

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

M8-018 Karakteristik Perpindahan Kalor dan Jatuh Tekanan

Aliran Dua-Fase Refrijeran dalam *Microchannels*

Ardiyansyah

Departemen Teknik
Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

Telp: +62-21-7270032, Fax: +62-21-7270033, E-mail: ardiyansyah@eng.ui.ac.id

ABSTRACT

Studi literatur terhadap perpindahan kalor dan jatuh tekanan aliran dua fase refrijeran di dalam saluran mikro (microchannels) disajikan dalam tulisan ini. Diskusi juga meliputi tinjauan terhadap metode klasifikasi dan penentuan ambang batas saluran mikro, metode fabrikasi serta aplikasi potensial. Selama dua dekade terakhir, telah disajikan berbagai model untuk menjelaskan fenomena aliran dua fase dalam saluran mikro, sebagian besar masih mendasarkan pada model-model empiris yang dibangun untuk saluran-saluran konvensional yang lebih besar. Model-model tersebut disajikan dalam tulisan ini, dilengkapi dengan tinjauan pengembangan terkini model untuk microchannel yang berdsar pada teori dan fenomena yang ditemukan secara spesifik dalam aliran ini. Tulisan ini ditujukan untuk memberikan isu-isu penting pada aliran refrijeran di dalam saluran mikro yang meliputi pola aliran dua fase, mekanisme perpindahan kalor dan pengembangan korelasi, jatuh tekanan dan metode prediksinya.

Keywords: Microchannels, aliran dua fase, perpindahan kalor, jatuh tekanan

1. Pendahuluan

Penelitian karakteristik perpindahan kalor telah menjadi semakin penting sejalan dengan semakin berkembangnya teknologi skala mikro seperti sistem *micro electro-mechanical*. Dampak dari miniaturisasi sistem yang melibatkan perpindahan kalor yang tinggi mendatangkan tantangan untuk pengelolaan kalor sistem yang hanya dapat diatasi dengan peningkatan kinerja dan efisiensi peralatan penukar kalor. Saluran mikro telah menjadi solusi potensial untuk alat tersebut karena karakteristiknya berupa kinerja kalor yang tinggi dengan persyaratan ruang yang kecil.

Perkembangan metode fabrikasi yang rumit, yang pada awalnya membatasi penerapan saluran mikro, saat ini telah berkembang melampaui kemampuan pemodelan sistem kalor pada skala tersebut. Fenomena aliran dua-fase dan perpindahan kalor dalam saluran mikro menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan aliran dalam saluran konvensional. Sementara telah banyak studi teoritis dan eksperimental ditujukan pada penyusunan model-model aliran dua-fase dan perpindahan kalor pada skala makro, saat ini semakin dibutuhkan penentuan ambang batas geometri di mana model-model tersebut masih dapat diterapkan dengan tingkat keandalan yang dapat diterima. Di bawah ambang batas tersebut,

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

model-model untuk skala mikro sudah harus diterapkan. Namun begitu, ambang batas yang terdefinisi baik untuk transisi model skala makro ke mikro belum tersedia. Beberapa usaha penggolongan telah dilakukan sebagaimana didiskusikan di bawah ini.

Penggolongan saluran mikro berdasarkan hanya pada dimensi saluran sederhana dan penggunaannya pada berbagai aplikasi diajukan oleh Mehendale et al. [4] antara lain saluran konvensional $D_h > 6 \text{ mm}$, dan saluran mikro $100 \mu\text{m} \geq D_h > 1 \mu\text{m}$. Kandlikar dan Grande [2] menerapkan penggolongan saluran berdasarkan pada mean free path dari molekul-molekul pada aliran fase tunggal dan pengaruh tegangan permukaan dan pola aliran pada aplikasi aliran dua-fase. Penelitian mereka mempertimbangkan efek *rarefaction* pada fase gas di mana efek tersebut menjadi penting pada saluran mikro dan saluran-saluran dengan diameter yang lebih kecil, antara lain: saluran konvensional $D_h > 3\text{mm}$, saluran mikro $200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$. Metode penggolongan lain yang berbasis kriteria fisik diperkenalkan oleh Kew dan Cornwell [5], menggunakan *confinement* gelembung sebagai ambang batas skala makro ke mikro. Dengan menggunakan bilangan *confinement* Co, di mana efek dari confinement menjadi penting pada saluran dengan diameter hidrolik pada nilai Co di atas 0,5.

Tabel 1. Rangkuman penelitian aliran dua-fase pada saluran mini dan mikro

Peneliti	Geometri saluran	Fluida tes, G (kg/m ² s); q (kW/m ²)	Catatan
Tuckerman dan Pease (1981)	Heat sink kompak-sejajar $w= 50-56\mu\text{m}$; $h= 300 \mu\text{m}$; $L= 10$	Air Laju aliran: 4.7-8.6 cm ³ /s q= 1810-7900	Penelitian mula perpindahan kalor dalam saluran mikro. Koefisien perpindahan kalor (<i>Heat transfer coefficient-HTC</i>) diprediksi melalui hubungan-hubungan konvensional
Lazarek dan Black (1982)	Horisontal, saluran-lingkaran tunggal $D= 3.1$; $L= 123$ and 246	R113 G=125-750 q=14-380	Mekanisme perpindahan kalor pada didih <i>subcooled</i> dan jenuh meliputi didih nukleasi dan konvektif. HTC mempunyai nilai relatif konstan pada cakupan nilai kualitas, bergantung pada fluks kalor. Model jatuh tekanan dan fluks kalor kritis dibangun dari data eksperimen.
Bowers dan Mudawar (1994)	Heat sink sejajar $D= 0.51$ and 2.54	R113 Laju aliran: 0.28-1.1 ml/s, q=1000-2000	Studi eksperimental perbandingan kinerja perpindahan kalor dan jatuh tekanan pada saluran mini dan mikro.
Mishima dan Hibiki (1996)	Vertikal, saluran-lingkaran tunggal	Udara-air $0.0896 < j_G < 79.3$	Pengamatan pola aliran dalam saluran mini dengan transisi diprediksi oleh model Mishima-Ishii. Jatuh tekanan gesek diprediksi

