



# TURBULEN

Penulis:

Ismail, Johanis John Verius, Reza Abdu Rahman

# TURBULEN

**Penulis:**

**Ismail, Johanis John Verius, Reza Abdu Rahman**



# **TURBULEN**

Penulis:

**Ismail, Johanis John Verius, Reza Abdu Rahman**

Desain Cover:

**Septian Maulana**

Sumber Ilustrasi:

**www.freepik.com**

Tata Letak:

**Handarini Rohana**

Editor:

**Reza Abdu Rahman**

ISBN:

**978-623-459-607-6**

Cetakan Pertama:

**Oktober, 2023**

---

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

**by Penerbit Widina Media Utama**

---

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT:**

**WIDINA MEDIA UTAMA**

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas  
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

**Anggota IKAPI No. 360/JBA/2020**

Website: [www.penerbitwidina.com](http://www.penerbitwidina.com)

Instagram: [@penerbitwidina](https://www.instagram.com/penerbitwidina)

Telepon (022) 87355370

# PENGANTAR

Seiring dengan perkembangan zaman pengetahuan dan pembahasan mengenai fenomena turbulen semakin meluas, sehingga dibutuhkan pemahaman dasar-dasar aliran turbulen dalam bentuk penjelasan sederhana dan menghindari kompleksitas fenomena fisik yang terdapat pada fluida yang mengalir dengan mencoba menggunakan pilihan kata yang mudah dipahami. Secara khusus membuka wawasan mahasiswa teknik dan sains yang berada pada level dasar di mana mata kuliah mekanika fluida menjadikan aliran turbulen sebagai sub topik saja. Tidak hanya itu, kesederhanaan penyajian materi dalam buku ini dapat menjadi jembatan bagi kaum awam untuk mengenali fenomena yang bergejolak sebagai peristiwa alam yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan sehari-hari. Walau tidak dipungkiri bahwa masih terdapat bagian-bagian yang sulit dipahami dan kemungkinan masih menjadi objek kajian saat ini.

Buku ini tersusun tujuh bagian, yang dimulai dari Bagian ke-satu yang membahas suatu paradigma dari aliran-aliran turbulen, dilanjut ke bagian ke-dua tentang sifat-sifat aliran turbulen. Bagian ke-tiga dilanjutkan mengenai pembahasan mengenai tahapan-tahapan bagaimana mencapai kondisi turbulen, kemudian dilanjut bagian ke-empat tentang pendekatan model-model empiris yang digunakan dari fenomena turbulen, dilanjutkan juga pada bagian ke-lima mengenai pendekatan metode yang digunakan yaitu deterministik atau statistik. Bagian ke-enam membahas mengenai keterbatasan-keterbatasan di dalam melakukan menganalisis fenomena turbulen, dilanjut pada bagian terakhir yang ke-tujuh mengenai konsep kaskade dan intermitensi.

Penyusun menyadari bahwa masih banyak kekurangan di dalam penulisan buku, oleh karena itu penyusun mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun. Penulis berharap buku ini dapat berguna di dalam upaya menyajikan konsep turbulensi secara sederhana dan meningkatkan minat penelitian aliran turbulen untuk mendapatkan gambaran tentang turbulensi, memahami karakteristik aliran turbulen dan juga melihat lebih jauh bagaimana parameter aliran fluida mempengaruhi aliran turbulen.

**Tim Penulis**

# DAFTAR ISI

<b>PENGANTAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>v</b>
<b>BAB 1 PARADIGMA ALIRAN TURBULEN</b> .....	<b>1</b>
A. Pendahuluan .....	1
B. Mengapa Fluida? .....	3
C. Meteorologi dan Geofisika .....	5
D. Rekayasa Termal dan Energi .....	9
E. Rekayasa Sipil .....	11
F. Rekayasa Penerbangan dan Antariksa .....	13
G. Biofluida dan Biomedis .....	16
H. Rekayasa Kimia .....	19
<b>BAB 2 SIFAT-SIFAT ALIRAN TURBULEN</b> .....	<b>27</b>
A. Keacakan dan Ketidakteraturan Secara Ruang-Waktu .....	32
B. Kekacauan Aliran .....	34
C. Luas Jangkauan Oleh Kekuatan Interaksi .....	37
D. Tak Terprediksi .....	40
E. Disipatif .....	42
F. Pergerakan Rotasional .....	42
G. Difusifitas Aliran Turbulen .....	44
<b>BAB 3 TAHAPAN MENCAPAI KONDISI TURBULEN</b> .....	<b>53</b>
A. Kestabilan Fluida .....	56
B. Fenomena Fase Transisi .....	63
C. Pembentukan Turbulen .....	69
<b>BAB 4 PENDEKATAN MODEL EMPIRIS</b> .....	<b>75</b>
A. Aliran dalam Pipa Tabung .....	77
B. Lapisan Batasan .....	84
C. Semburan <i>Jet</i> dan <i>Plume</i> .....	87
D. Olakan Turbulen ( <i>Wake</i> ) .....	91
E. Kuasi-Isotropis dan Aliran Homogen .....	95
<b>BAB 5 ANTARA METODE DETERMINISTIK ATAU STATISTIK</b> .....	<b>103</b>
A. Metode Pendekatan .....	105
B. Prinsip Reduksi .....	109

