

Pemodelan dan Analisis Perpindahan Kalor Pada Microchannel Heat Exchanger Tipe Evaporator

Ardiyansyah Yatim*, Anugrah Reva

¹Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus Barui UI Depok, Jawa Barat, Indonesia 16424

*ardiyansyah@eng.ui.ac.id

Abstrak

Sebuah model penyelesaian secara numerik pada sebuah microchannel heat exchanger tipe evaporator berdiameter hidrolis 1.46 mm dengan desain fin-louvered satu pass. Microchannel heat exchanger merupakan salah satu teknologi terkini pada alat pendingin tata udara dan refrijerasi yang mampu memberikan kinerja dan daya perpindahan kalor yang lebih efisien. Model persamaan numerik yang digunakan merupakan persamaan yang telah digunakan pada penelitian microchannel dan pendekatan segment-by-segment yang diterapkan pada microchannel heat exchanger untuk menghitung besarnya nilai heat transfer coefficient pada dua fluida refrijeran berbeda yaitu R410A dan refrijeran hidrokarbon propane. Simulasi menggunakan variable pada laju aliran massa refrijeran dan diperoleh bahwa besarnya laju aliran massa fluida refrijeran akan berbanding lurus dengan besarnya heat transfer coefficient pada microchannel heat exchanger. Besarnya heat transfer coefficient pada laju aliran massa fluida refrijeran 0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s adalah berturut turut 262 – 292 W/m²K, 456 – 501 W/m²K, dan 626 – 685 W/m²K. Adapun kualitas luaran fluida refrijeran yang dihasilkan pada laju aliran massa refrijeran tersebut adalah berturut turut 0.23 – 0.46, 0.23 – 0.44, dan 0.23 – 0.42.

Kata kunci : Evaporator, Microchannel, Heat Transfer, R410A, Propane

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.

Metode fabrikasi terkini yang dapat membuat saluran mikro, antara lain: micromachining silicon wafers, micro-extrusion komponen aluminium [1], anisotropic wet chemical etching and sawing, anisotropic dry etching, hybridization and system-onchip integration[2].

Walaupun perkembangan aplikasi saluran mikro pada alat penukar kalor telah meluas, namun hingga saat ini penerapannya hanya didasarkan pada pengujian-pengujian ekstensif yang cukup mahal dan memakan waktu. Belum adanya metode perancangan kalor yang handal karena pemahaman yang terbatas pada fenomena thermal-hydraulic yang terjadi pada saluran skala mikro, terutama mekanisme perpindahan kalor dididih dua fase dengan fluida refrijeran.

Tulisan ini menyajikan analisis dan simulasi perpindahan kalor pada saluran mikro evaporator. Data rancangan microchannel heat exchanger [3], digunakan sebagai input simulasi pada pemrograman MATLAB. Model simulasi ini menggunakan metode *segment by segment* yang membagi microchannel heat exchanger menjadi bagian bagian kecil pada aliran fluida refrijerannya. Simulasi ini juga akan didasarkan atas asumsi persamaan numerik untuk mendapatkan pendekatan karakteristik koefisien perpindahan kalor pada heat exchanger dengan pendekatan keseimbangan energi dan metode effectiveness-NTU. Hasil simulasi ini diharapkan mampu memberikan model dengan pendekatan secara numerik dan memudahkan untuk mendesain ulang kembali microchannel heat exchanger untuk memperoleh performansi yang optimal.

Metodologi Penelitian

Pendekatan segmentasi ini digunakan dalam penelitian ini untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan kalor microchannel heat exchanger. Prinsip metode ini adalah microchannel heat exchanger dibagi atas beberapa segmentasi sebagai volume terkontrol (control volume) dimana nilai masukan pada segmentasi yang pertama merupakan data awal yang sudah didefinisikan terlebih dahulu. Nilai keluaran yang akan dihasilkan dari segmentasi pertama akan menjadi nilai masukan pada segmentasi kedua dan begitu seterusnya hingga keseluruhan microchannel heat exchanger terkalkulasi. Semakin banyak segmentasi (control volume) yang terdapat pada microchannel heat exchanger maka nilai perpindahan kalor yang diperoleh akan semakin akurat. Bigi [4] telah melakukan pemodelan efek jumlah campuran minyak kompresor dengan fluida refrijeran R410A pada microchannel heat exchanger type condenser dengan diameter hidrolis 1.7