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

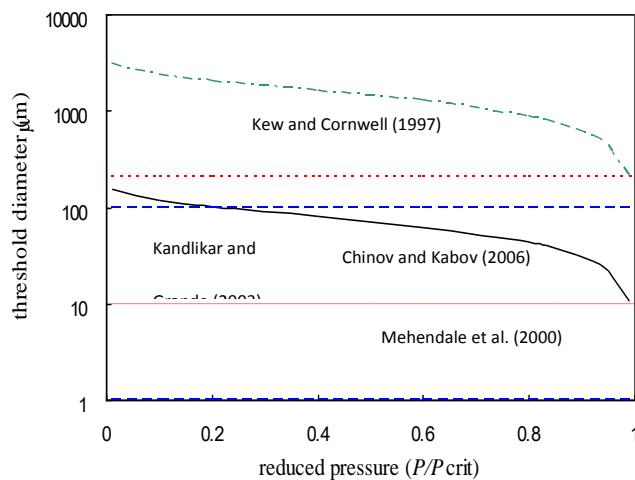
Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

	D= 1- 4 L=210-1000	m/s $0.0116 < j_L < 1.67$ m/s	oleh model Chiholm dengan nilai C yang baru yang merupakan fungsi dari diameter.
Kew dan Cornwell (1997)	Horisontal, saluran-lingkaran tunggal D= 1.39-3.69 L=500	R141B G=188-1480 q=16.6-90	HTC pada kualitas rendah meningkat sebanding dengan fluks kalor, sementara pada kualitas lebih tinggi HTC hanya bergantung pada nilai kualitas dan tidak bergantung pada fluks kalor. Peristiwa didih nukleasi terindikasikan. Pengenalan nilai Co=0.5 sebagai ambang batas saluran sempit.
Triplett et al. (1998)	Horisontal, saluran-lingkaran tunggal D=1.1 dan 1.45 semi-triangular Dh=1.09 and 1.49	Udara dan air $0.02 < j_G < 80$ m/s $0.02 < j_L < 8$ m/s	Pengamatan pola aliran dalam saluran diameter kecil. Fraksi kosong (<i>void fraction</i>) diukur dan diprediksi dengan baik oleh model homogen, terutama untuk <i>bubbly</i> dan <i>slug</i> . Korelasi untuk jatuh tekanan dibangun.
Kattan et al. (1998)	Horisontal, saluran-lingkaran tunggal D=12 and 10.92, L=3013	R134a, R123, R402A, R404A, R502 G=100-500 q=0.44-36	Pengamatan pola aliran dan pembangunan peta pola aliran. HTC meningkat sebanding dengan kualitas pada daerah kualitas rendah, mencapai puncak dan manukik pada kualitas tinggi, bergantung pada fluks kalor. Peta aliran dibangun berdasarkan model HTC.
Serizawa dan Feng (2001)	Horisontal, saluran-lingkaran D=50 and 25 μ m	Udara/uap-air $0.0012 < j_G < 295.3$ $0.003 < j_L < 17.52$	Pengamatan pola aliran dalam saluran mikro. Diamatinya aliran cincin cairan dan cairan lump.
Kawahara et al. (2002)	Horisontal, saluran-lingkaran D=100 μ m, L=64.5	Air ter-deionisasi-gas nitrogen $0.1 < j_G < 60$ m/s $0.02 < j_L < 4$ m/s	Pengamatan pola aliran dalam saluran mikro. Inti gas mengalir dengan lapisan cairan tipis berbentuk cincin, atau inti gas berbentuk seperti serpentine dengan lapisan cairan terdefromasi. Diajukannya peta pola aliran berbasis probalistik.
Qu dan Mudawar	Heat sink segi empat horisontal	Air ter-deionisasi	Koefisien perpindahan kalor didih jenuh bergantung kuat pada fluks massa, bergantung

