

## Pengamatan Gerak Konveksi Rayleigh-Benard Sebagai Fungsi Perbedaan Suhu

Vistarani Arini Tiwow<sup>1</sup>, Yusril Yusuf<sup>2</sup> dan Cosmas Poluakan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Manado

Kampus UNIMA Tondano, Sulawesi Utara

<sup>2</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

Sekip Utara, Bulaksumur, Yogyakarta

Email: vista.arini@yahoo.com

### Abstrak

Telah dibuat sebuah alat pengamatan konveksi Rayleigh-Benard (RBC) dari bahan kaca berbentuk kotak yang dibatasi dengan dua reservoir horizontal yaitu reservoir panas dan reservoir dingin. Pada alat ini dilengkapi *automatic thermo-controller* sebagai pengatur suhu reservoir panas. Air sebagai media yang diamati dinamika fluidanya yang mana gerakan fluida direpresentasikan oleh serbuk gergaji kayu jati (SGKJ). Hasil pengamatan memperlihatkan bahwa perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) antara reservoir panas dan reservoir dingin berperan penting terhadap kecepatan gerak molekul air, jari-jari konveksi, dan pola aliran molekul air. Kenaikan  $\Delta T$  menyebabkan kenaikan kecepatan gerak molekul air yang ditampilkan dengan diagram percabangan, namun ukuran jari-jari konveksi mengalami penurunan. Selain itu diamati juga pola aliran molekul air terhadap kenaikan  $\Delta T$ .

**Kata Kunci :** Konveksi Rayleigh-Benard, Diagram percabangan, Jari-jari konveksi, Laminer dan turbulen.

### Abstract

*An observation tool of Rayleigh-Benard Convection (RBC) has been made from glass shaped box that bounded by two horizontal reservoirs, i.e. hot and cold reservoirs. In this tool an automatic thermo-controller is installed in the hot reservoir as temperature control. Water as media for the observed the fluid dynamics that the fluid motion is represented by the teak sawdust. The observations show that the temperature difference ( $\Delta T$ ) between the hot and cold reservoirs plays an important role on the velocity of water molecules, the radius of convection, and molecules flow pattern of water. Increasing  $\Delta T$  causes the increase in the velocity of water molecules that is shown by bifurcation diagram, however the radius of the convection is monotonically decrease. In addition, it was also observed the molecules flow pattern of water to the increase in  $\Delta T$ .*

**Keywords :** Rayleigh-Benard convection, Bifurcation diagram, The radius of convection, Laminar and turbulent.

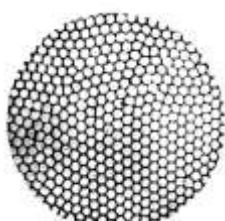
## 1. PENDAHULUAN

Konveksi merupakan fenomena gerakan fluida ketika suatu fluida dipanaskan dengan melibatkan perpindahan molekul-molekul penyusunnya. Faktor yang paling penting yang menjadi penyebab dan pendorong proses tersebut adalah perbedaan suhu antara dua bagian fluida yang berlawanan. Apabila perbedaan suhu terjadi, maka ketidakstabilan panas yang disebabkan oleh meningkatnya tumbukan antar molekul akan terjadi [Jiji, 2006; Masyithah dan Haryanto, 2006]. Contoh konveksi panas banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari adalah sirkulasi udara pada malam dan siang hari, sirkulasi di dalam rumah, peristiwa konveksi di dalam

mantel bumi, fenomena konveksi pada atmosfer bumi, konveksi pada matahari, dan sebagainya [Ahlers, dkk., 2008; Rothman, 1989].

Kajian tentang konveksi berawal dari eksperimen yang dilakukan oleh Henri Benard pada tahun 1900. Benard menyelidiki fenomena konveksi dalam lapisan horizontal tipis fluida yang dipanaskan dari bawah [Ma and Wang, 2004]. Kemudian tahun 1916, Lord Rayleigh menginterpretasi fenomena eksperimen Benard dengan menggunakan teori stabilitas hidrodinamik [Drazin, 2002]. Rayleigh memilih persamaan Boussinesq dengan beberapa kondisi batas untuk memodelkan eksperimen Benard. Dalam makalahnya "*The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of*

