

FENOMENA TRANSPOR FLUIDA PADA SKALA KECIL

Mohammad Tauviquirrahman¹⁾

Abstrak

Tulisan ini menyajikan hasil rangkuman berbagai pustaka untuk menjawab pertanyaan kapan asumsi kontinum itu menjadi tidak berlaku dalam menganalisa dinamika thermofluida untuk aliran dalam microfluidic. Pada skala makroskopik (continuum) beberapa efek yang semula tidak penting akan menjadi penting dalam skala mikroskopik, dan sementara itu, efek lain yang pada umumnya diabaikan dalam skala makroskopik menjadi dominan dalam skala mikroskopik. Efek-efek ini telah dipertimbangkan dalam berbagai pengajuan model untuk mempelajari perilaku aliran dalam microfluidic. Model-model itu ditawarkan dengan cara memodifikasi kondisi batas persamaan Navier-Stokes yang selama ini dikenal untuk skala makroskopik.

Kata kunci: microfluidic, kontinum, kondisi batas, lapisan batas

PENDAHULUAN

Microfluidic merupakan ilmu pengetahuan dan keteknikan suatu sistem yang mana perilaku fluida berbeda dari teori aliran konvensional dikarenakan skala panjang yang kecil [1]. *Microfluidic* termasuk cabang baru ilmu pengetahuan dan teknologi. Studi aliran dalam *microfluidic* telah memperoleh perhatian lebih dikarenakan potensinya untuk diaplikasikan dalam peralatan-mikro dalam bidang keteknikan, medis, dan ilmu pengetahuan yang lain. Pertumbuhan yang cepat untuk peralatan *microfluidic* telah dimotivasi oleh adanya teknologi MEMS (Micro Electro-Mechanical System).

Sejumlah aplikasi *microfluidic* meliputi peralatan untuk kontrol aliran, sistem biomedis dan reaksi kimia. Analisis aliran yang akurat dan efisien untuk *microfluidic* merupakan tujuan penting dalam merancang peralatan dengan performansi yang tinggi. Oleh karena itu, alat prediksi yang layak untuk kondisi aliran menjadi cukup penting.

TUJUAN PENULISAN

Beberapa efek yang semula tidak penting pada skala makroskopik (*continuum*) akan menjadi penting dalam skala mikro, dan sementara itu, efek lain yang pada umumnya diabaikan dalam skala makroskopik menjadi dominan dalam skala mikroskopik. Dalam tulisan ini, akan dikaji kapan asumsi kontinum itu menjadi tidak berlaku dan apa parameternya berdasarkan tinjauan berbagai pustaka yang sudah ada.

MICROFLOW VS MACROFLOW

Fluida sebagai kontinum

Studi mekanika fluida (pada skala panjang makroskopik yang konvensional) umumnya dimulai dari asumsi bahwa fluida dipertimbangkan sebagai suatu kontinum. Semua besaran seperti densitas, kecepatan, dan tekanan diasumsikan terdefinisi di semua tempat dalam ruang dan dapat berubah secara terus menerus dari titik ke titik dalam suatu aliran.

Kapan asumsi kontinum tidak berlaku?

Semua zat terdiri dari sejumlah atom dan molekul dengan massa tertentu dan bukan merupakan kandungan tanpa fitur yang terdistribusi secara merata. Apakah dengan mengasumsikan kontinuitas massa dan sifat-sifat lain cukup masuk akal pada skala panjang mikroskopik sangat tergantung pada situasi tertentu yang dipelajari. Jika molekul-molekul suatu fluida terkumpul berdekatan relatif terhadap skala panjang aliran, asumsi kontinum mungkin valid. Tetapi, jika molekul-molekul terdistribusi berjauhan relatif terhadap skala panjang aliran, dengan mengasumsikan kontinuitas fluida dan sifat-sifat aliran bisa jadi merupakan pendekatan yang tidak sesuai. Meskipun demikian, pada skala panjang mikroskopik, masih ada beberapa ribuan molekul dalam skala panjang yang signifikan terhadap aliran. Sebagai contoh, saluran berukuran 10- μm memiliki setidaknya 30,000 molekul air, dan dalam rentang ini, tentunya dapat dipertimbangkan aliran sebagai kontinum. Oleh karena itu, dalam peralatan dan geometri yang sangat kecil, fluida khususnya zat cair (*liquid*) dapat dipertimbangkan kontinum. Dengan kata lain, pendekatan kontinum untuk menganalisa aliran dapat digunakan.

Tiga hukum kekekalan dasar yang digunakan untuk memodelkan masalah dinamika thermofluida adalah kekekalan massa, momentum, dan energi. Dalam bentuk persamaan diferensial parsial, ketiga hukum ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

1) Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ji}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i e) = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \tau_{ji} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i}$$

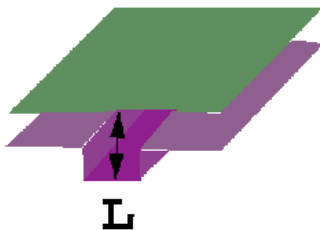
Dalam persamaan-persamaan ini, u_i adalah kecepatan aliran, ρ adalah densitas lokal, p adalah tekanan, τ adalah tensor tegangan, e adalah energi dalam, \mathbf{F} adalah gaya body, dan q adalah fluks panas.

