

Two-Phase Flow Pattern Map pada Pipa Horizontal dengan Permukaan Halus (Review Paper)

Ronald Akbar*

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia,
Jl. Puspitek Serpong, Tangerang Selatan-Banten, Indonesia,15320

*E-mail: ronaldakbar@iti.ac.id

Diajukan: 20-06-2022; Direvisi: 08-12-2022; Dipublikasi: 23-12-2022

Abstrak

Untuk mengetahui pola (rejim) aliran dua fase yang mengalir pada suatu pipa, sampai sekarang terdapat dua metode yang dapat dilakukan yaitu dengan menggunakan *high speed camera* dan memprediksinya dengan menggunakan *flow pattern map*. Banyak penelitian terkait perancangan *two-phase flow pattern map* dilakukan dikarenakan mahalnya teknologi *high speed camera* ini yang membuat tidak semua peneliti dapat memilikinya. Pada penelitian ini, dilakukan sebuah *review* berbagai jurnal terkait penelitian *two-phase flow pattern map* aliran yang mengalir pada pipa horizontal dengan permukaan halus. Dari 18 jurnal dari berbagai peneliti dengan berbagai keadaan yang telah *direview*, didapat beberapa hasil yang didapatkan diantaranya: dengan berjalannya waktu diketahui bahwa penggunaan fluida kerja dalam penelitian berkembang dari air dan udara menjadi refrijeran, pipa yang digunakan semakin mengecil diameternya, dan dalam penelitiannya divalidasi dengan menggunakan *high speed camera*. Kemudian *flow pattern map* versi dahulu dikhawatirkan menimbulkan *delay* yang besar apabila dipaksa memprediksi data penelitian dengan fluida kerja refrijeran dan pipa skala mikro. Dari penelitian *review* ini dapat disimpulkan bahwa *flow pattern map* versi Wojtan et al. dianggap *reliable* dan memungkinkan untuk digunakan pada penelitian-penelitian berikutnya.

Kata kunci: aliran dua fase; pipa horizontal; pola aliran; *review* jurnal; *two-phase flow pattern map*

Abstract

To find out the pattern (regime) of a two-phase flow that flows in a tube, two methods can be done, using a high-speed camera and predicting it using a flow pattern map. Many studies related to the design of the two-phase flow pattern map were carried out due to the high cost of this high-speed camera technology which made not all researchers able to own it. In this study, a review of various journals related to the two-phase flow pattern map research was carried out on a flow case that flows in a horizontal tube with a smooth surface. Several results were obtained from 18 journals from various researchers with various circumstances that have been reviewed. It is known that the use of working fluid in research has evolved from water and air to refrigerants, and the tube used are getting smaller. And that research was validated by using a high-speed camera. Then it is feared that the previous version of the flow pattern map will cause a significant delay if forced to predict research data with refrigerant working fluids and micro-scale tubes. From this review study, it can be concluded that Wojtan et al.'s flow pattern map is considered reliable and possible to be used in further studies.

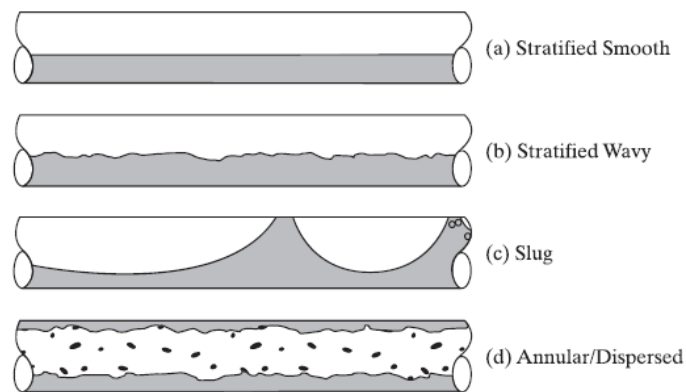
Keywords: flow pattern; horizontal tube; journal review; two-phase flow pattern map; two-phase flow

1. Pendahuluan

Aliran dua fase merupakan aliran fluida yang terdiri dari fase *liquid* dan fase *vapor* yang biasanya terjadi pada proses pendidihan dan kondensasi. Terdapat tiga model untuk mempelajari dan menganalisa aliran dua fase, diantaranya adalah *homogeneous flow model* yang mengasumsikan aliran dalam satu fase dengan properties fluida yang disesuaikan, *separated flow model* yang menganalisa aliran secara terpisah pada fase *liquid* dan *vapor*, dan *flow pattern model* yang menganalisa geometri aliran berdasarkan variasi dari konfigurasi pola aliran yang ditentukan ketika fase *liquid* dan *vapor* secara bersamaan mengalir pada suatu pipa [1]. Pada aliran dua fase, konfigurasi yang dibentuk oleh fase *liquid* dan *vapor* mempunyai bentuk-bentuk tertentu, konfigurasi-konfigurasi yang terbentuk ini disebut dengan pola aliran.

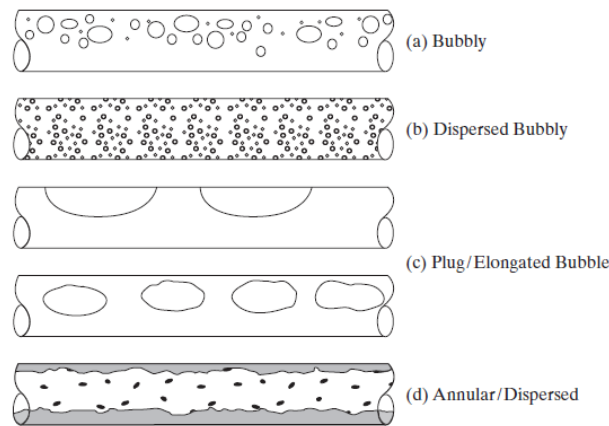
Pola aliran dua fase yang terbentuk pada pipa horizontal dipengaruhi oleh sifat termodinamika dan hidrodinamika [1]. Pola aliran ini diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan berdasarkan laju alirannya, yaitu pola dengan laju

aliran rendah dan pola dengan laju aliran tinggi [2]. Gambar 1 merupakan ilustrasi dari pola aliran dengan laju aliran rendah. Berdasarkan gambar tersebut, Pola aliran *stratified-smooth* (bagian a) terjadi pada laju aliran yang sangat rendah yang ditandai oleh munculnya fase *liquid* dan *vapor*. Kemudian seiring dengan bertambahnya laju aliran, akan terbentuk pola aliran *stratified-wavy* (bagian b) dimana interaksi hidrodinamik fase *liquid* dan *vapor* menghasilkan amplitudo yang besar. Pola aliran *slug* (bagian c) terjadi dengan laju aliran yang lebih tinggi sehingga menghasilkan gelombang yang cukup besar hingga dapat menyentuh permukaan atas pipa. Ketika laju aliran ditingkatkan lagi, maka akan terjadi pola aliran *annular/dispersed* (bagian d). Di mana akan terbentuk lapisan *liquid* pada permukaan atas dan bawah pipa, sedangkan lapisan *vapor* dengan *droplet* akan mengisi bagian inti dari permukaan pipa.