*Science*” Lord Rayleigh mengakui adanya suatu nilai berhingga perbedaan suhu  $\Delta T = \Delta T_c$  untuk permulaan terjadinya konveksi [Chandrasekhar, 1961]. Rayleigh juga menunjukkan bahwa konveksi akan terjadi jika memiliki nilai tidak berdimensi yang menggambarkan stabil tidaknya fluida, sehingga disebut bilangan Rayleigh (*Rayleigh Number*) [Ma and Wang, 2004]. Lebih lanjut Rayleigh menunjukkan bahwa ketidakstabilan muncul ketika  $R$  melebihi nilai kritis  $R_c$ , di mana  $R_c = 1708$  [Chandrasekhar, 1961]. Fenomena ketidakstabilan panas pada lapisan fluida ini yang pada akhirnya dikenal dengan ketidakstabilan Rayleigh-Benard atau konveksi Rayleigh-Benard (*Rayleigh-Benard Convection*) [Drazin, 2002].



**GAMBAR 1.** Benard cell [Chandrasekhar, 1961].

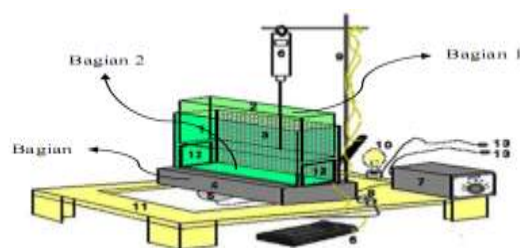
Pada penelitian ini dibuat rangkaian alat pengamatan RBC sederhana skala lab, dimana kotak kaca sebagai tempat pengamatan dibatasi dua reservoir horizontal yaitu reservoir panas dan reservoir dingin. Air digunakan sebagai media untuk mengamati dinamika fluida dan untuk merepresentasikan molekul air digunakan serbuk gergaji kayu jati (SGKJ). Peningkatan perbedaan suhu antara dua reservoir akan menyebabkan perubahan pada kecepatan molekul air yang digambarkan dengan diagram percabangan serta perubahan ukuran jari-jari konveksi. Selain itu, diamati juga pola aliran molekul air yaitu laminar dan turbulen. Antara laminar dan turbulen terdapat fase transisi yang memiliki nilai  $R$  yaitu  $10^6$  sampai  $10^7$  [Hui Peng, dkk., 2005; Krishnamurti, 1970].

Dalam penelitian ini dibatasi pada pengamatan fenomena RBC dengan media air yang mana untuk merepresentasikan gerakan molekul air digunakan serbuk gergaji kayu jati (SGKJ). Perhitungan kecepatan gerak molekul air menggunakan kecepatan rata-ratanya dan ditampilkan dalam diagram percabangan. Jari-jari konveksi diamati dari arah dua dimensi dan hanya dianalisis pada fase laminar, sedangkan pola aliran molekul air ditampilkan dengan menggambarkan arah gerak molekul air.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian fenomena RBC ini dilakukan dengan beberapa tahapan, diantaranya merancang (Gambar 2), menguji, dan men-set up perangkat pengamatan (Gambar 3). Setelah alat dipastikan dapat memperlihatkan fenomena konveksi, tahapan berikutnya adalah melakukan pengamatan fenomena RBC.

Secara detail pengamatan ini dapat dijelaskan dengan memperhatikan Gambar 2 dan Gambar 3. Langkah-langkah awal yang dilakukan dapat dijelaskan dengan Gambar 2. Bagian 3 diisi air setinggi penyangga kayu. Bagian 2 diisi air setinggi penyangga potongan kaca dan dicampur dengan SGKJ. Kotak kaca tersebut diletakkan pada penyangga kayu bagian 3. Bagian 1 diisi air dan dimasukkan ke dalam bagian 2 hingga mencapai penyangga potongan kaca serta menyentuh permukaan air. Selain itu, pada bagian 1 ditambah es sesuai dengan suhu yang diinginkan.



**GAMBAR 2.** Rancangan alat pengamatan RBC.



**GAMBAR 3.** Set-up alat untuk pengamatan RBC.

Air yang dicampur dengan SGKJ pada bagian 2 dibiarkan dalam keadaan tenang. Termometer yang dipasang pada reservoir dingin (plat atas) dan reservoir panas (plat bawah) dipastikan sama pada suhu ruang. Kemudian *automatic thermo-controller* diatur sesuai suhu yang diinginkan dan sensornya dicelupkan ke dalam air pada plat bawah. Steker 1 dihubungkan dengan arus listrik untuk menyalakan lampu. Steker 2 dihubungkan dengan arus listrik kemudian saklar dihidupkan sehingga *heater* akan memanaskan plat bawah. Air pada plat atas distabilkan dengan menggunakan es. Ketika tercapai suhu tertentu pada plat bawah sesuai yang diatur pada