Dalam skala-mikro dimensi karakteristik saluran fluida dapat dibandingkan dengan *mean-free-path* media gas tempat beroperasi. Di bawah kondisi seperti itu, asumsi kontinum menjadi tidak berlaku. Hukum kekekalan yang menentukan tensor tegangan dan vektor fluks panas untuk aliran kontinum perlu dimodifikasi untuk menjembatani efek *rarefaction*. Kondisi batas “no-slip” untuk kecepatan dan temperatur fluida pada dinding perlu dimodifikasi untuk menjembatani pengurangan perubahan momentum dan energi molekul-molekul dengan lingkungan.

Bilangan Knudsen, Kn

Penyimpangan dari asumsi hipotesis diidentifikasi dengan bilangan Knudsen, Kn yang merupakan perbandingan *mean-free-path* molekul-molekul, λ dengan skala panjang karakteristik, L .

Skala panjang ini ditentukan agar gradien densitas, kecepatan, dan temperatur masuk dalam daerah asal aliran. Sebagai contoh untuk aliran eksternal tebal lapisan batas dan untuk aliran internal tebal setengah saluran dari aliran yang berkembang penuh dapat digunakan sebagai skala panjang karakteristik.



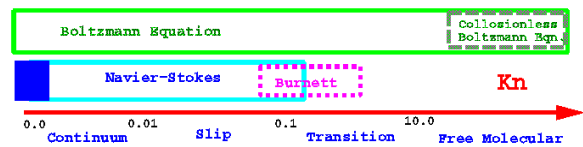
Gambar 1. Panjang karakteristik, L dari suatu saluran

Menurut bilangan Knudsen daerah aliran dapat dibagi menjadi empat, yaitu kontinum, slip, transisi,

dan daerah molekul-bebas. Keempat daerah ini diajikan sebagai berikut:

| | |
|--|--|
| Persamaan Euler | $Kn \rightarrow 0$ ($Re \rightarrow \infty$) |
| Persamaan Navier-Stokes (<i>no-slip</i>) | $Kn < 10^{-3}$ |
| Persamaan Navier-Stokes (<i>slip</i>) | $10^{-3} \leq Kn < 10^{-1}$ |
| Daerah Transisi | $10^{-1} \leq Kn < 10$ |
| Daerah molekul-bebas | $Kn \geq 10$ |

Dengan meningkatnya bilangan Kn , aliran yang semula kontinum berubah menjadi aliran slip, kemudian aliran transisi, dan pada akhirnya daerah molekul bebas [3]. Gambar di bawah ini menunjukkan persamaan-persamaan untuk keempat daerah ini. Model yang berdasarkan molekul atau partikel diskret adalah persamaan Boltzmann. Persamaan Boltzmann merupakan suatu integrasi persamaan diferensial dan solusi persamaan ini terbatas pada beberapa kasus. Model berdasarkan kontinum adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Euler yang berkaitan dengan batas kontinum inviscid memiliki $Kn=0.0$. Persamaan Navier-Stokes dapat diturunkan dari persamaan persamaan Boltzmann dengan menggunakan ekspansi Chapman-Enskog. Pada saat bilangan Knudsen lebih besar dari 0.1, persamaan Navier-Stokes menjadi tidak berlaku dan tingkat pendekatan yang lebih tinggi diperoleh dengan cara memasukkan order kedua, Kn dalam ekspansi Chapman-Enskog. Bentuk tertentu persamaan semacam itu disebut persamaan Burnett. Persamaan Burnett dan kondisi batas slip order-kedua merupakan subjek yang masih kontroversial dan cara yang lebih baik dalam memecahkan aliran dengan bilangan Knudsen tinggi adalah melalui teknik simulasi langsung berdasarkan molekul seperti halnya metode *Direct Simulation Monte Carlo* (DSMC).

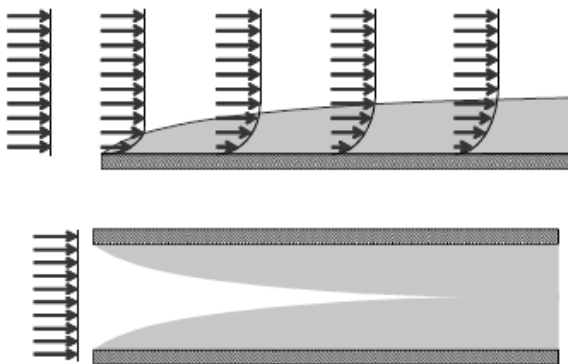


Gambar 2. Daerah aliran dan persamaan umum yang berlaku [10]