Gambar 1. Pola Aliran Dua Fase pada Pipa Horizontal dengan Laju Aliran Rendah [2]

Gambar 2 merupakan ilustrasi dari pola aliran dengan laju aliran tinggi. Dari gambar tersebut, pola aliran *bubbly* (bagian a) terdapat gelembung yang cenderung berkumpul di bagian atas permukaan pipa disebabkan adanya gaya buoyancy. Kemudian seiring dengan bertambahnya laju aliran akan terbentuk pola aliran *dispersed bubbly* (bagian b). Pada pola aliran ini akan terbentuk gelembung dengan diameter lebih kecil serta lebih banyak yang tersebar di seluruh bagian pipa. Pola aliran *plug/elongated bubble* (bagian c) terjadi pada saat gelembung pada pola aliran *bubbly* menyatu sehingga terbentuk gelembung dengan diameter yang lebih besar yang dapat disebut dengan Gelembung Taylor. Gelembung Taylor ini juga dapat menyatu dengan gelembung lainnya sehingga terbentuk gelembung yang lebih besar dan panjang di permukaan atas pipa. Pola aliran *annular-dispersed* (bagian d) memiliki bentuk yang sama dengan pola aliran *annular-dispersed* dengan laju aliran rendah. Namun perbedaannya adalah pola aliran ini terjadi pada laju aliran yang sangat tinggi.



Gambar 2. Pola Aliran Dua Fase pada Pipa Horizontal dengan Laju Aliran Tinggi [2]

Munculnya proses intensifikasi dalam upaya meningkatkan kualitas dan kuantitas barang produksi menimbulkan kesadaran pihak produsen untuk menerapkan proses tersebut, tidak terkecuali dalam bidang refrijerasi dan *air conditioning*. Pada bidang ini proses intensifikasi mendorong permintaan akan ukuran desain komponen seperti evaporator dan kondenser dalam ukuran yang lebih kecil. Kecilnya ukuran evaporator dan kondenser tersebut pastinya juga memerlukan pipa sebagai tempat mengalirnya fluida dengan ukuran yang lebih kecil. Namun, proses aliran dua fase dari fluida yang mengalir pada pipa berdiameter kecil tidak dapat diketahui dan dilihat langsung dengan prosedur yang sama seperti pada pipa berdiameter besar. Pola aliran yang menandai adanya proses perpindahan kalor pada pipa yang kecil dapat diketahui dengan memanfaatkan *high speed camera*. Tetapi sangat mahalnya teknologi ini menyebabkan sebagian besar peneliti tidak bisa memilikinya.

Metode lain yang dapat dilakukan adalah dengan memprediksi pola alirannya dengan menggunakan *flow pattern map*. *Flow pattern map* merupakan salah satu cara yang paling sering digunakan dalam memprediksi pola aliran dua fase [2]. Bentuk *flow pattern map* biasanya berupa grafik empiris dengan sumbu koordinat parameter yang berbeda-beda pada setiap versinya. Ada banyak bentuk *flow pattern map* yang dihasilkan dan akan terus berlanjut. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan *review* berbagai jurnal mengenai *two-phase flow pattern map* dari berbagai peneliti untuk aliran yang mengalir pada pipa horizontal dengan permukaan halus. Diharapkan dari hasil *review* jurnal ini, dapat diketahui karakteristik dari setiap *flow pattern map* dan dapat menentukan *flow pattern map* mana yang memungkinkan untuk digunakan pada penelitian-penelitian selanjutnya.

2. Metodologi

Sebanyak 18 jurnal dari berbagai peneliti yang melakukan penelitian terkait *two-phase flow pattern map* akan direview dan setiap jurnalnya berisi beragam keadaan. Dari segi *flow pattern map*, ada beberapa peneliti yang membuat *flow pattern map* nya sendiri, sampai dengan ada yang modifikasi *flow pattern map* dari peneliti lain. Dari segi fluida kerja yang digunakan bervariasi mulai dari air dan udara sampai dengan refrijeran. Kemudian juga diameter pipa yang digunakan dalam penelitiannya, beragam mulai dari pipa berdiameter besar hingga pipa kecil. Korelasi jurnal-jurnal yang direview mengenai *two-phase flow pattern map* ditampilkan pada Tabel 1.

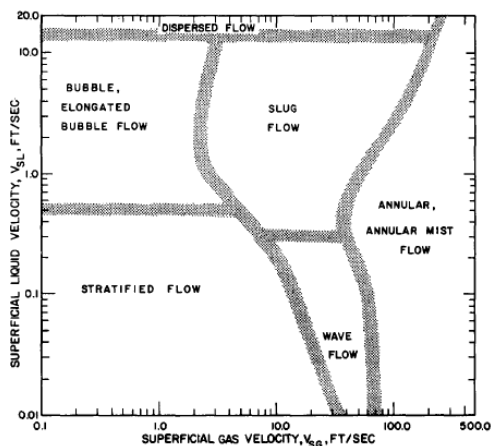
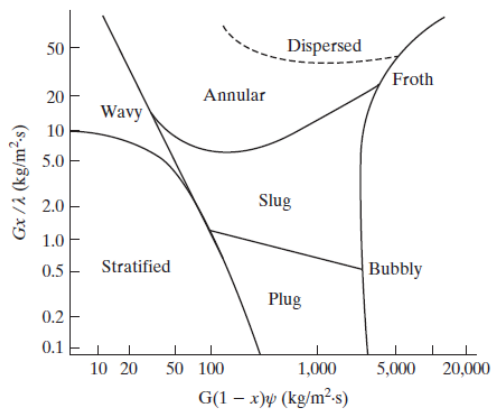
3. Hasil dan pembahasan

Sebanyak 18 jurnal dari berbagai penelitian mengenai *two-phase flow pattern map* pada pipa horizontal dengan permukaan halus telah direview. Dari jenis fluida kerja yang digunakan, pada awal munculnya penelitian yang *terpublish* mengenai *flow pattern map* ini, dimulai dari penelitian oleh Baker [3] sampai dengan akhir periode 1980 para peneliti cenderung menggunakan air dan udara sebagai fluida kerjanya. Namun seiring berjalannya waktu, dari awal periode 1990 sampai sekarang, banyak peneliti yang mulai menggunakan fluida kerja refrigeran. Baik refrigeran konvensional sebagai contoh R22 yang dilakukan oleh Wang et al. (1998) [7], refrigeran ramah lingkungan (natural) seperti CO₂ yang dilakukan oleh Cheng et al. [12], sampai juga memakai kedua jenis refrigeran tersebut.