C. Turbulensi dan Kekacauan Deterministik.....	113
D. Metode dan Mekanisme Statistik.....	114
E. Dekomposisi .....	117
<b>BAB 6 KETERBATASAN ANALITIK .....</b>	<b>123</b>
A. Solusi Tunggal .....	123
B. Persamaan <i>Navier-Stokes</i> .....	124
C. Kendala Penetapan Solusi Aliran Turbulen .....	127
<b>BAB 7 KONSEP KASKADE DAN INTERMITENSI .....</b>	<b>135</b>
A. Konsep Kaskade .....	135
B. Intermitensi .....	142
<b>PROFIL PENULIS .....</b>	<b>157</b>



## PARADIGMA ALIRAN TURBULEN

---

*“Equipped with his five senses, man explores the universe around him and calls the adventure Science”* **Edwin Hubble**

### A. PENDAHULUAN

Saat ini, manusia dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain dengan cepat menggunakan transportasi udara, laut dan darat. Orang-orang sering mendengar, mendapat berita, atau cerita mengenai pengalaman seseorang saat melakukan perjalanan menggunakan pesawat terbang, yaitu kejadian orang-orang berada dalam kabin yang terjebak di lorong pesawat atau merasa terhuyung-huyung, bergoyang ke kiri ke kanan, menabrak kursi, atau saat pesawat terasa bergetar hingga ke kursi penumpang sewaktu pesawat yang ditumpangi melewati awan tebal. Bahkan di saat yang lain mendapatkan pengalaman yang berbeda yakni minuman terjatuh, perut terasa mual, bahkan beberapa orang mendapatkan memar akibat terbentur pada kursi dan seterusnya. Kejadian seperti itu sering menjadi sumber kelucuan yang dilukiskan dan ditambahkan dalam kartun-kartun humor seperti yang diberikan pada Gambar 1.1.



# REFERENSI

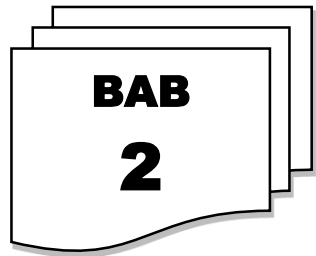
- Aggarwal, S., Sinha, T., Kukreti, Y., Shikhar, S., 2020. Media bias detection and bias short term impact assessment. *Array* 6, 1–13. doi:10.1016/j.array.2020.100025
- Aloyan, A.E., 2010. Mathematical modelling of convective clouds taking into account phase transitions. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* 25, 399–418. doi:10.1515/RJNAMM.2010.026
- Aly, A.M., 2014. Influence of Turbulence , Orientation, and Site Configuration on the Response of Building to Extreme Wind. *Sci. World Journal*, Hindawi 2014. doi:10.1155/2014/178465
- Arinina, M.P., Zuev, K. V, Kulichikhin, V.G., Malkin, A.Y., 2020. Effect of Composition and Interfacial Tension on the Rheology and Morphology of Heavy Oil-In-Water Emulsions. *ACS Omega* 5, 16460–16469. doi:10.1021/acsomega.0c00769
- Aristodemou, E., Maria, L., Mottet, L., Pavlidis, D., Constantinou, A., Pain, C., Robins, A., Apsimon, H., 2018. How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood \*. *Environ. Pollut.* 233, 782–796. doi:10.1016/j.envpol.2017.10.041
- Austin, P.H., Baker, M.B., Blyth, A.M., Jensen, J.B., 1985. Small-Scale Variability in Warm Continental Cumulus Clouds. *J. Atmos. Sci.* 42.
- Baker, B.A., 1992. Turbulen Entrainment an Mixing in Clouds: A New Obsevational Approach. *J. Atmos. Sci.* 5.
- Batchelor, G.K., 1951. Pressure Fluctuation in Isotropic Turbulence. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 47, 359–374. doi:10.1017/S0305004100026712
- Brodmann, M., Cahill, T.J., Hil, D.P., Carapetis, J., Catapano, A.L., Chugh, S.S., Cooper, L.T., Coresh, J., 2020. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990–2019 (Update From the GBD 2019 Study). *J. Ameracan Coll. Cardiol.* 76. doi:10.1016/j.jacc.2020.11.010
- Ceglia, F., Macaluso, A., Marrasso, E., Sasso, M., Vanoli, L., 2020. Modelling of Polymeric Shell and Tube Heat Exchangers for Low - Medium Temperature Geothermal Applications. *energies* 13, 1–26. doi:10.3390/en13112737