Kondisi Batas

Perbedaan pokok antara *microflow* dan *macroflow* juga dapat dilihat dari adanya pengaruh batas daerah asal aliran. Suatu batas, misalnya dinding *solid*, dapat ditentukan oleh nilai-nilai tertentu akan medan kecepatan, suhu, dan konsentrasi. Lebih dari 100 tahun yang lalu, suatu teori telah dikembangkan yang disebut teori lapisan batas (*boundary layer theory*), yang menjelaskan seberapa jauh nilai-nilai batas ini berpengaruh terhadap fluida. Di luar apa yang disebut lapisan batas ini, medan-medan dalam fluida didominasi oleh karakteristik nilai *bulk* seperti halnya kecepatan dan temperatur yang diberikan pada saat kondisi masuk. Lapisan batas di atas plat datar disajikan dalam Gambar 1 (atas). Ketika plat dikenai

medan aliran eksternal, daerah yang mana medan kecepatan secara signifikan berbeda dari kecepatan *bulk* adalah cukup tipis dekat dengan sisi tepi plat dan menjadi semakin membesar ketika bergerak ke belakang. Dengan kata lain, perbedaan antara *microflow* dan *macroflow* adalah pentingnya lapisan batas untuk medan aliran. Dalam *microflow* tertentu, lapisan batas ada dalam medan aliran keseluruhan dan biasanya berkembang di seluruh daerah asal (*domain*) aliran [10]. Fenomena ini digambarkan dalam Gambar 3 (bawah) yang menunjukkan dua plat sejajar dengan lapisan batas yang akhirnya menyatu dan memenuhi seluruh ruang diantara plat. Dalam *macroflow*, lapisan batas biasanya hanya merupakan lapisan tipis yang mengelilingi *bulk* fluida.



Gambar 3. Lapisan batas di atas plat datar pada medan aliran eksternal (atas) dan lapisan batas yang menyatu antara dua plat yang sejajar (bawah)

Microflow pada khususnya berada dalam slip dan awalnya berada dalam daerah aliran transisi. Oleh karena itu, persamaan Navier-Stokes dengan kondisi batas slip yang sesuai memenuhi aliran ini. Dengan adanya fenomena slip dalam *microflow*, ada beberapa model slip yang diajukan seperti berikut ini:

1. Model yang diajukan oleh Maxwell (1878) telah memperhitungkan kecepatan slip gas sebagai fungsi sifat molekul fluida [9];
2. Model yang diajukan oleh Eirich (1978) menerapkan kondisi batas adanya kecepatan slip sebagai fungsi tegangan geser dinding [4];
3. Model slip Langmuir yang dikombinasikan dengan persamaan Navier-Stokes kompresibel berdasarkan kontinum telah diajukan dan diimplementasikan untuk tujuan analisa aliran gas *microscale* [5];
4. Model slip Lam untuk tujuan analisa aliran gas *microscale* menggunakan metode yang berbeda dari Langmuir yaitu simulasi DSMC [6].

KESIMPULAN

Dari *review* yang telah dilakukan, pendekatan asumsi kontinum bisa valid sepanjang $kn < 0.1$. Dalam *microflow*, kondisi batas *no-slip* sudah tidak cocok lagi. Berbagai model slip ditawarkan dengan memodifikasi kondisi batas pada persamaan Navier-Stokes. Adanya kondisi slip dekat dinding merupakan tantangan ilmu mekanika fluida yang akan selalu menjadi bahan kajian dan investigasi dalam *microfluidic*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Barkhordari, M., and Etemad, S.Gh., (2007), "Numerical Study of Slip Flow Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in Circular Microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow* **28** pp. 1027-1033.
2. Dongari, N., Agrawal, Ab., and Agrawal, Am., (2007), "Analytical Solution of Gaseous Slip Flow in Long Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer* **50** pp. 3411-3421.
3. Hyung-il Choi and Dohyung Lee, (2008), Computations of gas microflows using pressure correction method with Langmuir slip model, *Computers & Fluids* xxx xxx-xxx
4. Niazmand, H., Renksizbulut, M., and Saeedi, E., (2008), "Developing Slip-Flow and Heat Transfer in Trapezoidal Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Article in Press.
5. Nam-Trung Nguyen and Steven T. Wereley, (2006), *Fundamentals And Application of Microfluidics - 2nd Edition*, ARTECH HOUSE, INC.
6. Renaud, L., Malhaire, C., Kleimann, P., Barbier, D., and Morin, P., (2008), "Theoretical and Experimental Studies of Microflows in Silicon Microchannels", *Material Science and Engineering C* **28**, pp. 910-917.
7. Robert W. Fox, dan Alan T McDonald, (1994), *Introduction to Fluid Mechanics – Fourth Edition*. Jhn Wiley & Sons, Inc.
8. Steffen Hardt and Friedhelm Schönfeld, (2007), *Micrfluidic Technologies for Miniaturized Analysis System*, Springer Science + Business Media, LLC.
9. Sbragaglia, M., and Sugiyama, K., (2007), "Boundary Induced Nonlinearities at Small Reynolds Numbers", *Pysica D* **228** pp. 140-147.
10. William W. Liou and Yichuan Fang, (2006), *Microfluid Mechanics - Principles and Modelling*, McGraw-Hill Companies, Inc.
11. <http://www.cfm.brown.edu/people/beskok/muflow.html>