedangkan bilangan Reynold gelembung merupakan ukuran tingkat pengadukan dari fluida kerja. Menurunnya tingkat pengadukan disebabkan oleh terhambatnya gerakan gelembung uap ke permukaan bebas karena adanya berkas pipa. Dibawah ini akan diketengahkan secara kualitatif pengaruh besaran-besaran faktor geometri terhadap karakteristik perpindahan panas pendidihan.

Jarak antar pipa dan pola susunan pipa

Semakin kecil jarak antar pipa maka interaksi gelembung antar permukaan pemanas semakin besar sehingga tahanan termal permukaan pemanas akan semakin besar dan tingkat pengadukan dari fluida kerja semakin kecil karena perjalanan gelembung uap ke permukaan dihambat oleh adanya berkas pipa. Hal sebaliknya terjadi bila jarak antar pipa semakin besar.

Pengaruh pola susunan pipa terhadap interaksi antar pemanas yaitu, untuk jarak pipa yang sama maka interaksi gelembung antar permukaan pemanas dan susunan pipa segi empat lebih besar dibandingkan dengan susunan pipa segitiga. Sehingga hambatan terhadap perjalanan gelembung uap ke permukaan juga semakin besar, yang menyebabkan tahanan termal permukaan pemanas semakin besar, sedangkan tingkat pengadukan dari fluida kerja semakin kecil.

Jumlah pipa

Jumlah pipa pengaruhnya pada karakteristik perpindahan panas pendidihan terkait dengan banyaknya tempat-tempat aktif untuk

pembentukan gelembung uap dan semakin besarnya hambatan terhadap perjalanan gelembung uap ke permukaan. Untuk fluks panas yang sama, semakin banyak jumlah pipa maka hambatan yang diberikan akan bertambah besar sehingga kurva pendidihan akan bergeser ke kanan.

KESIMPULAN

- Karakteristik perpindahan panas pendidihan pada penukar panas berkas pipa vertikal sangat dipengaruhi oleh besaran-besaran faktor geometri penukar panas yaitu, jarak antar pipa, pola susunan pipa dan jumlah pipa.

-Konstanta korelasi permukaan pemanas dan fluida kerja, C_{sf} selain dipengaruhi oleh sudut kontak gelembung uap dan kekasaran permukaan pemanas juga dipengaruhi oleh besaran-besaran faktor geometri dari penukar panas.

- Adanya besaran-besaran faktor geometri pada penukar panas berkas pipa vertikal akan menggeser kurva pendidihan ke arah kanan. Sehingga pada harga ΔT yang sama fluks panas yang diberikan akan turun.

-Jarak antar pipa dan pola susunan pipa berpengaruh terhadap tahanan termal permukaan pemanas dan tingkat pengadukan fluida kerja. Semakin kecil jarak antar pipa maka tahanan termal yang terjadi akan membesar dan tingkat pengadukannya akan mengecil. Pola susunan pipa segi empat (in-line) mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap membesarnya tahanan termal dan mengecilnya tingkat pengadukan fluida kerja dibandingkan dengan pola susunan segitiga (staggered).

DAFTAR PUSTAKA

1. Collier, J.G., *Convective Boiling and Condensation*, Mc Graw-Hill, London, 1972.
2. Kreith, F., *Principles of Heat Transfer*, 3rd Edition, Intext Educational Publisher, New York, 1973.
3. Harianto Handojo, Josef., *Perencanaan, Realisasi dan Pengujian Peralatan Percobaan Perpindahan Panas Pendidihan*, Tugas sarjana, 1982.
4. Rohsenow, W.M., *Heat Transfer with Boiling*, Modern Developments in Heat Transfer, edited by Warren Ibele, Academic Press, New York, 1963.
5. Fritz, W., *Physik.Z.*, 36,379,1935.
6. London, A.L., and Kays, W.M., *Compact Heat Exchangers*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1984.
7. Kern, Donald Q., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill International Book Company, Auckland, 1983.

8. Addoms, J.N., *Heat Transfer at High Rates to water Boiling Outside Cylinders*, D.Sc. Thesis, Chem.Eng.Dept., Mass.Int.Technol., 1948.
9. Susilo, Bambang., *Pengembangan Korelasi Karakteristik Perpindahan Panas Pendidihan Inti Pada Penukar Panas Berkas Pipa Vertikal*, Tugas sarjana, 1989.