*automatic thermo-controller*, maka saklar dimatikan untuk memutuskan arus listrik yang mengalir ke *heater* dan *automatic thermo-controller*. Pada kondisi tersebut, terlihat perbedaan suhu antara reservoir panas dan reservoir dingin. Selanjutnya, pengamatan fenomena konveksi direkam dengan durasi waktu  $\pm 1,5$  menit atau  $\pm 90$  detik menggunakan *handycam* (Gambar 3). Langkah-langkah ini dilakukan kembali dengan memvariasikan ketebalan air. Hasil rekaman diamati melalui laptop dengan menggunakan *software windows media player* dan dianalisis (Gambar 3). Data yang diperoleh berupa data kecepatan gerak molekul air, jari-jari konveksi serta dapat diketahui pola aliran molekul air laminar dan turbulen.

Pengambilan data-data tersebut di atas dilakukan dengan menjalankan *software windows media player*. Setelah *software windows media player* dijalankan, kemudian diambil data-data untuk kecepatan, jari-jari, dan pola aliran partikel air, caranya memberi tanda titik-titik pada layar komputer dengan menggunakan spidol saat *windows media player*-nya dihentikan dengan cara menekan tombol *pause*. Data kecepatan gerak molekul air diperoleh dengan memutar kembali hasil rekaman pada *software windows media player*. Kemudian diamati pergerakan molekul yang diwakili oleh SGKJ. Salah satu partikel SGKJ dipilih dan diberi tanda dengan spidol untuk dua titik yang berbeda dengan memainkan tombol *play* dan *pause*. Jarak antara dua titik tersebut dan juga selang waktunya dicatat. Kecepatan gerak molekul air diperoleh dari hasil bagi jarak perpindahan ( $\Delta x$ ) dan selang waktu ( $\Delta t$ ).

Data jari-jari konveksi diperoleh dengan cara mengamati pergerakan molekul air yang diwakili oleh SGKJ dan membuat titik-titik dengan spidol pada layar komputer atau laptop. Titik-titik tersebut dihubungkan sehingga membentuk garis. Pengukuran jari-jari konveksi dibatasi dalam arah dua dimensi saja sesuai dengan arah pengamatan. Untuk mendapatkan gambar yang baik, maka frekuensi *pause* lebih banyak. Ada dua cara menentukan jari-jari konveksi yaitu (1) menghitung jari-jari konveksi dari gambar yang membentuk setengah lingkaran atau juring lingkaran dan (2) menghitung jari-jari lingkaran dari gambar yang membentuk elips. Cara yang pertama menggunakan pendekatan sudut pusat lingkaran. Sedangkan cara yang kedua, panjang elips merupakan diameter lingkaran jika gerak partikel searah dengan pengamatan sehingga jari-jari lingkaran bisa diketahui. Persamaan yang digunakan untuk menghitung jari-jari konveksi dengan cara pertama yaitu :

$$r = \frac{360^\circ}{2\pi\alpha} \times \text{panjang busur AB} \quad (1)$$

dimana  $r$  jari-jari lingkaran (m) dan  $\alpha$  sudut pusat lingkaran.

Analisis pola aliran molekul air bersamaan dengan analisis kecepatan gerak molekul air dan analisis jari-jari konveksi yaitu mengamati pergerakan molekul air dan memberi tanda berupa titik-titik pada layar komputer atau laptop dengan spidol. Kemudian menghubungkan titik-titik tersebut membentuk suatu garis. Jika titik-titik yang dihubungkan membentuk juring lingkaran, setengah lingkaran, elips ataupun gerak lurus vertikal, maka pola aliran disebut laminar, dimana pola alirannya teratur. Namun, jika pola aliran molekul tidak teratur dan gerakannya sangat cepat disebut pola aliran turbulen.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Alat pengamatan fenomena konveksi *Rayleigh-Benard* (RBC) telah dibuat seperti pada Gambar 4, dimana kotak pengamatan dan plat atas terbuat dari kaca sedangkan plat bawah terbuat dari kotak *stainless*. Media yang digunakan adalah air dan untuk merepresentasikan pergerakan air digunakan serbuk gergaji kayu jati (SGKJ) yang memiliki massa jenis rerata ( $\rho = 1,151 \text{ g/cm}^3$ ). Pada alat ini, dilengkapi *automatic thermo-controller* untuk mengatur suhu reservoir panas (plat bawah) sesuai keinginan. Kemudian pengamatan fenomena RBC dilakukan dengan menggunakan *handycam*. Adapun rangkaian alat pengamatan RBC diperlihatkan pada Gambar 5.