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

(2003)	sejajar 231x713 μm	G=135-402	lemah pada fluks kalor. Aliran anular mendominasi pada kualitas menengah dan tinggi, menunjukkan dominasi perpindahan kalor konveksi paksa. Koefisien perpindahan kalor menurun pada kualitas lebih tinggi. Korelasi HTC pada aliran anular ditemukan.
Zhang et al. (2004)	Analisis terhadap 13 data pada saluran tunggal lingkaran/segi 4 horizontal/vertikal, D=0.78-6	Air, R11, R12, R113 G=23.4-2939 q=2.95-2511	Aliran dua-fase pada saluran mini meliputi aliran cairan laminar dan aliran gas turbulent. Koefisien perpindahan kalor didih jenuh diprediksi dengan baik oleh korelasi Chen yang dimodifikasi untuk kedua kondisi aliran tersebut, yaitu bilangan Reynolds dan koefisien perpindahan kalor fase tunggal model superposisi Chen.
Qu dan Mudawar (2004)	Heat sink horisontal, segi empat, sejajar 215x821 μm	Air ter-deionisasi G=86-368	Penelitian fluks kalor kritis dalam saluran mikro. Instabilitas aliran dan aliran-balik uap terjadi. Fluks kalor kritis meningkat sebanding dengan fluks massa, tidak bergantung pada subcooled inlet. Korelasi fluks kalor kritis dibangun dengan tambahan data R113 dari Katto-Ohno.
Choi et al. (2007)	Horisontal, saluran-lingkaran D=1.5 and 3.0 L=2000	R22, R134a, CO_2 G=200-600 q=10-40	Koefisien perpindahan kalor didih alir jenuh dalam saluran mini dilaporkan. Didih nukleasi mendominasi pada kualitas rendah, bergantung dari fluks massa dan kalor. Korelasi dari koefisien perpindahan kalor dibangun berdasarkan model superposisi Chen.
Cheng et al. (2006) dan Cheng et al. (2007)	6 eksperimen; saluran horisontal tunggal dan multi, melingkar dan segi 4. D=0.6-10	CO_2 G=50-1500 q=1.8-46	Peta pola aliran untuk didih alir CO_2 dibangun. Korelasi koefisien perpindahan kalor dan jatuh tekanan berbasis fenomena aliran diajukan.



Gambar 1. Klasifikasi saluran mikro untuk refrijeran R744

— Kandlikar and Grande [2], — Mehendale et al. [4],
— Kew and Cornwell [5], — Chinov and Kabov [6]

$$Co = \frac{F/\gamma \phi_l - \rho_v g}{D_h} > 0.5 \quad (1)$$

Chinov dan Kabov [6] mengajukan metode yang sama dengan di atas, namun menggunakan parameter konstanta kapiler $l\sigma$.

$$l_\sigma = \frac{F/\gamma \phi_l - \rho_v g \cos \xi}{D_h} \quad (2)$$

Di mana ξ adalah kemiringan saluran terhadap sumbu vertikal. Pembatasan ambang batas ditunjukkan antara lain sebagai berikut: saluran skala besar $D > 5 l\sigma$, Saluran gravity-capillary $0.5 l\sigma < D < 5 l\sigma$, saluran mini atau capillary-gravity $0.1 l\sigma < D < 0.5 l\sigma$ dan saluran kapiler atau mikro $D < 0.1 l\sigma$.

Lin dan Pisano [7] menyarankan fenomena penekanan lengkap (*complete suppression*) pada didih nukleasi sehingga gelembung tidak dapat terbentuk sebagai kriteria ambang batas saluran mikro ke nano, sehingga $D_h < 2r_{nuc}$. Jari-jari nukleasi r_{nuc} , didefinisikan sebagai berikut.

$$r_{nuc} = \frac{2\sigma}{\Delta T_{nuc} \cdot \frac{dP/dT_{sat}}{}} \quad (3)$$

Di mana ΔT_{nuc} adalah panas lanjut dari nukleasi.

Serizawa dan Feng [8] mengajukan metode penggolongan saluran berdasarkan pertimbangan pola aliran dari penelitian mereka pada aliran dua-fase dalam saluran gelas berdiameter 0,05 mm dengan fluida uap-air. Mereka mengamati pola aliran baru yang didefinisikan sebagai aliran cincin cairan (liquid ring

flow). Jenis pola aliran yang sama juga ditemui pada saluran berdiameter 0,002 mm yang diberi nama berbeda, aliran cairan lump (liquid lump flow). Hasil-hasil tersebut kemudian digunakan sebagai dasar penggolongan saluran. Penemuan mereka menunjukkan hasil yang sama dengan klasifikasi Kandlikar and Grande [2] untuk saluran mikro, walaupun daerah-daerah transisi antar-golongan dan ambang batas aktual masih perlu didefinisikan secara jelas.

Gambar 1 menunjukkan perbandingan ambang batas dari fluid karbondioksida dalam saluran mikro. Jangkauan diameter yang diajukan oleh Chinov and Kabov [6] bervariasi dari 150 μm pada tekanan tereduksi (reduced pressure) yang rendah hingga sekitar 10 μm pada tekanan terseduksi tinggi, cukup dapat dibandingkan dengan jangkauan 200-10 μm yang didefinisikan oleh Kandlikar and Grande [2] serta jangkauan dan 100-1 μm oleh Mehendale et al. [4]. Namun, penggolongan oleh Kew and Cornwell [5] untuk skala makro ke mikro CO₂ memberikan nilai ambang batas yang lebih besar, dari 3 mm sampai 200 μm pada nilai tekanan tereduksi bervariasi.

Selanjutnya, penggolongan dari Kandlikar and Grande [2] akan digunakan dengan pertimbangan kesederhanaannya dan jangkauannya yang dapat dibandingkan dengan jangkauan dimensi saluran pada penggolongan lainnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.