mm. Pemodelan ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan FORTRAN untuk menghitung besarnya nilai perpindahan kalor h serta membandingkannya dengan model pada literature tertentu. Pemodelan ini menggunakan metode *segment by segment* dalam menghitung besarnya nilai perpindahan kalor. Perhitungan pada kondisi keluaran segmen pertama akan menjadi kondisi masukan pada segmen berikutnya dan pola ini diterapkan ke segmen berikutnya hingga keseluruhan heat exchanger. Flowchart program ditampilkan pada gambar 1.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besarnya nilai segmen yang diterapkan pada simulasi microchannel heat exchanger akan memperlihatkan bahwa nilai hasil keluaran dari setiap segmen akan berbeda beda. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya nilai segmen yang diaplikasikan pada microchannel heat exchanger untuk melakukan simulasi maka akan menghasilkan nilai keluaran yang lebih akurat karena microchannel heat exchanger akan dilakukan proses perhitungan pada keadaan segmen yang sangat kecil.

Adapun dalam menyelesaikan permasalahan ini terdapat beberapa asumsi asumsi untuk menyederhanakan persamaan persamaan numerik yang akan dipakai :

- Distribusi kecepatan aliran dan tekanan masuk pada sisi udara adalah dianggap konstan.
- Relative humidity pada sisi udara masuk dan keluar adalah dianggap konstan.
- Distribusi kecepatan aliran dan temperature masuk pada sisi refrijeran adalah dianggap konstan.
- Tekanan fluida refijeran dianggap konstan pada microchannel heat exchanger.
- Heat transfer pada header diabaikan.
- Microchannel heat exchanger type evaporator dianggap pada kondisi dry

surface (tidak terjadinya pengembunan sehingga timbulnya titik titik air pada evaporator).

$$\left(\frac{T_d}{L_p}\right)^{-0,23} \left(\frac{L_l}{L_p}\right)^{0,68} \left(\frac{T_p}{L_p}\right)^{-0,28} \left(\frac{\delta_f}{L_p}\right)^{-0,05} \quad (1)(2)$$

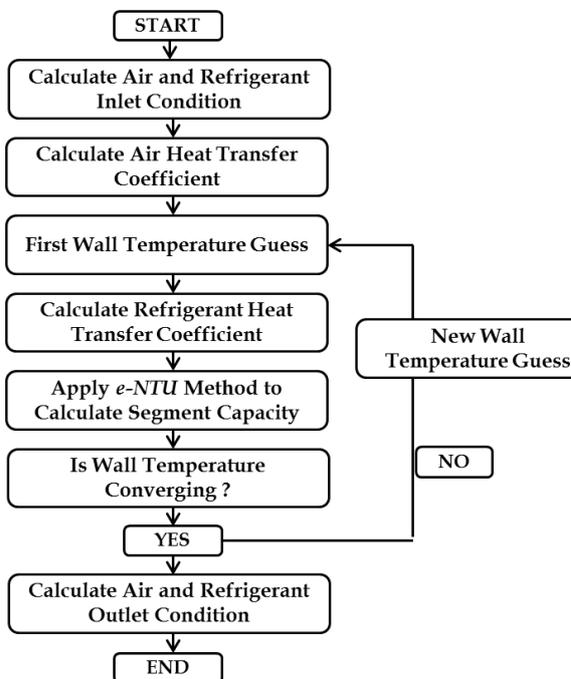


Figure 1 Flowchart pemodelan heat exchanger

Microchannel Heat Exchanger

Evaporator yang dimodelkan merupakan tipe 1 pass louvered-fin berbahan aluminium. Detail spesifikasi ditampilkan di Tabel 1 dan gambar skema pada gambar 1.

Pada sisi udara, colburn j - factor diberikan oleh persamaan (1) [5] dimana besarnya bilangan Reynolds dan ketujuh bilangan tak berdimensi lainnya akan sangat mempengaruhi besarnya nilai perpindahan kalor yang disebabkan oleh udara dan oleh fin microchannel heat exchanger berbentuk louvered. Adapun persamaan tersebut adalah sesuai dengan persamaan colburn j - factor dengan catatan bahwa $100 < Re_{Lp} < 3000$:

$$j = Re_{Lp}^{-0,49} \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0,27} \left(\frac{F_p}{L_p}\right)^{-0,14} \left(\frac{F_l}{L_p}\right)^{-0,29}$$

