SIMULASI DROPLET UNTUK PENDINGINAN ALAT TEKNOLOGI INFORMASI DENGAN METODE LATTICE-BOLTZMANN

Wiji Nurastuti¹, Kumara Ari Yuana²

Dept. Of Computer Science, Amikom University¹

Dept. Of Computer Science, Amikom University²

email: wiwitab@amikom.ac.id, kumara.a@amikom.ac.id

Abstrak : Suhu aman dalam inovasi skema pendingin dalam pemeliharaan elektronik telah ditentukan dengan batasan material dan kendala realibilitas terkait pada miniaturisasi microchip agresif pada komponen elektronik. Perakayasa (engineer) sistem pendingin memusatkan perhatian pada skema pendinginan dua fase, untuk memanfaatkan kedua system pendingin. Sifat yang dimiliki perakayasa sistem pendingin ini yaitu konveksi fluida dan panas laten untuk memindahkan jumlah kalor yang jauh lebih besar dari skema fase tunggal, sambil mempertahankan suhu perangkat yang lebih rendah. Beberapa skema pendingin cairan dua fase telah direkomendasikan untuk menghilangkan fluks kalor tinggi dari perangkat yang digunakan diaplikasi. Momentum droplet memungkinkan cairan menembus penghalang uap yang dibuat oleh gelembung nukleasi dan secara efektif mengisi kembali permukaan, keduanya sangat bermanfaat untuk pendinginan fluks tinggi. Pada model dan simulasi pengembangan droplet menggunakan metode LBM multi fase, parameter penting yang didapatkan adalah arus semu maksimum (maximum spurious currents) yang menentukan stabilitas komputasi.

Kata Kunci: Simulasi Droplet, Metode Lattice-Boltzmann

Abstract: The safe temperature in refrigeration scheme innovations in electronic selection has been determined by material constraints and the associated reliability constraints on aggressive microchip miniaturization of electronic components. Cooling system engineers focus on two-phase cooling schemes to take advantage of both cooling systems. This cooling system engineer has the property of fluid convection and latent heat to transfer much larger amounts of heat than single-phase schemes while maintaining lower device temperatures. Several two-phase liquid cooling systems have been recommended to remove high heat fluxes from the devices used in the application. The droplet momentum allows the liquid to penetrate the vapour barrier created by the nucleation bubbles and effectively replenish the surface, both of which are particularly beneficial for high flux cooling. In the droplet development model and simulation using the multiphase LBM method, the important parameter obtained is the maximum spurious currents, which determine the computational stability.

Keywords: Droplet Simulation, Lattice-Boltzmann Method

Pendahuluan

Selama kurang lebih tiga dekade terakhir, banyak terjadi hal yang mendesak terkait kebutuhan inovasi skema pendinginan untuk pemeliharaan perangkat elektronik dengan suhu aman dibawah batas yang telah ditentukan oleh batasan material dan kendala realibilitas yang terkait pada miniaturisasi *microchip* yang agresif pada komponen elektronik. Pada awal tahun 1980-an muncul trend peningkatan laju pembuangan kalor. Hal ini menyebabkan pergeseran dari ketergantungan pada sistem berpendingin kipas menjadi ke skema pendinginan yang memanfaatkan pendingin cairan dielektrik menggunakan berbagai skema pendinginan fase tunggal. Namun, pada pertengahan 1980-an, pembuangan kalor yang perlu dipindahkan dari chip superkomputer mendekati 100 W/cm², melebihi kemampuan sebagian besar skema pendinginan cair fase tunggal[1]. Kemudian, perakayasa (*engineer*) sistem pendingin memusatkan perhatian pada skema pendinginan dua fase, untuk memanfaatkan kedua system pendingin, yaitu yang bersifat konveksi fluida dan panas laten untuk memindahkan jumlah kalor yang jauh lebih besar

dari pada skema fase tunggal, sambil mempertahankan suhu perangkat yang lebih rendah. Tetapi masalah pembuangan kalor tidak hanya pada komputer perangkat. Sejak awal 1990-an, tantangan pembuangan panas serupa ditemukan di banyak aplikasi lain. Seperti aparatus komputasi dan pusat data, perangkat medis sinar X, elektronik daya kendaraan hibrid, panas penukar untuk penyimpanan hidrogen, selimut reaktor fusi dan target akselerator partikel, elektroda magnetohidrodinamik (MHD, nozel roket, elektronik satelit dan pesawat ruang angkasa, laser dan senjata energi yang diarahkan gelombang mikro, radar canggih, dan penukar panas bahan bakar udara di mesin pesawat Mach tinggi[2].