2. Pola Aliran Dua-Fase

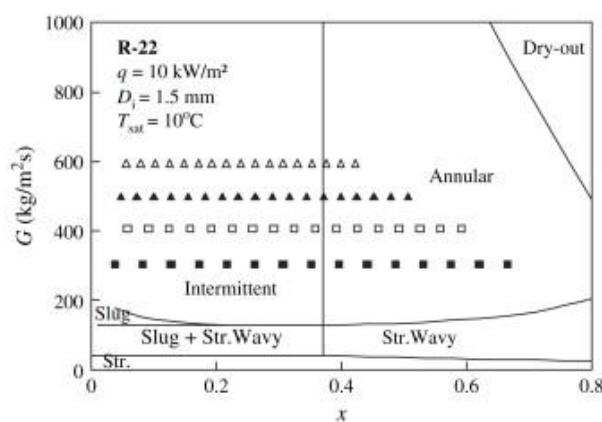
Identifikasi pola aliran dapat memberikan pertimbangan penting pada pembangunan model aliran dua-fase dalam peristiwa didih alir pada saluran mikro. Model-model prediksi perpindahan kalor dan jatuh tekanan berbasis pola aliran melalui penentuan fraksi kosong (void fraction) telah berkembang cukup maju akhir-akhir ini. Diskusi pola aliran mencakup penelitian pola aliran dan usaha-usaha untuk menampilkannya dalam peta pola aliran yang dapat diaplikasikan.

Usaha-usaha awal dalam memetakan pola aliran pada saluran konvesional telah dilakukan dalam Baker (1954). Pola-pola aliran dari udara-air dalam saluran horizontal disajikan sebagai luasan-luasan pada grafik. Salah satu peta pola aliran yang paling banyak digunakan diperkenalkan oleh Taitel and Dukler [9], dengan menggunakan parameter Lockhart-Martinelli, X, sebagai sumbu horizontal dan parameter-parameter yang berbeda untuk setiap kriteria transisi pada sumbu vertikalnya. Penggolongan pola aliran yang digunakan meliputi bubbly, intermittent (plug/slug), stratified, wavy dan annular.

Pada peristiwa aliran dengan penguapan, terjadi percepatan jatuh tekanan terutama pada fluks kalor yang tinggi, sehingga peta pola aliran yang diterapkan mempunyai karakteristik yang berbeda. Kattan et al. [10] membangun peta pola aliran diabatik untuk penguapan refrijeran dalam saluran horizontal. Basis data mereka yang cukup komprehensif meliputi refrijeran tunggal maupun campuran di dalam saluran tembaga berdiameter 12.0 mm dengan panjang 3 m. Penggolongan pola aliran yang digunakan meliputi stratified, stratified-wavy, intermittent, annular mist, serta daerah transisi di antaranya. Mereka mendasarkan peta pola aliran pada tipe Steiner dengan sumbu horizontal adalah kualitas uap dan sumbu vertikalnya adalah laju aliran massa. Kelebihan lain dari peta tersebut adalah dipertimbangkannya pengaruh fluks kalor pada terjadinya dryout pada bagian atas saluran selama terjadinya penguapan sepanjang saluran mendatar. Lebih jauh lagi, mereka berargumen bahwa peta tersebut dapat diterapkan

jugalah pada aliran dua-fase adiabatik. Pengembangan lebih lanjut dari peta pola aliran diajukan oleh Zurcher et al. [11] dengan penambahan data didih alir dari refrijeran-refrijeran pengganti R134a dan R407C, serta refrijeran alami amoniak. Modifikasi yang disarankan meliputi pola aliran transisi dari stratified menuju stratified-wavy, dari intermittent menuju annular, serta dari stratified wavy menuju annular. Wojtan et al. [24] mengembangkan penelitian lanjutan peta pola aliran dengan mempertimbangkan pengukuran dinamis terhadap fraksi kosong dari eksperimen mereka. Peta mereka menambahkan kurva transisi annular menuju dryout dan dryout menuju mist berdasarkan tren yang berbeda dari koefisien perpindahan kalornya. Gambar 2 menunjukkan data eksperimental perpindahan kalor aliran didih alir refrijeran R-22 dari Choi et al. [19] pada peta mereka.

Peta pola aliran di atas dibangun berdasarkan basis data aliran dua-fase pada saluran berdiameter lebih besar



Gambar 2. Data eksperimental perpindahan kalor aliran didih alir refrijeran R-22 dari Choi et al. [19] pada peta Wojtan et al [24]

daripada saluran mikro pada penggolongan yang dijelaskan sebelumnya. Dapat diamati bahwa pola-pola aliran pada saluran konvensional dan mikro mempunyai sifat yang hampir sama, sebagai contoh, aliran bubbly, slug, dan annular pada saluran konvensional juga diamati pada aliran di saluran mikro. Kecuali pola aliran stratified yang tidak ditemukan pada aliran dalam saluran mikro karena disebabkan oleh dominasi tegangan permukaan dan dapat diabaikannya efek gravitasi pada aliran saluran mikro. Walaupun begitu, peta pola aliran untuk saluran konvensional ternyata tidak dapat memprediksi transisi pola aliran pada aliran di saluran mikro.

Kawahara et al. [12] berdasarkan penelitian mereka pada aliran adiabatik campuran gas-cairan dalam saluran mikro berdiameter $100 \mu\text{m}$, menyarankan designasi baru pola aliran. Sebuah pola aliran cincin cairan (liquid ring) secara khusus diamati pada aliran dalam saluran mikro. Hasil analisis mereka disajikan pada peta pola aliran dengan sumbu horizontal berupa kecepatan superfisial gas dan sumbu vertikal berupa kecepatan superfisial cairan.