GAMBAR 4. Foto alat pengamatan RBC.

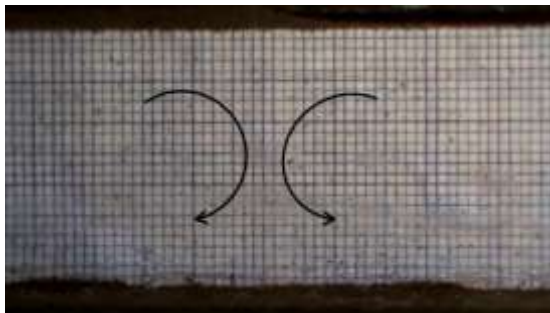


GAMBAR 5. Foto set-up alat pengamatan RBC.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat pengamatan RBC generasi keempat cukup representatif untuk pengamatan dinamika fluida (Gambar 6).

Pengamatan terhadap fenomena konveksi Rayleigh-Benard telah dilakukan untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm dengan memvariasikan perbedaan suhu ( $\Delta T$ ), dimana rata-rata kenaikan suhu  $5^{\circ}\text{C}$ .

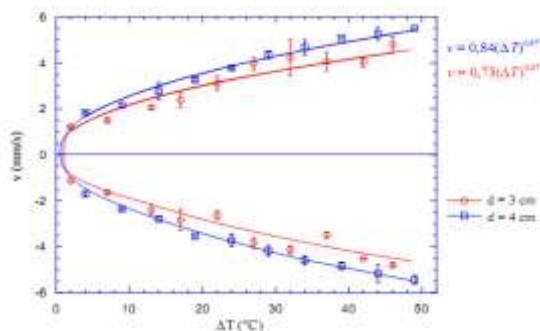
Melalui pengamatan ini dapat diperoleh keterangan berupa kecepatan gerak molekul air, jari-jari konveksi serta pola aliran molekul air karena pengaruh perbedaan suhu antara reservoir panas dan reservoir dingin.



**GAMBAR 6.** Hasil pengujian alat pengamatan RBC generasi keempat. SGKJ bergerak mengikuti aliran molekul air.

### 3.1 Pengamatan Kecepatan Gerak Molekul Air

Pengamatan terhadap kecepatan gerak molekul air menghasilkan diagram percabangan yang merupakan grafik hubungan antara kecepatan gerak molekul air ( $v$ ) terhadap perbedaan suhu ( $\Delta T$ ). Grafik untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm diperlihatkan pada Gambar 7.



**GAMBAR 7.** Diagram percabangan untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm.

Dari grafik yang ditampilkan pada Gambar 7, dapat dijelaskan bahwa kecepatan gerak molekul air meningkat seiring dengan bertambahnya perbedaan suhu. Peningkatan kecepatan gerak molekul air berdasarkan persamaan  $v_{(d=3)} = 0,73(\Delta T)^{0,47}$  dan  $v_{(d=4)} = 0,84(\Delta T)^{0,47}$

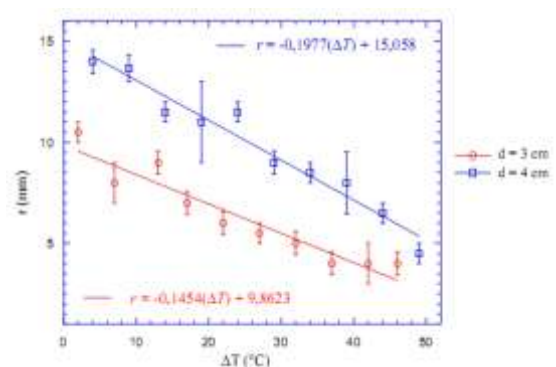
untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm. Jika dibandingkan dengan kajian diagram percabangan, hasil ini sepadan dengan persamaan  $v \sim R^{0,5}$  (Drazin, 2002) sehingga dapat diaplikasikan dengan suatu persamaan untuk peningkatan kecepatan karena pengaruh perbedaan suhu, yaitu  $v \sim (\Delta T)^{0,5}$ . Pada ketebalan air 3 cm dan 4 cm, hasil *fitting* grafik peningkatan kecepatan terhadap perbedaan suhu memiliki persamaan yang sama, yaitu  $v \sim (\Delta T)^{0,5}$ .