Tinjauan Pustaka

Beberapa skema pendingin cairan dua fase telah direkomendasikan untuk menghilangkan fluks kalor tinggi dari perangkat yang digunakan diaplikasi. Mereka termasuk termosifon mendidih *system pool*, aliran saluran mendidih, pendingin saluran mini/mikro, pelepasan jet, dan *cooling spray*[3].

Terdapat beberapa keuntungan mengenai penyokong *cooling spray* yakni hilangnya kalor fluks tinggi, suhu permukaan yang rendah dan cukup seragam, serta kemampuan untuk mendinginkan luas permukaan yang relatif besar menggunakan satu nozzel. Sebagai contoh, penelitian telah menunjukkan bahwa *cooling spray* dapat menghilangkan 150–200 W/cm² dengan menggunakan pendingin dielektrik HFE-7100 dan tetap mempertahankan suhu perangkat di bawah 125°C[4]. Kinerja pendinginan dapat ditingkatkan lebih lanjut dengan permukaan berstruktur mikro, mencapai 330–350 W/cm² di bawah 125°C menggunakan pendingin anti beku[5,6].

Pendinginan satu fase juga mengimbangi fluks panas tinggi dengan peningkatan aliran yang besar di kedua pendingin dan suhu perangkat, yang bisa sangat merugikan perangkat sensitif suhu seperti chip komputer[3]. Namun, kelemahan utama dari pendingin mini/saluran mikro dua fase adalah besarnya penurunan tekanan terkait dengan gesekan dan percepatan dua fase di sepanjang saluran[7,8].

Tubrukan jet dua fasa dapat menjadi masalah utama karena kecenderungan dinding jet yang berasal dari zona tubrukan untuk memisahkan dari permukaan karena momentum uap tegak lurus ke permukaan. Faktanya, CHF dalam jet sering kita jumpai meski dengan jumlah yang melimpah cairan di jet dinding[9].

Atribut penting lainnya dari *cooling spray* adalah kemampuannya yang luar biasa mengurangi atau bahkan mencegah ekskursi suhu dinding dan selanjutnya penurunan suhu yang terkait dengan pendidihan yang baru jadi. Anomali adalah hal biasa dengan sebagian besar skema pendinginan dua fase melibatkan pendingin dielektrik, dan diketahui menyebabkan kejutan termal ke perangkat elektronik[10].

Momentum droplet memungkinkan cairan menembus penghalang uap yang dibuat oleh gelembung nukleasi dan secara lebih efektif mengisi kembali permukaan; keduanya sangat bermanfaat untuk pendinginan fluks tinggi[11]. Namun, *cooling spray* bukannya tanpa kekurangan, salah satu kekurangannya yakni *pressure drop* tinggi yang terkadang diperlukan memecah aliran cairan menjadi tetesan halus. Kelemahan praktis lainnya adalah ukuran yang kecil jalur aliran di dalam nosel semprot yang meningkatkan kemungkinan penyumbatan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kelelahan permukaan. Selanjutnya, variasi kecil dalam pembuatan nosel yang tampaknya identik dapat menghasilkan perbedaan yang besar dalam pola dampak semprotan. Oleh karena itu, pra-pengujian nosel yang cermat sangat penting untuk memastikan

kinerja pendinginan yang dapat diprediksi dan berulang[12]. Terlepas dari kelemahan ini, pendinginan semprotan tetap cukup populer baik dalam aplikasi suhu rendah dan suhu tinggi. Patut diperhatikan di antara suhu rendah aplikasi menggabungkan pendinginan semprot ke dalam sistem pendinginan, di mana ruang semprot berfungsi sebagai evaporator loop pendinginan.[13,14]