Baru-baru ini, Revellin dan Thome [13] mengajukan sebuah peta pola aliran diabatistik yang dibangun berdasarkan data eksperimen pada Revellin [14] untuk R 134a dan R245fa pada didih alir di saluran berdiameter 0.509 mm dan 0.790 mm serta flkuks kalor 597 kW/m^2 . Pengamatan pada empat pola aliran utama meliputi bubbly, slug, semi-annular and annular, disertai daerah transisi di antaranya. Peta pola aliran mereka merupakan pengembangan dari model perpindahan kalor tiga zona yang diajukan oleh Thome Thome et al. [15] dan Dupont et al. [16], yang sebelumnya terbatas hanya pada aliran elongated bubble (slug), kemudian diperluas dan digeneralisir untuk mencakup pola aliran berikut: (i) daerah isolated bubble, termasuk aliran bubbly dan/atau slug, (ii) daerah coalescing bubble, di mana bubble coalescence menjadi dominan, serta (iii) daerah annular, di mana aliran annular teramat hingga kualitas uap kritis yang menunjukkan tercapainya fluks kalor kritis.

Studi lanjutan pada pembangunan model perpindahan kalor dan aliran dua-fase berbasis fenomena telah difokuskan pada usaha-usaha untuk menyatukan peta pola aliran di atas dengan model perpindahan kalor dan jatuh tekanan untuk aliran pada saluran mikro. Salah satu studi tersebut telah dilaporkan oleh Cheng-Ribatski-Thome [17] untuk CO₂. Model didih alir mereka dibangun dari basis data aliran pada saluran berdiameter 0.6 mm hingga 10 mm, jangkauan yang luas dari kecepatan massa dari 50 hingga 1500 kg/m²s dan jangkauan fluks kalor dari 1.8 sampai 46 kW/m². Walaupun begitu, masih dibutuhkan penelitian-penelitian dan data eksperimental untuk memvalidasi penerapan peta pola aliran tersebut untuk ukuran saluran-saluran mikro. Lebih jauh lagi, ketidakstabilan yang teramat pada aliran dua-fase di dalam saluran mikro dan pengaruhnya pada transisi antar pola aliran memberikan tantangan baru bagi pembangunan peta pola aliran tersebut.

3. Perpindahan Kalor Didih Alir

Sebagaimana telah diamati luas pada aliran dalam saluran mikro, efek tegangan permukaan menjadi lebih dominan, dibandingkan dengan efek gravitasi yang berperan besar pada aliran dalam saluran konvensional. Walaupun perbedaan mekanisme tersebut cukup jelas teridentifikasi, namun model-model korelasi koefisien perpindahan kalor yang dibangun untuk saluran-saluran konvensional banyak diterapkan pada aliran dalam saluran mikro, yang kadang-kadang menunjukkan kesesuaian secara statisik. Walaupun begitu, saat ini semakin kritis untuk membangun model perpindahan kalor yang didasarkan pada karakteristik khusus didih alir pada saluran mikro sejalan dengan semakin luasnya penerapannya dalam industri.

Model perpindahan kalor yang paling banyak dirujuk dan digunakan adalah model superposisi Chen. Model tersebut menyarankan bahwa mekanisme perpindahan kalor pada peristiwa didih alir merupakan kontribusi gabungan antara didih nukleasi dan penguapan konvektif. Kontribusi didih nukleasi diperoleh dari persamaan korelasi Foster-Zuber untuk didih kolam dan sejalan dengan peningkatan kualitas akan ditekan oleh faktor supresi S. Faktor supresi didefinisikan sebagai rasio temperatur panas lanjut rata-rata dengan panas lanjut pada dinding. Penguapan konvektif dihitung dengan persamaan Dittus-Boelter untuk fase-tunggal cairan yang dianggap konveksi turbulen di dalam saluran dan dikoreksi dengan faktor pengali F, yang merupakan fungsi dari parameter Martinelli.

Modifikasi terhadap model tersebut untuk aliran pada saluran-saluran mini dan mikro telah diajukan oleh beberapa peniliti seperti Zhang et al. [18] dan Choi et al. [19] dengan memperhitungkan aliran laminar yang teramat pada saluran mini dan mikro.

Model perpindahan kalor lainnya yang dibangun untuk saluran konvensional adalah model asimptot yang menghubungkan dua mekanisme, perpindahan kalor didih nukleasi h_{NcB} serta konveksi h_c dengan:

$$h_{TP} = h_{NcB} + h_c \quad (4)$$

Menggunakan metode power law, Kutateladze mendefinisikan nilai $n=2$, sementara Steiner-Taborek [20] menggunakan $n=3$. Pada salah satu metode yang disajikan dalam Collier dan Thome [21], korelasi Gnielinski dapat diterapkan untuk mendapatkan nilai h_c serta persamaan Gorenflo untuk h_{NcB} .

Kandlikar [22] mengajukan metode prediksi perpindahan kalor empiris yang ia peroleh dari basis data eksperimental dari 24 sumber yang meliputi aliran di dalam saluran horisontal maupun vertikal. Model tersebut menggunakan bilangan didih dan konveksi yang tak berdimensi, serta parameter F_{fl} yang bergantung pada jenis fluida yang digunakan. Model tersebut kemudian disempurnakan oleh Kandlikar dan Steinke [23] yang mempertimbangkan aliran laminar pada saluran mini dan mikro. Aliran ini banyak terjadi karena kecilnya diameter hidrolik dan rendahnya flkuks massa pada aplikasi saluran mikro. Bilangan Nusselt yang didasarkan pada aliran cairan semua yang digunakan dalam model mereka ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$Nu_{lo} = \frac{h_{lo} \cdot D_h}{k_l} = C \quad (5)$$

di mana nilai C bergantung pada geometri saluran dan kondisi batas termal dinding. Sebagai contoh, untuk saluran lingkaran dengan temperature batas konstan, nilai C untuk masing-masing kondisi adalah 4.36 dan 3.66.