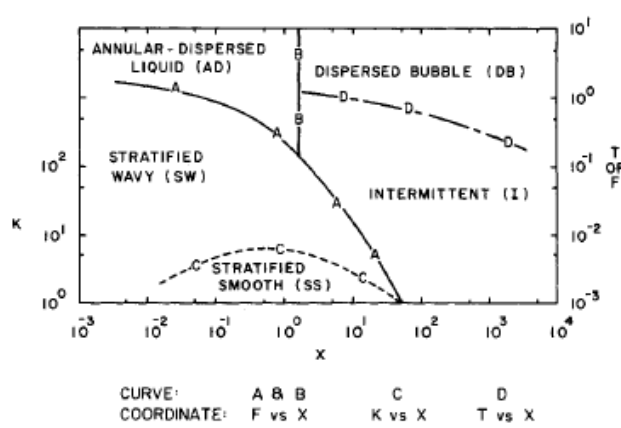
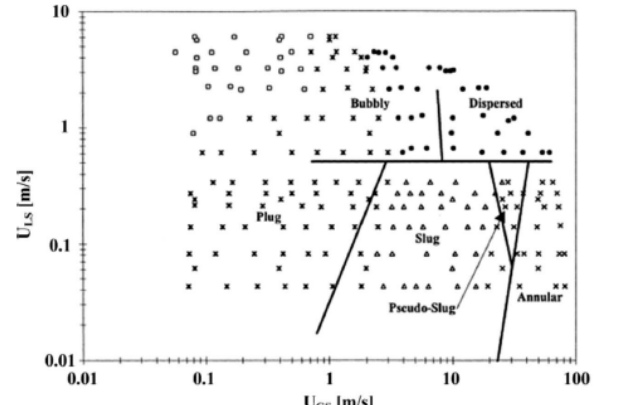
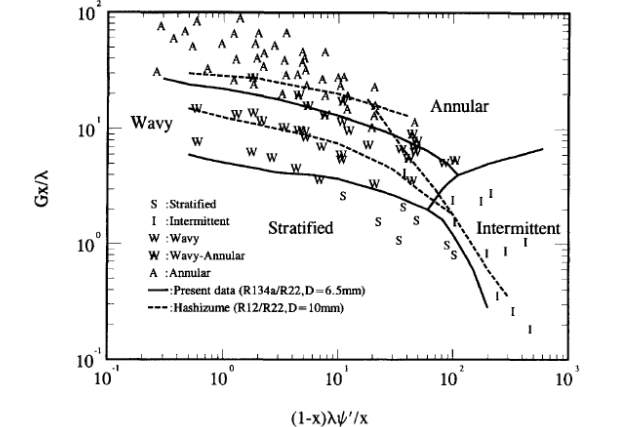
Kemudian dari diameter pipa yang digunakan, pada awal kemunculan penelitian ini, sampai awal periode 2010, kebanyakan peneliti menggunakan pipa berdiameter di atas 5 mm pada *experimental apparatusnya*. Sedangkan mulai periode 2010 sampai sekarang, sudah banyak juga yang menggunakan pipa berdiameter di bawah 5 mm, bahkan ada beberapa peneliti yang menggunakan pipa dengan skala mikro ($0,01 \text{ mm} \leq D \leq 0,1 \text{ mm}$) [2].

Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map*

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Baker (1953) [3]	$\lambda = \left\{ \frac{\rho_v}{\rho_a} \frac{\rho_l}{\rho_w} \right\}^{1/2}, \psi = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \right) \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3}$	Air-udara D _{in} = 22 – 254 mm
Mandhane et al. (1974) [4]	$\text{sumbu } x = X \cdot v_{sv}, \text{ sumbu } y = Y \cdot v_{sl}$ $X = \left(\frac{\rho_v}{0,0808} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_l}{62,4} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_v}{0,018} \right)^{0,2}$ $Y = \left(\frac{\mu_l}{1,0} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_l}{62,4} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,25}$	5935 data eksperimen dari peneliti lain D _{in} = 12,7 – 165,1 mm

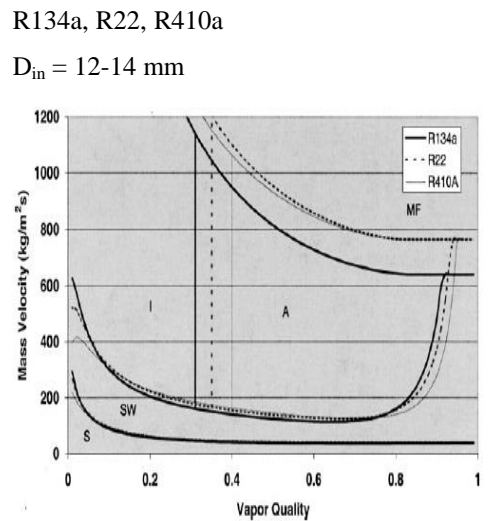
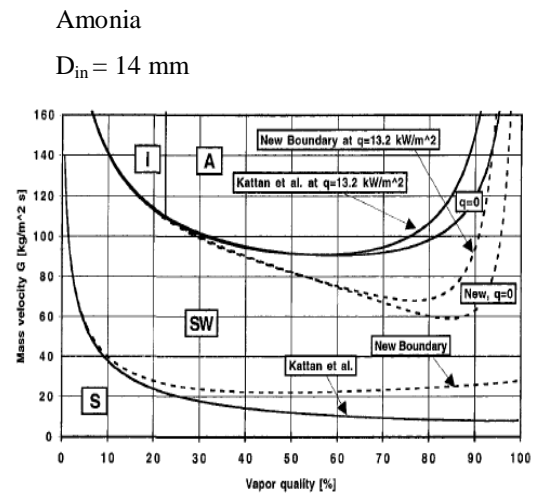
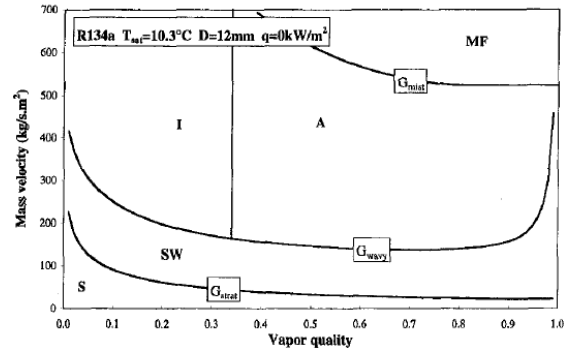


Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Taitel & Dukler (1976) [5]	$X = \left[\frac{\phi_v}{\phi_l} \right]^{1/2}, K = F^2 \cdot Re_L$ $T = \left[\frac{\phi_l}{(\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \cos \alpha} \right]^{1/2}$ $F = \left[\frac{\rho_v}{(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \cdot \frac{v_{sv}}{[D \cdot g \cdot \cos \alpha]^{1/2}}$	Air-udara, crude oil $D_{in} = 50 \text{ mm}$ 
Damianides & Westwater (1988) [6]	$\text{sumbu } x = X \cdot v_{sv}, \text{ sumbu } y = Y \cdot v_{sl}$ $X = \left(\frac{\rho_v}{0,08079} \right)^{0,1987} \left(\frac{\rho_l}{62,4} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,256} \left(\frac{\mu_v}{0,018} \right)^{0,305}$ $Y = \left(\frac{\mu_l}{1,0} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_l}{62,35} \frac{72,4}{\sigma} \right)^{0,25}$	Air-udara $D_{in} = 1-5 \text{ mm}$ 
Wang et al. (1998) [7]	$\lambda = \left\{ \frac{\rho_v}{\rho_a} \frac{\rho_l}{\rho_w} \right\}^{1/2}$ $\psi = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \right)^{1/4} \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3}$	R22, R134a, R407 $D_{in} = 1-5 \text{ mm}$ 

Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Kattan et al. (1998) [8]	$x = \left\{ \left[0,34^{1/0,875} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-1/1,75} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{-1/7} \right] + 1 \right\}^{-1}$ $G_{strat} = \left\{ \frac{226,3^2 A_{LD} A_{VD}^2 \rho_v (\rho_l - \rho_v) \mu_l g \cos \varphi}{x^2 (1-x) \pi^3} \right\}^{1/3}$ $G_{wavy} = \left\{ \frac{16 A_{VD}^3 g D \rho_l \rho_v}{x^2 \pi^2 (1 - (2h_{LD} - 1)^2)^{0,5}} \cdot \left[\frac{\pi^2}{25 h_{LD}^2} \cdot (1 - x)^{F_1(q)} \left(\frac{We}{Fr} \right)_l^{-F_2(q)} + \frac{1}{\cos \varphi} \right] \right\}^{1/2} + 50$ $G_{mist} = \left\{ \frac{7680 A_{VD}^2 g D \rho_l \rho_v}{x^2 \pi^2 \xi_{ph}} \cdot \left(\frac{We}{Fr} \right)_l \right\}^{1/2}$	R134a, R123, R402A, R404A, R123 D _{in} = 12 mm
Zurcher et al. (1999) [9]	$G_{strat} = \left\{ \frac{226,3^2 A_{LD} A_{VD}^2 \rho_v (\rho_l - \rho_v) \mu_l g \cos \varphi}{x^2 (1-x) \pi^3} \right\}^{1/3} + 20 \cdot x$ $G_{wavy} =$ $G_{wavy} (Kattan) - 75 e^{-[(x^2 - 0,77)^2 / x(1-x)]}$	Amonia D _{in} = 14 mm
Thome & El Hajal (2003) [10]	$x_{IA} = \left\{ \left[0,2914 \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-1/1,75} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{-1/7} \right] + 1 \right\}^{-1}$ $G_{mist} = \left\{ \frac{7680 A_{VD}^2 g D \rho_l \rho_v}{x^2 \pi^2 \xi_{ph}} \cdot \left(\frac{We}{Fr} \right)_l \right\}^{1/2}$ $G_{strat} = \left\{ \frac{226,3^2 A_{LD} A_{VD}^2 \rho_v (\rho_l - \rho_v) \mu_l g \cos \varphi}{x^2 (1-x) \pi^3} \right\}^{1/3} + 20 \cdot x$ $G_{wavy} =$ $G_{wavy} (Kattan) - 75 e^{-[(x^2 - 0,77)^2 / x(1-x)]}$	R134a, R22, R410a D _{in} = 12-14 mm