Serta besarnya nilai koefisien perpindahan kalor yang terjadi adalah:

$$h_{air\ side} = \frac{j\ c_p\ G_{max}}{Pr^{2/3}} \quad (2)$$

Pada sisi refrijeran persamaan berikut digunakan [6].

$$\alpha_{fb} = \alpha_{nb} + \alpha_{fc} \quad (3)$$

$$\alpha_{nb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0,79} c_{pl}^{0,45} \rho_l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} h_{fg}^{0,24} \rho_v^{0,24}} (T_w - T_{sat})^{0,24} [P_{sat}(T_w) - P_l]^{0,75} \quad (4)$$

$$\alpha_{fc} = 0.023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{\lambda_l}{D_h}\right) \quad (5)$$

Dimana α_{fb} merupakan koefisien perpindahan kalor *flow boiling*, α_{nb} merupakan koefisien perpindahan kalor *nucleate boiling* dan α_{fc} merupakan koefisien perpindahan kalor *forced convective*.

Table 1 Spesifikasi heat exchanger

Parameter	Dimensi
Height (H)	0.438 m
Sectional cross flow area of one entire tube (A_{flow})	18.5 mm ²
Hydraulic diameter of one entire tube (D_h)	1.46 mm
Microchannel tube depth	25.4 mm
Microchannel tube spacing	7.44 mm
Microchannel tube thickness	0.35 mm
Fin Pitch	0.79 fin/mm
Fin Height	7.44 mm
Louver length	6 mm

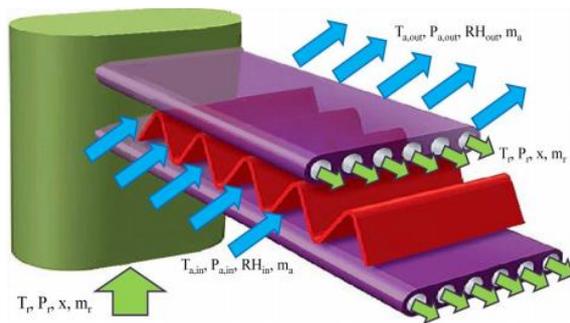


Figure 2 Skema perpindahan kalor pada mchx[7]

Dari persamaan (5) terlihat bahwa besarnya perpindahan kalor pada *nucleate boiling* ditentukan oleh banyak parameter yang sudah ditentukan terlebih dahulu kecuali besarnya nilai *wall temperature*. Untuk menentukan besarnya nilai T_w (*wall temperature*) diperlukan proses iterasi dimana diperlukan persamaan lainnya untuk menghasilkan nilai yang konvergen dengan nilai yang ditebak dengan nilai yang terhitung. Nilai awal (*guess value temperature*) pada T_w akan menghasilkan nilai perpindahan kalor dua fase pada *microchannel heat exchanger* dan nilai tersebut digunakan untuk menghitung besarnya nilai kalor yang diserap oleh segmen *microchannel heat exchanger* atau Q_{seg} dengan menggunakan metode persamaan *effectiveness-NTU*.

Hasil dan Pembahasan

Kinerja perpindahan kalor refrigeran propane disajikan pada gambar 3. Pada temperature saturasi yang sama, koefisien perpindahan kalor meningkat seiring dengan peningkatan kualitas uap refrigeran sepanjang microchannel. Peningkatan perpindahan kalor ini disebabkan oleh perubahan pola aliran dua fase menjadi anular yang dominan pada saluran mikro[8]. Peningkatan pada kisaran kualitas ini dijelaskan pula oleh meningkatnya kontribusi convective boiling α_{fc} pada persamaan (3). Koefisien perpindahan kalor akan berada pada nilai maksimum pada kisaran kualitas 0.6-0.8 dan kemudian akan menurun seiring

perubahan pola aliran dan fenomena dry-out pada kualitas sangat tinggi.

Gambar 3 juga menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor seiring dengan peningkatan temperatur udara masuk. Peningkatan pada sisi udara meningkatkan temperatur saturasi pada refrigeran dan pada gilirannya koefisien perpindahan kalor pada proses boiling. Efek dari temperature saturasi ini diakibatkan oleh meningkatnya kontribusi nucleate boiling pada persamaan (3) seiring dengan perubahan properties refrigeran dalam hal turunnya nilai surface tension dan naiknya tekanan refrigeran. Hal ini juga meningkatkan kualitas refrigeran keluar dari microchannel.