Kattan et al. [10] mengajukan model prediksi perpindahan kalor berdasarkan pola aliran untuk saluran horisontal sebagai berikut:

$$h_{TP} = \frac{\theta_{dry} \cdot h_v + (\pi - \theta_{dry}) h_{wet}}{2\pi} \quad (6)$$

Menurut mereka, didih alir h_{wet} terjadi pada keliling saluran yang terbasahi, sementara mekanisme konveksi uap paksa h_v terjadi pada keliling saluran yang kering dan direpresentasikan oleh sudut kering θ_{dry} . Perpindahan kalor karena didih alir dapat diperoleh dengan bentuk asimptot seperti dijelaskan sebelumnya, sementara komponen penguapan konveksi diperoleh dari model aliran lapisan tipis dan model fraksi kosong dari Steiner.

Model tersebut dilanjutkan oleh Wojtan et al. [24] dengan mengubah persamaan untuk mendapatkan sudut kering serta memperluas model tersebut untuk diterapkan pada daerah dryout dan aliran mist.

Model-model perpindahan kalor yang telah dijelaskan di atas mempertimbangkan mekanisme perpindahan didih nukleasi yang berperan penting, dan semakin penting pada saluran berdiameter lebih kecil seperti pada saluran mikro. Sebuah pandangan yang berbeda diajukan oleh Jacobi dan Thome [25] yang mengajukan mekanisme perpindahan kalor karena penguapan lapisan tipis transien cairan pada elongated bubble yang berperan besar pada saluran mikro. Model mereka dibangun lebih lanjut di Thome et al. [15] dengan model didih alir tiga-zona, meliputi liquid slug, evaporating elongated bubble dan vapor slug. Mekanisme perpindahan kalor yang disarankan meliputi konveksi cairan, konveksi uap pada zona kering dan sebagai kontributor utama adalah penguapan lapisan tipis cairan. Pendekatan yang berbeda dari model tersebut mempertimbangkan variasi transien pada koefisien perpindahan kalor lokal sepanjang saluran yang bersifat sekuensial dan siklis jika dibandingkan dengan pendekatan empris lain yang menganggap keseluruhan daerah sama sepanjang saluran.

Ribatski et al. [26] membandingkan 17 studi yang berbeda di mana sebagian besar data tersebut diambil pada bagian tes dengan diameter hidrolik antara $200 \mu\text{m}$ hingga 3 mm. Studi mereka menunjukkan akurasi model tiga-zona di atas menunjukkan hasil tertinggi walaupun dengan mean absolute error 50%, dan hanya memprediksi 45% data berada dalam $\pm 30\%$ pita kesalahan. Sampai sejauh ini, model tiga-zona hanya mencakup prediksi koefisien perpindahan kalor pada daerah elongated bubble (slug), oleh karena itu penelitian lanjutan masih diperlukan untuk memperluas model yang menjanjikan ini pada pola aliran dan geometri saluran lainnya.

4. Jatuh Tekanan Didih Alir

Salah satu kergian pada didih alir dalam saluran mikro adalah tingginya jatuh tekanan karena meningkatnya gesekan jika dibandingkan dengan saluran konvensional. Oleh karena itu, pembuatan model jatuh tekanan untuk aliran dua-fase dalam saluran mikro menjadi penting. Lebih lanjut lagi, model tersebut akan menjadi salah satu komponen dasar dalam desain peralatan penukar kalor berbasis saluran mikro.

Collier dan Thome [21] menjelaskan dua pendekatan utama dalam memodelkan jatuh tekanan gesek dalam saluran, yaitu model homogen dan model aliran terpisah. Model homogen menganggap aliran dua-fase mempunyai fase gabungan tunggal dengan sifat-sifat gabungan dari kedua fase tersebut. Salah satu sifat terpenting dalam hal ini adalah viskositas fase gabungan tersebut. Korelasi untuk sifat ini dapat diperoleh dari persamaan yang diajukan oleh McAdams et al. [28], Cicchitti et al. (1960) atau Dukler et al. (1964).

Asumsi-asumsi dasar dan penurunannya dikaji mendalam oleh Collier and Thome [21]. Model homogen kemudian digunakan oleh Triplett et al. [29] yang menerapkan korelasi Friedel [30] untuk mendapatkan pengali gesekan dua-fase. Penelitian mereka dibangun berdasarkan data eksperimental pola aliran dari campuran udara-air dalam saluran lingkaran berdiameter 1.1 dan 1.45 mm, serta saluran semi segi-tiga dengan diameter hidrolik 1.09 dan 1.49 mm. Mereka menemukan bahwa model homogen

memberikan hasil yang baik pada aliran bubbly dan slug, namun prediksinya melebihi nilai eksperimen untuk aliran annular.