Dengan demikian, peningkatan  $\Delta T$  berperan terhadap peningkatan  $v$  sehingga dapat dikatakan bahwa hasil pengamatan sesuai dengan teori.

Telah diketahui bahwa konveksi terjadi pada nilai bilangan Rayleigh ( $R_c$ ) yaitu 1708. Oleh karena itu, perbedaan suhu kritis ( $\Delta T_c$ ) dapat dikaji dengan menggunakan nilai  $R_c$  dan pendekatan konstanta-konstanta fisis pada Tabel 1. Dengan menggunakan pendekatan pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  diperoleh  $\Delta T_c$  untuk ketebalan 3 cm dan 4 cm yaitu  $0,04652^{\circ}\text{C}$  dan  $0,01962^{\circ}\text{C}$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konveksi lebih cepat terjadi ketika ketebalan air lebih besar.

### 3.2 Pengamatan Jari-Jari Konveksi

Pengamatan terhadap jari-jari konveksi ditunjukkan dalam bentuk grafik hubungan antara jari-jari konveksi ( $r$ ) dengan perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) (Gambar 8) untuk ketebalan 3 cm dan 4. Berdasarkan grafik pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa terjadi penurunan secara linier jari-jari konveksi dengan bertambahnya  $\Delta T$ . Hasil *fitting* grafik ditunjukkan melalui persamaan linier yang diperoleh untuk ketebalan 3 cm dan 4 cm berturut-turut, yaitu  $r_{(d=3\text{cm})} = -0,1454(\Delta T) + 9,8623$  dan  $r_{(d=4\text{cm})} = -0,1977(\Delta T) + 15,058$ . Selain itu, dapat diungkapkan juga bahwa ketebalan air mempengaruhi jari-jari konveksi. Terjadinya kenaikan jari-jari konveksi diakibatkan oleh peningkatan ketebalan air.



**GAMBAR 8.** Grafik jari-jari konveksi untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm.

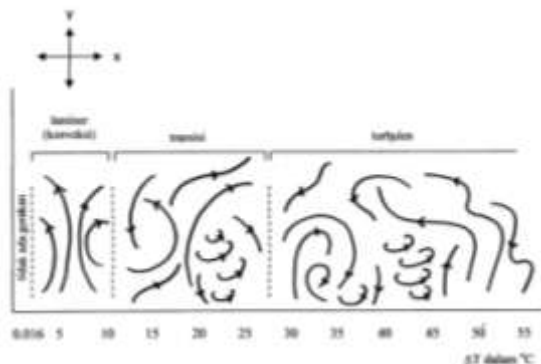
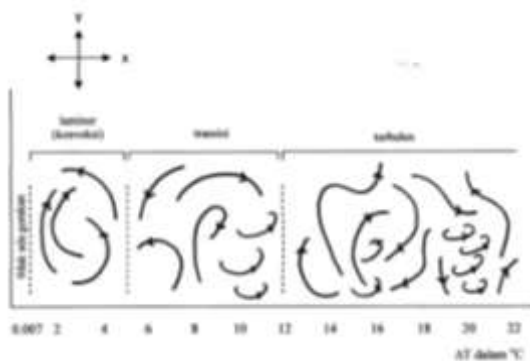
**TABEL 1.** Konstanta-konstanta fisis air [Chandrasekhar, 1961]

| T<br>(°C) | $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $c_v \times 10^{-7}$<br>(ergs/g °C) | $\kappa \times 10^4$<br>(cm <sup>2</sup> /s) | $\nu$<br>(cm <sup>2</sup> /s) | $\alpha \times 10^3$<br>(°C) <sup>-1</sup> |
|-----------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| 20        | 0,998                          | 4,19                                | 14,33                                        | $1,006 \times 10^{-2}$        | 2,0                                        |
| 40        | 0,992                          | 4,18                                | 15,11                                        | $6,58 \times 10^{-3}$         | 3,8                                        |

### 3.3 Pengamatan Pola Aliran Molekul Air

Pergerakan molekul air yang diwakili oleh SGKJ telah diamati dan hasilnya memperlihatkan bahwa pola aliran berbeda ketika  $\Delta T$  meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Pola aliran air yang terlihat adalah laminar dan turbulen. Pola aliran laminar ditandai dengan gerakan molekul air lambat dan teratur.