LBM (*lattice Boltzmann method*) merupakan metode yang digunakan dalam komputasi dinamika fluida (*computational fluids dynamics/CFD*). Metode Lattice Boltzmann, yang berasal dari metode automata gas kisi, merupakan kelas metode komputasi dinamika fluida untuk simulasi fluida. LBM digunakan sebagai metode non-konvensional dalam komputasi dinamika fluida. Penggunaan menggunakan metode Lattice Boltzmann (LBM) dapat memberikan efek sukses dalam simulasi droplet melayang (*floating droplet*) dan droplet yang menyentuh pada permukaan alat dengan derajat kebasahan (*wettability*). [15,16]

Pada model dan simulasi pengembangan droplet dengan menggunakan metode LBM multi fase, parameter penting yang selalu didapatkan adalah arus semu maksimum (*maximum spurious currents*) yang menentukan stabilitas komputasi [17]. Perbedaan kondisi suhu mengikuti aturan termodinamika sesuai persamaan keadaan (*equation of state/EOS*), dan menghasilkan besar arus semu yang berbeda. Arus semu dalam simulasi ini dihasilkan dari interaksi gaya pada dua fasa. Sedangkan pada model dan simulasi *droplet wettability* menggunakan metode Lattice Boltzmann (LBM) multi fase, dengan cara mengelola densitas rendah fluida yang melingkupi droplet (*ambient fluid*) dan densitas tinggi (cairan droplet) melalui pengaturan gaya (*force term*). *Force term* mengatur tekanan dan koeksistensi kepadatan tinggi dan rendah melalui perhitungan persamaan keadaan (EOS). Simulasi *wettability* dijelaskan melalui sudut kontak. Sudut kontak 90° mewakili situasi *wettability* netral. Situasi *wettability* netral dicapai ketika gaya molekul kohesif dan adhesif berkerja dalam kondisi yang sama. Sudut kontak lebih kecil dari 90° mewakili kondisi hidrofilik. Situasi hidrofilik terjadi ketika gaya molekul adhesif lebih kuat dari pada gaya antar molekul kohesif. Sudut yang lebih besar dari 90° mewakili situasi hidrofobik. Situasi hidrofobik terjadi ketika gaya molekul adhesif lebih lemah dari gaya antar molekul kohesif.

Droplet adalah cairan atau cipratan liur yang dikeluarkan seseorang dari hidung atau mulut saat bersin, batuk, bahkan berbicara. Droplet juga bisa dihasilkan melalui prosedur medis yang menghasilkan aerosol. Droplet sebagai elemen dasar dari fenomena semburan, telah menarik para

peneliti teknik untuk menyelidiki karakteristiknya. Pendinginan semprot, pengecatan semprot dan pembakaran bahan bakar semprot merupakan beberapa yang aplikasi semprotan dalam dunia teknik.

Metode

Variabel fundamental dalam teori kinetik adalah **Fungsi Distribusi** partikel $f(x, \xi, t)$. Ini dapat dilihat sebagai generalisasi kepadatan ρ yang juga memperhitungkan kecepatan partikel mikroskopis ξ . Sementara $\rho(x, t)$ mewakili massa jenis kekacauan di ruang fisik, $f(x, \xi, t)$ secara bersamaan mewakili massa jenis di ruang fisik tiga dimensi dan di ruang kecepatan tiga dimensi. Oleh karena itu, f memiliki satuan.

$$[f] = \text{kg} \times \frac{1}{\text{m}^3} \times \frac{1}{(\text{m/s})^3} = \frac{\text{kg s}^3}{\text{m}^6} \quad (1)$$

Dengan kata lain, fungsi distribusi $f(x, \xi, t)$ merepresentasikan massa jenis partikel dengan kecepatan $\xi = (\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ pada posisi x dan waktu t .

$$\rho(x, t) = \int f(x, \xi, t) d^3\xi. \quad (2)$$

Kepadatan momentum sebagai momen.

$$\rho(x, t)u(x, t) = \int \xi f(x, \xi, t) d^3\xi. \quad (2.1)$$

Demikian pula, kita dapat menemukan rapatan energi total makroskopik sebagai momen

$$\rho(x, t)E(x, t) = \frac{1}{2} \int |\xi|^2 f(x, \xi, t) d^3\xi. \quad (2.2)$$

Akibatnya, ketika sebuah gas dibiarkan sendiri cukup lama, kita dapat mengasumsikan bahwa fungsi distribusi $f(x, \xi, t)$ akan mencapai *distribusi kesetimbangan* $f^{eq}(x, \xi, t)$ yang isotropik dalam ruang kecepatan sekitar $\xi = u$: dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan u , distribusi kesetimbangan dapat dinyatakan sebagai $f^{eq}(x, |v|, t)$.