Model aliran terpisah menganggap bahwa aliran terdiri dari dua aliran cairan dan uap yang terpisah dengan kecepatan rata-rata. Lockhart-Martinelli (1949) telah membangun model aliran terpisah dengan mengajukan pendekatan empiris untuk menentukan faktor pengali gesekan dua-fase, ϕ^2 sebagai fungsi dari parameter Martinelli, X.

$$X^2 = \frac{\psi_{dz} F_{\downarrow}}{\psi_{dz} F_{\rightarrow}} \quad (7)$$

$$\phi^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (8)$$

Nilai dari konstan C bergantung dari karakteristik aliran dari setiap fase. Khusus untuk aliran dalam saluran mikro, nilai C adalah 5, karena kedua fase dapat dianggap dalam keadaaan laminar. Mishima and Hibiki [31], dengan menggunakan data aliran dua-fase udara-air dalam saluran lingkaran dan segi-empat berdiameter hidrolik 1-4mm, mengajukan nilai yang lain untuk C sebagai berikut:

$$C = 21 - e^{-0.319D_h} \quad (9)$$

Sementara Kawahara et al. [12] menyarankan nilai C=0.24 dalam penelitian mereka untuk aliran dua-fase air ter-deinoisasi dan nitrogen dalam saluran mikro berdiameter $100\mu\text{m}$. Fenomena lainnya yang ditemui dalam saluran mikro ganda adalah adanya fluktuasi jatuh tekanan karena adanya ketidakstabilan aliran terutama di bagian hulu, sebagaimana dikaji oleh Bergles and Kandlikar [32]. Ketidakstabilan ini dapat menyebabkan aliran balik fase uap yang sangat mempengaruhi jatuh tekanan lokal.

Baru-baru ini Ribatski et al. [26] membandingkan 12 model prediksi jatuh tekanan yang secara luas digunakan pada diameter saluran yang beragam serta mencocokkannya dengan data eksperimental dari 9 penelitian yang berbeda, termasuk di dalamnya saluran berdiameter mini dan mikro. Berdasarkan penelitian mereka, model prediksi jatuh tekanan yang diajukan oleh Muller-Steinhagen dan Heck [33], yang dibangun untuk saluran konvensional menunjukkan hasil terbaik dengan 53.1% dari data berada dalam penyimpangan rata-rata absolut 31.3%. Hasil terbaik lainnya ditunjukkan oleh model homogen yang menerapkan viskositas rata-rata dari Cicchitti et al (1960) serta model yang diajukan oleh Mishima-Hibiki [31]. Mereka juga melaporkan, untuk kualitas uap di atas 0,6, semua model menunjukkan hasil yang buruk. Analisis mereka mengindikasikan bahwa model-model yang ada saat ini tidak dapat memprediksi karakteristik jatuh tekanan pada peristiwa didih alir dengan baik. Lebih jauh lagi, model-model yang ada tidak dapat menjelaskan pengaruh transisi pola aliran dalam saluran mikro pada hasil jatuh tekanan.

6. Kesimpulan

Tulisan ini menyajikan studi literatur pada peristiwa aliran dua-fase didih alir di dalam saluran mikro. Telah ada cukup banyak metode klasifikasi yang diajukan untuk menentukan ambang batas diameter

saluran mikro, walaupun belum ada metode yang terbukti andal untuk menentukan transisi fenomena perpindahan kalor dari makro ke mikro. Beberapa designasi pola aliran pada saluran-saluran konvensional juga ditemukan pada saluran mikro, walaupun begitu, peta pola aliran yang dibangun untuk saluran konvensional tidak dapat memprediksi transisi antar pola aliran pada saluran mikro, sehingga penelitian peta pola aliran untuk saluran mikro menjadi penting. Lebih jauh lagi, peta pola aliran akan sangat dibutuhkan untuk pembangunan model perpindahan kalor dan jatuh tekanan yang berbasis pola aliran yang semakin menarik perhatian peneliti.

Sebagian besar model perpindahan kalor didasarkan pada korelasi saluran konvensional yang dimodifikasi untuk saluran mikro. Mekanisme perpindahan kalor diidih nukleasi dianggap memegang peranan penting pada saluran mikro dan diakomodasi dalam model-model tersebut. Walaupun begitu, studi terakhir juga telah melaporkan pengaruh penguapan transien lapisan tipis pada aliran elongated bubble sebagai mekanisme yang lebih berperan. Model perpindahan kalor berdasarkan mekanisme-mekanisme tersebut masih terus dibangun.

Analisis pada model-model jatuh tekanan yang telah ada menunjukkan bahwa model-model tersebut tidak dapat memprediksi karakteristik jatuh tekanan pada peristiwa didih alir dalam saluran mikro. Lebih jauh lagi model-model tersebut gagal menjelaskan pengaruh transisi pola aliran terhadap hasil jatuh tekanan di saluran mikro. Oleh karena itu, bersama dengan pembangunan model-model perpindahan kalor, penelitian-penelitian lanjutan masih dibutuhkan, terutama pada model jatuh tekanan berbasis pola aliran.

Penghargaan

Penulis memberikan penghargaan kepada Profesor Jong Taek Oh dari Chonnam National University, Korea yang telah memberikan bimbingan dalam penulisan.

Referensi

- [1] Thome, John R., 2004. Boiling in microchannels: a review of experiment and theory, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 25 pp. 128-139
- [2] Kandlikar, Satish G. and Grande, William J., 2003. Evolution of Microchannel Flow Passages-Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology, *Heat Transfer Eng.* 24(1) pp. 3 – 17
- [3] Tuckerman, D.B. and Pease, R.F., 1981. High Performance Heat Sinking for VLSI, *IEEE E. Device Letters*, EDL-2 pp. 126-129
- [4] Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., Shah, R.K., 2000. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design, *Appl. Mech. Rev.* 53 (7) pp. 175-193
- [5] Kew, P. A., and Cornwell, K., 1997. Correlations for the Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-Diameter Channels, *App. Thermal Eng.* 17 pp. 705–715
- [6] Chinnov, E.A. and Kabov, O.A., 2006. Two-phase flow in pipes and capillary channels, *High Temperature* 44 (5) pp. 773-791
- [7] Lin, L., A.P. Pisano, 1991. Bubble forming on a micro line heater, micromechanical sensors, actuators and systems, *ASME DSC* 32 pp. 147-164