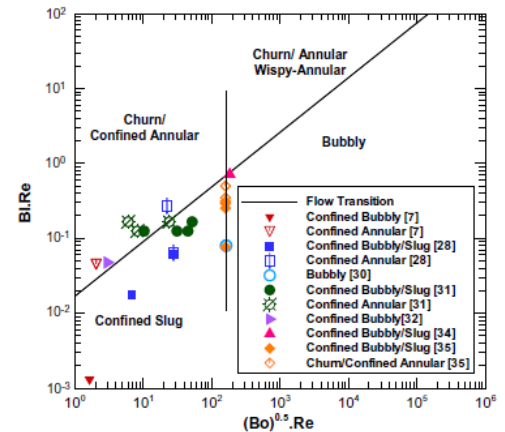
Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Wojtan et al. (2005) [11]	$x_{IA} = \left\{ \left[0,34^{1/0,875} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-1/1,75} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{-1/7} \right] + 1 \right\}^{-1}$ $G_{strat} = \left\{ \frac{226,3^2 A_{LD} A_{VD}^2 \rho_v (\rho_l - \rho_v) \mu_l g}{x^2 (1-x) \pi^3} \right\}^{1/3}$ $G_{wavy} = \left\{ \frac{16 A_{VD}^3 g D \rho_l \rho_v}{x^2 \pi^2 (1 - (2h_{LD} - 1)^2)^{0,5}} \cdot \left[\frac{\pi^2}{25 h_{LD}^2} \cdot (We)_l^{-1} + 1 \right] \right\}^{1/3}$ $G_{dryout} = \left[\frac{1}{0,235} \left(\ln \left(\frac{0,58}{x} \right) + 0,52 \right) \left(\frac{D}{\rho_v \sigma} \right)^{-0,17} \left(\frac{1}{g D \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{-0,37} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-0,25} \left(\frac{q}{q_{crit}} \right)^{-0,70} \right]^{0,926}$ $G_{mist} = \left[\frac{1}{0,0058} \left(\ln \left(\frac{0,61}{x} \right) + 0,57 \right) \left(\frac{D}{\rho_v \sigma} \right)^{-0,38} \left(\frac{1}{g D \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{-0,15} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,09} \left(\frac{q}{q_{crit}} \right)^{-0,27} \right]^{0,943}$	<p>R22 $D_{in} = 13,84 \text{ mm}$</p>
Cheng et al. (2008) [12]	$x_{IA} = \left\{ \left[0,8^{1/0,875} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-1/1,75} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{-1/7} \right] + 1 \right\}^{-1}$ $G_{strat} = \left\{ \frac{226,3^2 A_{LD} A_{VD}^2 \rho_v (\rho_l - \rho_v) \mu_l g}{x^2 (1-x) \pi^3} \right\}^{1/3}$ $G_{wavy} = \left\{ \frac{16 A_{VD}^3 g D \rho_l \rho_v}{x^2 \pi^2 (1 - (2h_{LD} - 1)^2)^{0,5}} \cdot \left[\frac{\pi^2}{25 h_{LD}^2} \cdot (We)_l^{-1} + 1 \right] \right\}^{1/3}$ $G_{dryout} = \left[\frac{1}{0,236} \left(\ln \left(\frac{0,58}{x} \right) + 0,52 \right) \left(\frac{D}{\rho_v \sigma} \right)^{-0,17} \left(\frac{1}{g D \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{-0,17} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-0,25} \left(\frac{q}{q_{crit}} \right)^{-0,27} \right]^{1,471}$ $G_{mist} = \left[\frac{1}{0,502} \left(\ln \left(\frac{0,61}{x} \right) + 0,57 \right) \left(\frac{D}{\rho_v \sigma} \right)^{-0,16} \left(\frac{1}{g D \rho_v (\rho_l - \rho_v)} \right)^{-0,15} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,09} \left(\frac{q}{q_{crit}} \right)^{-0,27} \right]^{1,613}$	<p>CO₂ $D_{in} = 10 \text{ mm}$</p>
Barbieri et al. (2008) [13]	$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0,1}$ $Fr_l = 3,75 \cdot X_{tt}^{2,40}$	<p>R134a $D_{in} = 6,2-12,6 \text{ mm}$</p>

Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
------------------	-----------	--------------------

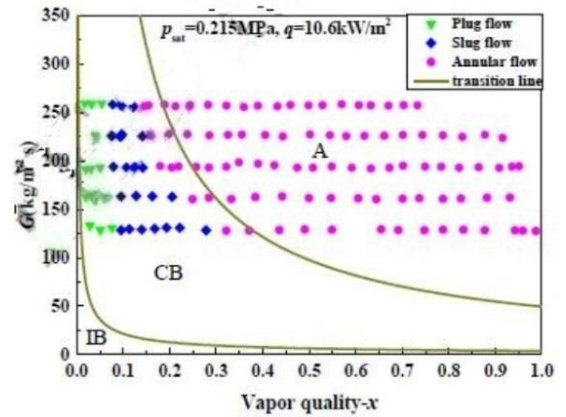
Harirchian & Garimella (2010) [14]	$Bo = \frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot D^2}{\sigma}$ $Bl = 0,017 (Bo^{0,4} \cdot Re^{-0,3})$	Air, FC72, FC77, R134a $D_{in} = 0,1-0,4 \text{ mm}$
------------------------------------	---	---



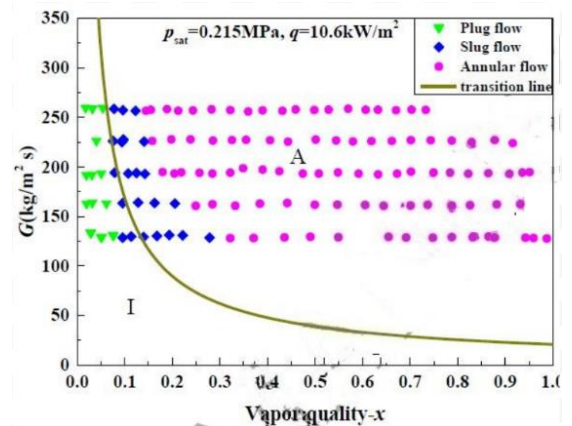
Ong & Thome (2011) [15]	$x_{IB/CB} = 0,36 \cdot (Co^{0,20}) \cdot \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,9} \cdot Re_v^{0,75} \cdot Bl^{0,25} \cdot We_l^{-0,91}$	R134a, R236fa, dan R245fa $D_{in} = 0,1-0,4 \text{ mm}$
-------------------------	--	--

$$x_{CB/A} = 0,047 \cdot (Co^{0,05}) \cdot \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,6} \cdot Re_v^{0,8} \cdot We_l^{-0,91}$$

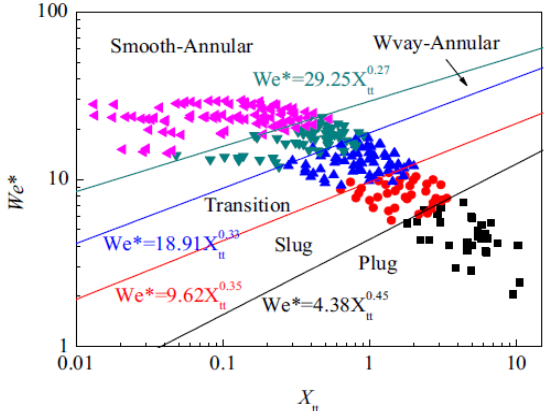
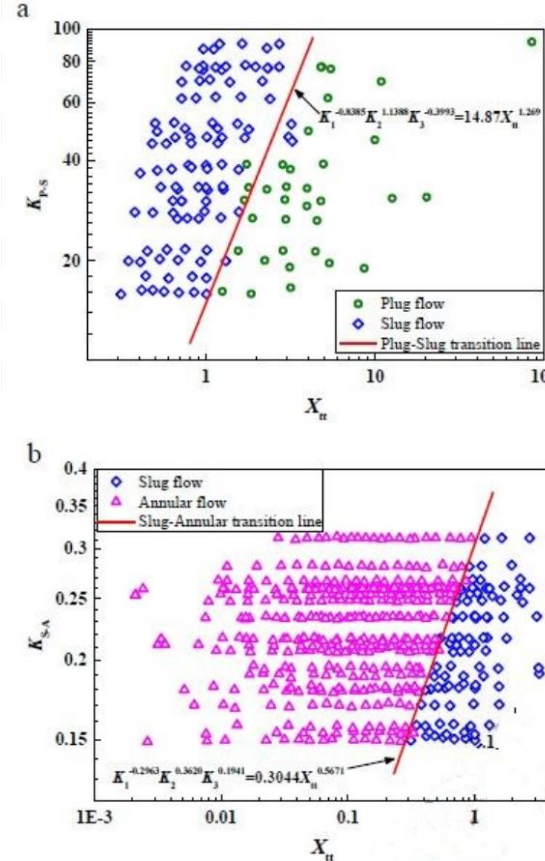
$$x_{S-P/CB} = 9 \cdot (Co^{0,20}) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,9} \cdot Fr_v^{-1,2} \cdot Re_l^{0,1}$$