Dengan demikian, distribusi kesetimbangan dapat ditentukan

$$f^{eq}(x, |v|, t) = \rho \left(\frac{3}{4\pi e} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-3\frac{|v|^2}{4e}} = \rho \left(\frac{\rho}{2\pi p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\rho \frac{|v|^2}{2p}} = \rho \left(\frac{1}{2\pi RT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\rho |v|^2 / (2RT)} \quad (2.3)$$

Bentuk-bentuk berbeda ini dihubungkan melalui (1.41)

Menggunakan notasi umum $\Omega(f) = df/dt$ untuk diferensial total, kita mendapatkan persamaan Boltzmann

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \beta \frac{\partial f}{\partial x \beta} + \frac{F_\beta}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \xi \beta} = \Omega(f). \quad (2.4)$$

Operator tumbukan BKG [13]:

$$\Omega = -\frac{1}{\tau} (f - f^{eq}) \quad (3)$$

Dengan mendiskritkan persamaan Boltzmann dalam ruang kecepatan, ruang fisik, dan waktu, kita menemukan *persamaan kisi Boltzmann*.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) + \Omega_i(x, t). \quad (3.1)$$

Meskipun ada banyak operator tumbukan yang berbeda Ω_i yang tersedia, yang paling sederhana yang dapat digunakan untuk simulasi Navier-Stokes adalah operator Bhatnagar-Gross-Krook (BGK):

$$\Omega_i(f) = -\frac{f_i - f_i^{eq}}{\tau} \Delta t. \quad (3.2)$$

Ini menenangkan populasi menuju kesetimbangan f_i^{eq} pada tingkat yang ditentukan oleh waktu relaksasi τ .⁵

Kesetimbangan ini diberikan oleh

$$f_i^{eq}(x, t) = w_i \rho \left(1 + \frac{u \cdot c_i}{c_s^2} + \frac{(u \cdot c_i)^2}{2c_s^4} - \frac{u \cdot u}{2c_s^2} \right) \quad (3.3)$$

Dengan berat f_i , i.e. $\sum_i f_i^{eq} = \sum_i f_i = \rho$ and $\sum_i c_i f_i^{eq} = \sum_i c_i f_i = \rho u$.⁶

$$v = c_s^2 \quad (3.4)$$

3.2.2 Langkah-langkah: Tumbukan dan Streaming

Secara lengkap, persamaan BGK kisi (LBGK) (yaitu persamaan Boltzmann yang terdiskritisasi penuh dengan operator tumbukan BGK) terbaca :

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau} \left(f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t) \right) \quad (3.5)$$

Kita dapat menguraikan persamaan ini menjadi dua bagian berbeda yang dilakukan secara berurutan:

1. Bagian pertama adalah tumbukan (atau relaksasi),

$$f_i^*(x, t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau} \left(f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t) \right) \quad (3.6)$$

Di mana f_i^* mewakili fungsi distribusi setelah tubrukan dan f_i^{eq} ditemukan dari f_i . Perhatikan dibawah ini lebih mudah dan efisien untuk menerapkan tubrukan dari

$$f_i^*(x, t) = f_i(x, t) \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right) + f_i^{eq}(x, t) \frac{\Delta t}{\tau}. \quad (3.7)$$

Ini menjadi sangat sederhana untuk $\tau/\Delta t = 1$, dimana $f_i^*(x, t) = f_i^{eq}(x, t)$.

2. Bagian kedua adalah streaming (atau propagasi),

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i^*(x, t) \quad (3.8)$$

Seperti yang ditunjukkan pada gambar. 1

Gambar 1. Partikel (hitam) mengalir dari simpul pusat ke tetangganya, dimana partikel (abu-abu) dikukus kembali. Untuk kita lihat distribusi pasca-tabrakan f_i^* setelah streaming

Hasil dan Kesimpulan

1. Floating droplet

Floating droplet adalah fluida berdensitas tinggi yang melayang pada media berdensitas rendah dimana pengaruh gravitasi bersifat lemah. Contoh: droplet aerosol, droplet pembawa virus, kabulkanlah, dan lain-lain.