Sedangkan pola aliran turbulen ditandai dengan gerakan molekul air cepat dan tidak beraturan (*chaos*) serta ditemukan pusaran air yang arahnya berlawanan dengan arah jarum jam. Selain itu, terdapat keadaan transisi antara laminar dan turbulen ditandai dengan molekul air mulai bergerak cepat dan mulai tidak beraturan serta tanda-tanda pusaran air mulai terlihat, namun belum begitu jelas. Pada ketebalan air yang lain pun mengalami pola aliran molekul air yang sama seiring meningkatnya perbedaan suhu yaitu laminar dan turbulen serta keadaan transisi antara laminar dan turbulen.

**GAMBAR 9.** Skema pola aliran molekul air pada ketebalan 3 cm.**GAMBAR 10.** Skema pola aliran molekul air pada ketebalan 4 cm.

Selanjutnya, nilai  $R$  pada keadaan transisi dapat diketahui dengan menggunakan pendekatan konstanta-konstanta fisis air untuk suhu 20°C (Tabel 1), sehingga diperoleh yaitu  $R \sim 10^6$  ketika  $\Delta T = 28^\circ\text{C}$  dan  $\Delta T = 12^\circ\text{C}$  untuk ketebalan air 3 cm dan 4 cm. Hasil ini sesuai dengan nilai  $R$  untuk keadaan transisi yang dikemukakan oleh [Hui Peng, dkk., 2005; Krishnamurti, 1970] yang berkisar pada  $R = 10^6$  dan  $R = 10^7$ . Dengan demikian, pola aliran molekul air yang ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan bahwa hasil pengamatan sesuai dengan teori.

## 4. KESIMPULAN

Alat pengamatan RBC yang telah dibuat cukup representatif digunakan untuk mengamati dinamika fluida dan fenomena konveksi. Perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) mempengaruhi kecepatan gerak molekul air, jari-jari konveksi, dan pola aliran molekul air. Ketika  $\Delta T$  meningkat, kecepatan gerak molekul air juga mengalami peningkatan yang sesuai dengan persamaan  $v \sim (\Delta T)^{0.5}$  serta digambarkan dalam diagram percabangan. Sebaliknya jari-jari konveksi mengalami penurunan secara linier menurut persamaan  $r \sim -0,2(\Delta T) + C$  disebabkan peningkatan  $\Delta T$ . Perubahan  $\Delta T$  juga berpengaruh pada pola aliran molekul air yang terdiri dari laminar dan turbulen serta terdapat fase transisi antara laminar dan turbulen yang memiliki nilai  $R \sim 10^6$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Negeri Manado yang telah memberikan bantuan dana penelitian IPTEKS melalui DIPA UNIMA Tahun 2011.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. M. Jiji, Heat Convection, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Z. Masyithah dan B. Haryanto, Buku Ajar : Perpindahan Panas, Medan: Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, USU, 2006.
- [3] G. Ahlers, S. Grossmann dan D. Lohse, Heat Transfer and Large-Scale Dynamics in Turbulent Rayleigh-Benard Convection, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 503-537 (2009).

- 
- [4] D. H. Rothman, *Nonlinear Dynamics I : Chaos*, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [5] T. Ma dan S. Wang, Dynamic Bifurcation and Stability in The Rayleigh-Benard Convection, *Comm. Math. Sci*, **2**(2), 159–183 (2004).
- [6] P. G. Drazin, *Introduction to Hidrodynamic Stability*, New York: Chambridge University Press, 2002.
- [7] S. Chandrasekhar, *Hidrodynamic and Hydromagnetic Stability*, London: Oxford University Press, 1961.
- [8] S. Hui Peng, L. Davidson dan K. Hanjali, Numerical Analysis of Rayleigh-Benard Convection using Large Eddy Simulation at High Rayleigh Numbers, Prosiding 4<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Williamsburg, VA USA, 2005, hal. 27-29.
- [9] R. Krishnamurti, On The Transition to Turbulent Convection. Part 1 : The Transition From Two to Three Dimensional Flow, *J. Fluid Mech*, **42**(2), 295-307 (1970).
- [10] R. Krishnamurti, On The Transition to Turbulent Convection. Part 2 : The Transition From Two to Three Dimensional Flow, *J. Fluid Mech*, **42**(2), 309-320 (1970).