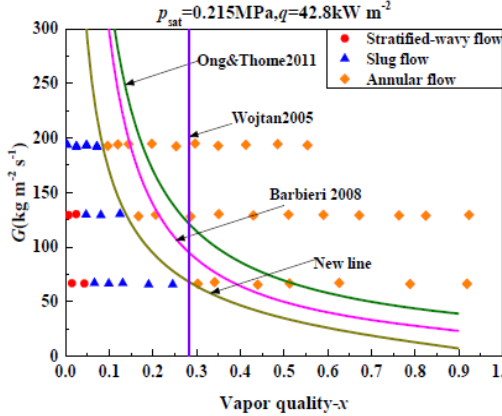
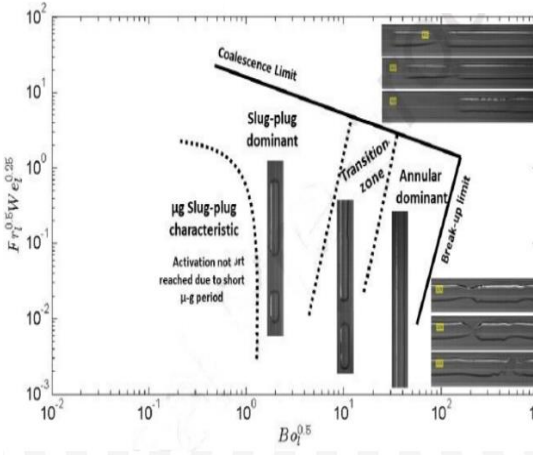
Costa-Patry & Thome (2013) [16]	$x_{CB/AF} = 425 \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,6} \cdot \frac{Bl^{1,1}}{Co^{0,5}}$	R134a, R1234ze, R254fa $D_{in} = 0,146-3,04 \text{ mm}$
---------------------------------	--	--



Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Zhuang et al. (2016) [17]	<p><i>Smooth-annular to wavy-annular flow:</i> $We^* = 29,25 \cdot X_{tt}^{0,27}$</p> <p><i>Wavy-annular to transition flow:</i> $We^* = 18,91 \cdot X_{tt}^{0,33}$</p> <p><i>Transition to slug flow:</i> $We^* = 9,62 \cdot X_{tt}^{0,35}$</p> <p><i>Transition to slug flow:</i> $We^* = 4,38 \cdot X_{tt}^{0,45}$</p> <p>Jika $Re_l \leq 1250$, maka :</p> $We^* = 2,45 \frac{Re_v^{0,64}}{Su_v^{0,3} (1 + X_{tt}^{0,039})^{0,4}}$	<p>R170 $D_{in} = 4 \text{ mm}$</p> 
Yang et al. (2018) [18]	<p>$K_1 = \left(\frac{q}{G \cdot i_{lv}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_l}{\rho_v}$, $K_2 = \left(\frac{q}{i_{lv}}\right)^2 \cdot \frac{D}{\rho_v \cdot \sigma}$</p> <p>$K_3 = \frac{\mu_l \cdot G}{(\rho_l - \rho_v) \cdot \rho_l \cdot g \cdot D^2}$</p> <p><i>Plug to Slug</i> = $K_{p-s} =$ $K_1^{-0,8385} \cdot K_2^{1,1388} \cdot K_3^{-0,3993} = 14,87 \cdot X_{tt}^{1,269}$</p> <p><i>Slug to Annular</i> = $K_{s-a} =$ $K_1^{-0,2963} \cdot K_2^{0,3260} \cdot K_3^{0,1941} = 0,3044 \cdot X_{tt}^{0,5671}$</p>	<p>R1234ze $D_{in} = 6 \text{ mm}$</p> 

Tabel 1. Korelasi Jurnal *Two-Phase Flow Pattern Map* (Lanjutan)

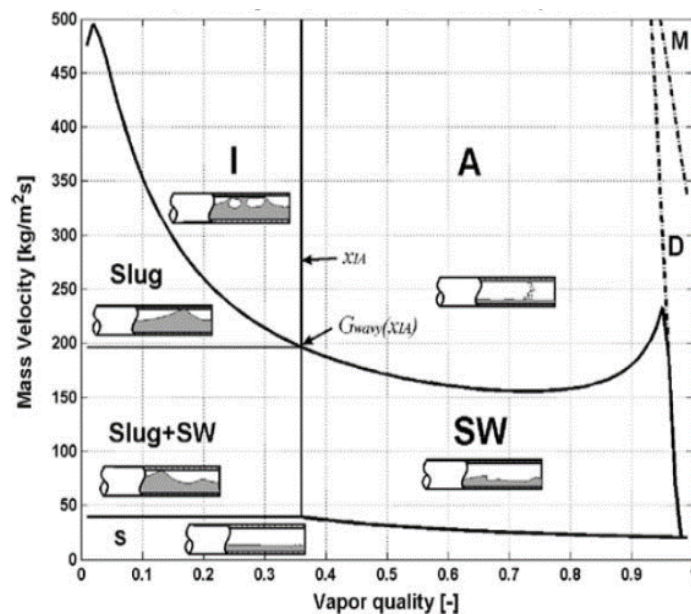
Peneliti (Tahun)	Persamaan	Kondisi Penelitian
Yang et al. (2019) [19]	$\log \left(\frac{Fr_L}{We_{l,BL}} \right) = 0,8 \cdot \log X_{tt} + 2,57 \frac{q}{q_{crit}} - 3,81$	R600a $D_{in} = 6 \text{ mm}$
		