Gambar 4 menunjukkan variasi koefisien perpindahan kalor sebagai fungsi kualitas dan laju aliran massa refrigeran propane. Peningkatan laju aliran massa pada refrigeran menyebabkan peningkatan yang signifikan pada koefisien perpindahan kalor. Pengaruh laju aliran massa ini disebabkan oleh peningkatan kontribusi perpindahan kalor konvektif dan efek dari geometri saluran mikro. Peningkatan laju aliran massa juga menyebabkan kualitas luaran dari refrigeran menurun.

Analisis kinerja perpindahan kalor juga dilakukan pada refrigeran konvensional R410A yang banyak digunakan pada aplikasi tata

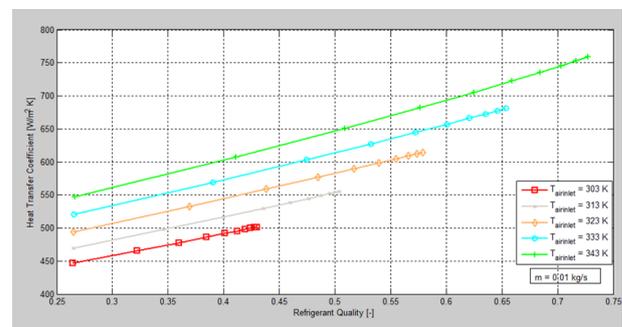


Figure 3 Koefisien perpindahan kalor propane

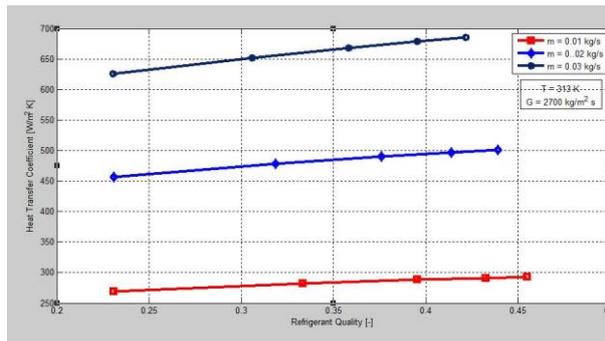


Figure 4 Pengaruh laju aliran massa

udara. R410A merupakan refrigeran jenis HFC pengganti R22. Perbandingan kedua refrigeran dengan propane R290 disajikan pada tabel 2. Propane mempunyai kisaran operasi kerja yang relatif sama dengan R22 sehingga merupakan pengganti potensial refrigeran ini. Propane juga mempunyai keunggulan dari aspek lingkungan dengan nilai ozone depletion dan global warming potential yang sangat rendah. Propane juga mempunyai nilai efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan kedua refrigeran konvensional tersebut. Refrigerant charge pada sistem yang menggunakan propane juga lebih sedikit sehingga potensi kebocoran lebih rendah. Sifat propane yang memerlukan pertimbangan lebih adalah golongan keamanan A3 yang bersifat mudah terbakar.

Perbandingan kinerja perpindahan kalor refrigeran propane dengan R410A disajikan pada Gambar 5. Hasil simulasi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa pada kondisi air inlet temperature yang sama, nilai heat transfer coefficient refrigeran propane lebih tinggi dibandingkan dengan fluida refrigeran R410A. Peningkatan koefisien perpindahan kalor hingga 1.5 kali terjadi pada kualitas uap refrigeran lebih dari 0.3.

Adapun faktor faktor yang menyebabkan kondisi tersebut adalah perbedaan nilai pada setiap properti antara fluida propane dan R410A. Perbedaan nilai heat transfer coefficient ini disebabkan oleh faktor faktor yang cukup mencolok pada kedua properti yakni latent heat, surface tension, density.

Latent heat merupakan kalor yang dibutuhkan oleh suatu fluida untuk mengubah fase baik dari cairan ke gas atau sebaliknya. Menurut persamaan (4) menyatakan bahwa semakin besar nilai latent heat suatu fluida maka

Tabel 2 Perbandingan sifat refrigeran

Refrigeran	R22	R410A	R290
Komposisi	CHF ₂ Cl	R125/ R32	C ₃ H ₈
ODP	0.05	0	0
GWP	4300	3300	3
Boiling point (°C)	-40.8	-52.7	-42.1
Berat molekul (kg/mol)	86.5	72.6	44.1
Temperatur kritis (°C)	96	72.5	96.8
Tekanan kritis (MPa)	4.07	4.95	4.25
Safety class	A1	A1	A3