Gambar 2. Floating Droplet

2. Wettability Netral

Droplet yang menempel pada media padat dengan kondisi gaya adhesi dan gaya kohesi seimbang,

sehingga batas solid liquid membentuk sudut 90 derajat.

Gambar 3. Wettability Netral

3. Hidrofilik

Droplet yang menempel pada media padat dengan kondisi gaya adhesi lebih besar dibanding dengan gaya kohesi sehingga sudut kontakannya lebih kecil dari 90 derajat.

Gambar 4. Hidrofilik

4. Hidrofobik

Droplet yang menempel pada media padat dengan kondisi gaya adhesi lebih kecil dibanding dengan gaya kohesi sehingga sudut kontakannya lebih besar dari 90 derajat.

Gambar 5. Hidrofobik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T.M. Anderson, I. Mudawar, Microelectronic cooling by enhanced pool boiling of a dielectric fluorocarbon liquid, *J. Heat Transf. – Trans. ASME* 111 (1989) 752–759.
- [2] I. Mudawar, Recent advances in high-flux, two-phase thermal management, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 5 (2013) 021012.
- [3] I. Mudawar, Assessment of high-heat-flux thermal management schemes, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 24 (2001) 122–141.
- [4] I. Mudawar, D. Bharathan, K. Kelly, S. Narumanchi, Two-phase spray cooling of hybrid vehicle electronics, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 32 (2009) 501–512.
- [5] H. Bostanci, D. Van Ee, B.A. Saarloos, D.P. Rini, L.C. Chow, Spray cooling of power electronics using high temperature coolant and enhanced surface, in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, Dearborn, USA, 2009, pp. 609–613.
- [6] H. Bostanci, D. Van Ee, B.A. Saarloos, D.P. Rini, L.C. Chow, Thermal management of power inverter modules at high fluxes via two-phase spray cooling, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2 (2012) 1480–1485.
- [7] M.B. Bowers, I. Mudawar, Two-phase electronic cooling using mini-channel and micro-channel heat sinks: part 2-flow rate and pressure drop constraints, *J. Electron. Packag. – Trans. ASME* 116 (1994) 298–305.
- [8] W. Qu, I. Mudawar, Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks, *Int. J. Heat Mass Transf.* 46 (2003) 2737–2753.
- [9] M. Monde, H. Kusuda, H. Uehara, Burnout heat flux in saturated forced convection boiling with two or more impinging jets, *Trans. JSME* 46 (1980) 1834–1843.
- [10] C.H. Amon, S.-C. Yao, C.-F. Wu, C.-C. Hsieh, Microelectromechanical system based evaporative thermal management of high heat flux electronics, *J. Heat Transfer – Trans. ASME* 127 (2005) 66–75.
- [11] J. Yang, M.R. Pais, L.C. Chow, Critical heat flux limits in secondary gas atomized liquid spray cooling, *Exp. Heat Transf.* 6 (1993) 55–67.
- [12] D.D. Hall, I. Mudawar, Experimental and numerical study of quenching complex-shaped metallic alloys with multiple, overlapping sprays, *Int. J. Heat Mass Transf.* 38 (1995) 1201–1216.
- [13] C. Si, S. Shao, C. Tian, H. Xu, Development and experimental investigation of a novel spray cooling system integrated into refrigeration circuit, *Appl. Therm. Eng.* 33 (2012) 246–252.
- [14] H. Xu, C. Si, S. Shao, C. Tian, Experimental investigation on heat transfer of spray cooling with isobutane (R600a), *Int. J. Therm. Sci.* 86 (2014) 21–27.
- [15] K. A. Yuana, “Modelling and Simulation of Floating Droplet Use Multi-phase Lattice Boltzmann Method (LBM)”, *International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, 2019
- [16] K. A. Yuana and E. P. Budiana, “Modeling and simulation of droplet wettability using multiphase Lattice Boltzmann method (LBM),” *AIP Conference Proceedings* 2192, 070002 (2019) vol. 070002, no. December, 2019.
- [17] P. Yuan and L. Schaefer, “Equations of state in a lattice Boltzmann model,” *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 4, 2006.