Pietrasanta et al. (2020) [20]	<p><i>Slug – Plug Dominant to Transitional Regime</i> = $Fr^{0,25} \cdot We^{0,25} = 0,0059 \cdot (Bo^{0,5})^{2,45}$</p> <p><i>Transitional Regime to Annular Dominant</i> = $Fr^{0,25} \cdot We^{0,25} = 0,0009 \cdot (Bo^{0,5})^{2,02}$</p> <p><i>Upper Limit (Coalescence)</i> = $Fr^{0,25} \cdot We^{0,25} = 12,42 \cdot (Bo^{0,5})^{-0,69}$</p> <p><i>Right Limit (Break Up)</i> = $Fr^{0,25} \cdot We^{0,25} = 6 \times 10^{-7} \cdot (Bo^{0,5})^{-294}$</p>	FC72 $D_{in} = 2 \text{ mm}$
		

Pada *review* jurnal ini. Para peneliti seperti Baker [3], Mandhane et al. [4], Taitel dan Dukler [5], Damianides dan Westwater [6], Wang et al. [7], dan Kattan et al [8] cenderung menciptakan *flow pattern* map-nya sendiri dan mengujinya, walaupun, selain menggunakan data sendiri mereka juga menggunakan data dari peneliti-peneliti lain. Sedangkan periode setelahnya kebanyakan peneliti memodifikasi *flow pattern map* dari peneliti lain. Bahkan penelitian-penelitian terkini terkait *flow pattern map* hanya memodifikasi satu kurva transisinya saja, yang hasilnya divalidasi dengan *high speed camera*.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa penelitian terkini terkait *flow pattern map* kebanyakan menggunakan diameter pipa yang cenderung kecil dan refrijeran ramah lingkungan sebagai fluida kerjanya. Ada beberapa alasan mengapa hal tersebut dapat terjadi. Banyak refrijeran ramah lingkungan digunakan untuk menggantikan refrijeran dengan nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan *Global Warming Potential* (GWP) tinggi yang berpotensi menyebabkan kerusakan ozon dan meningkatkan efek global warming [21]. Kemudian menurut hasil uji coba *heat pump* pada WPZ Toss Switzerland [22], R290 merupakan refrijeran kedua terbanyak yang digunakan pada

heat pump setelah R407C dengan presentase 12 % dari heat pump yang diuji coba pada tahun 2002. Berdasarkan perkembangan fluida kerja dan diameter pipa pada penelitian terkait *flow pattern map*, dikhawatirkan *flow pattern map* versi dahulu yang dikembangkan menggunakan fluida kerja air dan udara, dan menggunakan pipa berdiameter besar akan menyebabkan ketidak-sesuaian atau *delay* yang besar dalam memprediksi pola aliran apabila dipaksa memprediksi data aliran dua fase dari refrijerasi yang mengalir pada pipa berdiameter kecil. Hal ini sesuai juga dengan pernyataan yang dikemukakan oleh Pamitran et al. [23].

Diantara 18 jurnal yang direview, terdapat satu nama peneliti yang berdampak pada penelitian mengenai *flow pattern map*, yaitu John Richard Thome. Pada review ini, penelitian dari Kattan et al. [8], Zurcher et al. [9], Thome dan El Hajal [10], Wojtan et al. [11], Cheng et al. [12], Ong dan Thome [15], dan Costa-Patry dan Thome [6] satu grup dengan John Richard Thome. Di dalam dunia aliran dua fase, John Richard Thome merupakan salah satu tokoh yang memiliki pengaruh besar. Penelitian-penelitian *flow pattern map* yang dikembangkan oleh grup dari John Robert Thome selalu konsisten menggunakan parameter *vapor quality* x pada sumbu x dan *mass flux/mass velocity* G pada sumbu y. Sehingga relatif mudah dalam melakukan komparasi antar *flow pattern map*nya. Kemudian penulis berpendapat kalau *flow pattern map* versi Wojtan et al. [11] merupakan *flow pattern map* yang *reliable* untuk dimanfaatkan walaupun sangat memungkinkan terjadi banyak *delay* apabila dipakai untuk memprediksi aliran fluida pada pipa skala mini sampai mikro. Hal tersebut dikarenakan *flow pattern map* versi ini merupakan pengembangan final dari *flow pattern map* yang dikembangkan Kattan et al. [8]. Gambar 3 di bawah ini kembali diperlihatkan *flow pattern map* yang dikembangkan oleh Wojtan et al. [11].



Gambar 3. Flow Pattern Map Versi Wojtan et al. [11]

Aliran dua fase terjadi dikarenakan adanya perpindahan kalor didih (*boiling heat transfer*) pada fluida kerjanya. Bagian dari perpindahan kalor didih adalah koefisien perpindahan kalor (*heat transfer coefficient*) yang nantinya akan mempengaruhi kualitas laju perpindahan kalor (*heat transfer rate*). Koefisien perpindahan kalor pada aliran dua fase dapat diteksi dari pola alirannya. Banyak hasil penelitian yang mengau pada pola aliran versi Wojtan et al. [11] ini untuk menyimpulkan karakteristik koefisien perpindahan kalor pada aliran dua fase, namun kesimpulannya berbeda-beda. Da Silva Lima et al., [24] Ducoulombier et al., [25] dan Grauso et al. [26] menyimpulkan bahwa koefisien

perpindahan kalor meningkat nilainya seiring dengan meningkatnya *vapor quality* x sampai aliran memasuki pola aliran *dry out*, kemudian nilainya akan berkurang drastis pada pola aliran *mist* dikarenakan fase *vapor* mulai mendominasi aliran yang juga menyebabkan berkurangnya kualitas laju perpindahan kalor. Namun Hamdar et al., [27] Saisorn et al., [28] Anwar et al., [29] dan Shiferaw et al. [30] berpendapat bahwa nilai koefisien perpindahan kalor tidak dipengaruhi oleh *vapor quality* x . Dalam perkembangannya setelah *flow pattern map* versi Wojtan et al. [11], *pattern map* terkini lebih fokus memodifikasi pada satu kurva transisi saja, ditambah adanya validasi dengan *high speed camera*.