- [8] Serizawa, A., and Feng, Z. P., 2001. Two-Phase Flow in Microchannels, 4th Int. Conf. Multiphase Flows, Keynote Lect, N. Orleans, Louisiana
- [9] Taitel Y., A.E. Duckler, 1976. A model for prediction flow regime transitions in horizontal and near-horizontal gas-liquid flow, *AICHE J.* 22 pp. 47-55
- [10] Kattan, N., J.R. Thome, D. Favrat, 1998. Flow boiling in horizontal tubes part 1-3, *ASME J. of Heat Transfer* 120 pp. 140-165
- [11] Zurcher, O., D. Favrat, J.R. Thome, 2000. Development of a diabatic two-phase flow pattern map for horizontal flow boiling, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 45 pp. 2931-301
- [12] Kawahara, A., P.M.-Y. Chung, M. Kawaji, 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. of Multiphase Flow* 28 pp. 1411-1435
- [13] Revellin, R. and Thome, J.R., 2006. New diabatic flow pattern map for evaporating flows in microchannels, 13th Int. Heat Transfer Conf., Sydney, Australia
- [14] Revellin, R., 2006. Experimental Two-Phase fluid flow in Microchannels, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2005/3437/EPFL_TH3437.pdf
- [15] Thome, J.R., V. Dupont and A. M. Jacobi, 2004. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of the model, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 47 pp. 3375-3385
- [16] Dupont, V., J. R. Thome and A. M. Jacobi, 2004. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part II: comparison with the database, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 47 pp. 3387-3401
- [17] Cheng, L., G. Ribatski and J. R. Thome, 2007. New prediction methods for CO₂ evaporation inside tubes: Part II—An updated general flow boiling heat transfer model based on flow patterns, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, In Press
- [18] Zhang, W., Hibiki, T. Mishima, K., 2004. Correlation for Flow Boiling Heat Transfer in Mini-channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5749-5763
- [19] Choi, K.I., A.S. Pamitran, C. Y. Oh, J. T. Oh, 2007. Boiling heat transfer of R-22, R-134a, and CO₂ in horizontal smooth minichannels, *Int. J. of Refrig.* 20 pp. 1-11
- [20] Steiner, D. and Taborek, J., 1992. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by asymptotic model, *Heat Transfer Eng.* 13 (2) pp. 43-69
- [21] Collier, J.G., Thome, J.R., 1994. Convective Boiling and Condensation, 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, England
- [22] Kandlikar, S.G., 1990. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, *J. of Heat Transfer* 112 pp. 219-228
- [23] Kandlikar, S.G., Mark E. Steinke, 2003. Predicting heat transfer during flow boiling in minichannels and microchannels, *ASHRAE Trans.: Symposia* 667-676
- [24] Wojtan, L., T. Ursenbacher and J.R. Thome, 2005. Investigation of flow boiling in horizontal tubes, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 48 pp. 2955-2985
- [25] Jacobi, A.M., J.R. Thome, 2002. Heat transfer model for evaporation of elongated bubble flows in microchannels, *J. of Heat Transfer* 124 pp. 1131-1136
- [26] Ribatski, G., L. Wojtan, J.R. Thome, 2006. An analysis of experimental data and prediction methods for two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer in micro-scale channels, *Exp. Thermal and Fluid Science* 31 pp. 1-19

- [27] Agostini, B., J.R. Thome, 2005. Comparison of an extended database for flow boiling heat transfer coefficients in multi-microchannels elements with three-zone model, ECI Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Italy
- [28] McAdams, W.H., 1954. Heat Transmission 3rd Ed., McGraw-Hill, New York
- [29] Triplett, K.A., S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski, 1998. Gas-liquid two-phase flow in microchannels, Int. J. of Multiphase F 25 pp. 377-410
- [30] Friedel, L., 1979. Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow, 3R Int. 18 pp. 485-492
- [31] Mishima, K. and Hibiki T., 1996. Some characteristics of air-air two-phase flow in small diameter vertical tubes, Int. J. of Multiphase Flow 22 pp. 703-712
- [32] Bergles, A.E., and S.G. Kandlikar, 2005. On the nature of critical heat flux in microchannels, J. of Heat Transfer, 127 pp. 101-107
- [33] Muller-Steinhagen, H., K. Heck, 1986. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes, Chem. Eng. Process 20 pp. 297-308
- [34] Katto, Y. and H. Ohno, 1984. An improved version of the generalized correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in uniformly heated vertical tubes, Int. J. of Heat Mass Transfer, 27 pp. 1641-1648
- [35] Qu, W. and Issam Mudawar, 2004. Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sink, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 47 pp. 2045-2059
- [36] Bowers, M.B. and Issam Mudawar, 1994. High flux boiling in low flow rate, low pressure drop mini-channel and micro-channel heat sinks, Int. J. of Heat and Mass Transfer 37 pp. 321-332
- [37] Wojtan, L., R. Revellin, J. R. Thome, 2006. Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel, Exp. Thermal and Fluid Science 30(8) pp. 765-774
- [38] Revellin, R. and J.R. Thome. A theoretical model for the prediction of the critical heat flux in heated microchannels, Int. J. of Heat Mass Transfer (2007)
- [39] Lazarek, G.M., and S.H. Black, 1982. Evaporating heat transfer, pressure drop, and critical heat flux in a small vertical tube with R-113, int. J. of Heat and Mass Transfer 25(7) pp. 945-960