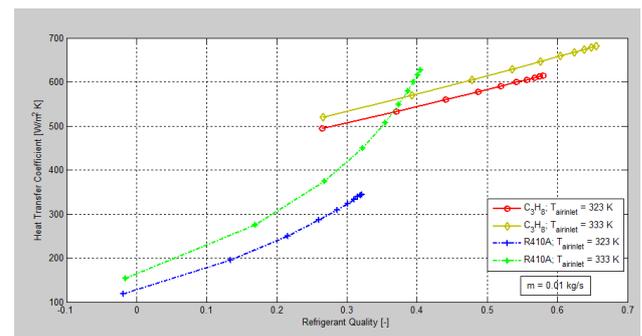


Figure 5 Perpindahan kalor propane dan R410A

besarnya nilai heat transfer coefficient yang terjadi akibat nucleate boiling akan semakin kecil. Hal ini tentunya menjadi pertimbangan bahwa besarnya latent heat akan mengakibatkan perubahan fase yang terjadi pada suatu fluida akan kecil.

Besar kecilnya perubahan fase ini akan berpengaruh pada heat transfer coefficient oleh nucleate boiling yang terjadi pada dua fase yakni gas dan cairan.

Selanjutnya, perbedaan besar kecilnya surface tension antara partikel partikel fluida menyebabkan besar kecilnya heat transfer coefficient. Semakin besarnya surface tension mengindikasikan besarnya ikatan antara partikel fluida.

Kesimpulan

Adapun microchannel heat exchanger menjadi jawaban atas tantangan tersendiri mengenai kebutuhan akan alat penukar kalor yang ringkas dan memiliki kapasitas tinggi dalam memindahkan kalor. Microchannel heat exchanger dengan menggunakan fluida refrijeran propane telah memberikan gambaran bahwa dengan merencanakan diameter hidrolis yang kecil memberikan nilai heat transfer coefficient yang sangat tinggi. Pada laju aliran massa propane 0.1 kg/s, 0.2 kg/s.

Dalam simulasi ini juga memperlihatkan kualitas keluaran propane masih dalam bentuk dua fase. Ini berarti bahwa dengan menambah panjang microchannel heat exchanger maka akan sangat mungkin nilai heat transfer coefficient akan semakin besar dan tentunya diharapkan kualitas keluaran propane adalah superheated gas. Selain itu, dengan melihat data validasi yang terlihat antara hasil yang diberikan oleh fluida refrijeran propane dengan R410A memperlihatkan bahwa nilai heat transfer coefficient propane jauh lebih baik dibandingkan dengan R410A. Fluida Propane merupakan fluida jenis organic compound yang sangat ramah lingkungan dan juga memiliki karakteristik properti yang mempengaruhi pada sistem pendingin.

Acknowledgement

Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Fundamental Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Republik Indonesia tahun anggaran 2015-2016.

Referensi

1. Thome, J.R., *Boiling in microchannels: A review of experiment and theory.*

- International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004. **25**(2): p. 128-139.
2. Kandlikar, S.G.a.G., William J., *Evolution of Microchannel Flow Passages-Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology.* Heat Transfer Eng. , 2003. **24**(1): p. 3-17.
 3. Cremaschi, L., L. Molinaroli, and C. Andres, *Experimental analysis and modeling of lubricant effects in microchannel evaporators working with low GWP refrigerants.* Science and Technology for the Built Environment, 2016: p. 00-00.
 4. Bigi, A.M., Cremaschi, L., Fisher, D. E., *Modeling of Lubricant Effects in a Microchannel Type Condenser,* in *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue.* 2014: West Lafayette, IN (USA).
 5. Chang, Y.a.W., C., *A generalized heat transfer correlation for louvered fin geometry.* International Journal of Heat & Mass Transfer, 1997. **40**(3): p. 533-544.
 6. Rohsenow, A.M., *Heat Transfer with Evaporation.* Heat Transfer, 1953.
 7. Gossard, J., *Numerical Simulation of the Steady-State, Thermal-Hydraulic Performance of Microchannel and Minichannel Evaporators with Headers and Louvered Fins.* 2011, Miami University.
 8. Oh, J.-T., et al., *Experimental investigation on two-phase flow boiling heat transfer of five refrigerants in horizontal small tubes of 0.5, 1.5 and 3.0 mm inner diameters.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. **54**(9-10): p. 2080-2088.