Kendala dalam melakukan *review* jurnal ini diantaranya adalah, khusus pada jurnal yang cukup lama seperti pada penelitian Baker [3], sangat sulit untuk menemukan file jurnal aslinya. Namun informasinya banyak terangkum dalam buku-buku atau jurnal terkait aliran dua fase. Kendala lainnya adalah sangat sulit untuk menemukan jurnal terbaru mengenai penelitian ini. Jurnal terbaru yang penulis *review* adalah jurnal dari Pietrasanta et al. [20] yang terbit pada tahun 2020.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil *review* dan pembahasan yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai *two-phase flow pattern map* periode dahulu menggunakan fluida kerja air dan udara dengan diameter pipa yang besar pada *experimental apparatusnya*. Seiring berjalannya waktu, mulai digunakan refrijeran sebagai fluida kerja dengan diameter pipa yang lebih kecil. Dikarenakan penggunaan diameter pipa yang lebih kecil, dikhawatirkan *flow pattern map* versi dahulu akan kurang valid dalam memprediksi data aliran dari fluida kerja. Kemudian *flow pattern map* versi Wojtan et al. [11] merupakan *flow pattern map* yang dinilai *reliable* dan memungkinkan digunakan pada penelitian-penelitian selanjutnya. Hal terakhir yang dapat disimpulkan dari proses *review* ini adalah adanya kendala dalam menemukan file jurnal-jurnal versi terdahulu, dan kesulitan dalam mencari penelitian terkini terkait *flow pattern map* pada aliran yang mengalir pada pipa horizontal dengan permukaan halus.

Daftar Pustaka

- [1] Collier, J.G. and J.R. Thome, Convective boiling and condensation. 1994: Clarendon Press.
- [2] Ghiaasiaan, S.M., Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation: In Conventional and Miniature Systems. 2017: Cambridge University Press.
- [3] Baker, O. Design of pipelines for the simultaneous flow of oil and gas. in Fall meeting of the petroleum branch of AIME. 1953. OnePetro.
- [4] Mandhane, J., G. Gregory, and K. Aziz, A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes. International journal of multiphase flow, 1974. 1(4): p. 537-553.
- [5] Taitel, Y. and A.E. Dukler, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE journal, 1976. 22(1): p. 47-55.
- [6] Damianides, C. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes. in Proc. 2nd UK Natn Conf. Heat Transf., 1988.
- [7] Wang, C.-C., C.-S. Chiang, and D.-C. Lu, Visual observation of two-phase flow pattern of R-22, R-134a, and R-407C in a 6.5-mm smooth tube. Oceanographic Literature Review, 1998. 2(45): p. 418.
- [8] Kattan, N., J. Thome, and D. Favrat, Flow boiling in horizontal tubes: part 1—development of a diabatic two-phase flow pattern map. 1998.

- [9] Zurcher, O., J. Thome, and D. Favrat, Evaporation of ammonia in a smooth horizontal tube: heat transfer measurements and predictions. 1999.
- [10] Thome, J.R. and J.E. Hajal, Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes: latest version. *Heat Transfer Engineering*, 2003. 24(6): p. 3-10.
- [11] Wojtan, L., T. Ursenbacher, and J.R. Thome, Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map. *International journal of heat and mass transfer*, 2005. 48(14): p. 2955-2969.
- [12] Cheng, L., et al., New prediction methods for CO₂ evaporation inside tubes: Part I—A two-phase flow pattern map and a flow pattern based phenomenological model for two-phase flow frictional pressure drops. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. 51(1-2): p. 111-124.
- [13] Barbieri, P., J. Jabardo, and E. Bandarra Filho. Flow patterns in convective boiling of refrigerant R-134a in smooth tubes of several diameters. in *Proceedings of the 5th European Thermal-Sciences Conference*, Eindhoven, The Netherlands. 2008. Citeseer.
- [14] Harirchian, T. and S.V. Garimella, A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010. 53(13-14): p. 2694-2702.
- [15] Ong, C.L. and J. Thome, Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1—Two-phase flow patterns and film thickness measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011. 35(1): p. 37-47.
- [16] Costa-Patry, E. and J.R. Thome, Flow pattern-based flow boiling heat transfer model for microchannels. *International Journal of Refrigeration*, 2013. 36(2): p. 414-420.
- [17] Zhuang, X., et al., Two-phase flow pattern map for R170 in a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016. 102: p. 1141-1149.
- [18] Yang, Z.-Q., et al., A new flow pattern map for flow boiling of R1234ze (E) in a horizontal tube. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018. 98: p. 24-35.
- [19] Yang, Z.-Q., et al., A new diabatic two phase flow pattern transition model of R600a. *International Journal of Refrigeration*, 2019. 99: p. 138-144.
- [20] Pietrasanta, L., et al., Developing flow pattern maps for accelerated two-phase capillary flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020. 112: p. 109981.
- [21] La Rocca, V. and G. Panno, Experimental performance evaluation of a vapour compression refrigerating plant when replacing R22 with alternative refrigerants. *Applied energy*, 2011. 88(8): p. 2809-2815.
- [22] Ausbildungszentrum, W.u., Töss, Zusammenstellung von Leistungsdaten von Wärmepumpen. Töss, Schweiz, 2002.
- [23] Pamitran, A.S., K.-I. Choi, and J.-T. Oh, Evaporation heat transfer coefficient in single circular small tubes for flow natural refrigerants of C₃H₈, NH₃, and CO₂. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011. 37(7): p. 794-801.
- [24] Da Silva Lima RJ, Quibén JM, Thome JR. Flow boiling in horizontal smooth tubes: New heat transfer results for R-134a at three saturation temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(7):1289-98.
- [25] Ducoulombier M, Colasson S, Bonjour J, Haberschill P. Carbon dioxide flow boiling in a single microchannel—Part II: Heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011;35(4):597-611.
- [26] Grauso S, Mastrullo R, Mauro A, Thome J, Vanoli GP. Flow pattern map, heat transfer and pressure drops during evaporation of R-1234ze (E) and R134a in a horizontal, circular smooth tube: Experiments and assessment of predictive methods. *International journal of refrigeration*. 2013;36(2):478-91.

- [27] Hamdar M, Zoughaib A, Clodic D. Flow boiling heat transfer and pressure drop of pure HFC-152a in a horizontal mini-channel. *International Journal of Refrigeration*. 2010;33(3):566-77.
- [28] Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S. Two-phase flow of R-134a refrigerant during flow boiling through a horizontal circular mini-channel. *Experimental thermal and fluid science*. 2011;35(6):887-95.
- [29] Anwar Z. Evaporative heat transfer with R134a in a vertical minichannel. *Pakistan Journal of Engineering And Applied Sciences*. 2016.
- [30] Shiferaw D, Huo X, Karayiannis T, Kenning D. Examination of heat transfer correlations and a model for flow boiling of R134a in small diameter tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(25-26):5177-93.