- Davenport, A.G., 1971. The Response of Six Building Shapes to Turbulent Wind. *Philos. Trans. R. Soc. London A* 269. doi:10.1098/rsta.1971.0039
- Dempster, G., 2020. The communication of scientific research in news media: Contemporary challenges and opportunities. *J. of Science Commun.* 19, 1–6. doi:10.22323/2.19030306
- Donahue, B.Y.M.Z., 2019. Turbulence , explained [WWW Document]. *Natl. Geogr. Mag.* URL <https://www.nationalgeographic.co.uk/travel-and-adventure/2019/02/turbulence-explained> (accessed 4.6.21).
- Feriet, J.K. de, 1945. *Turbulent Atmospheric Diffusion : The First Twenty-Five Years, 1920-1945.*
- Gasser, P., 2020. A review on energy security indices to compare country performances Patrick. *Energy Policy* 139, 111339. doi:10.1016/j.enpol.2020.111339
- Gogoi, T.K., Dixit, U.S., 2018. *Introduction to Mechanical Engineering - Thermal Engineering.* Springer, Cham-Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-78488-5
- Golding, W.L., 2002. Turbulence and Its Impact on Commercial Aviation. *J. Aviat. Educ. Res.* 11. doi:10.15394/jaaer.2002.1301
- Gorjikhah, F., Davaran, S., Salehi, R., Bakhtiari, M., Hasanzadeh, A., Panahi, Y., Emamverdy, M., 2016. Improving “ lab-on-a-chip ” techniques using biomedical nanotechnology : a review. *Artif. Cells, Nanomedicine, Biotechnol.* 1401. doi:10.3109/21691401.2015.1129619
- Gupta, S., Ramesh, K., Ahmed, S., Kakkar, V., 2016. Lab-on-Chip Technology : A Review on Design Trends and Future Scope in Biomedical Applications. *Int. J. Bio-Science Bio-Technology.* doi:10.14257/ijbsbt.2016.8.5.28
- Hasan, S.W., Ghannam, M.T., Esmail, N., 2010. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel* 89, 1095–1100. doi:10.1016/j.fuel.2009.12.021
- Johnson, A., Sherwin, K., 1996. *Foundations of Mechanical Engineering, 1st ed.* Chapman and Hall, New Delhi. doi:10.1007/978-1-4899-7112-8

- Karatayev, M., Hall, S., 2020. Establishing and comparing energy security trends in resource-rich exporting nations (Russia and the Caspian Sea region). *Resour. Policy* 68. doi:10.1016/j.resourpol.2020.101746
- Kim, Jung-hoon, Park, J., Kim, S., Kim, Jeonghoe, Lee, E., Baek, S., Lee, G., 2021. A Detection of Convectively Induced Turbulence Using In Situ Aircraft and Radar Spectral Width Data. *Remote Sens.* 13, 1–22. doi:10.3390/rs13040726
- Kotnala, A., Zheng, Y., 2019. Digital Assembly of Colloidal Particles for Nanoscale Manufacturing. Part. Part. Syst. Charact. 1900152, 1–15. doi:10.1002/ppsc.201900152
- Kraus, A.D., Welty, J.R., Aziz, A., 2011. Introduction to Thermal and Fluid engineering, eBook-PDF. ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Lenderink, G., Meijgaard, E. Van, 2001. Impacts of cloud and turbulence schemes on integrated water vapor : comparison between model predictions and GPS measurements. *Meteorol. Atmos. Phys.* 144, 131–144.
- Lipps, F.B., 1977. A Study of Turbulence Parameterization in a Cloud Model. *J. Atmos. Sci.* 34, 1751–1772.
- Longarini, N., Cabras, L., Zucca, M., Chapain, S., Aly, A.M., 2017. Structural Improvements for Tall Buildings under Wind Loads : Comparative Study. *Shock Vib.* 2017, 1–19. doi:10.1155/2017/2031248
- Malinowski, S.P., Zawadzki, I., 1993. On the Surface of Clouds. *J. Atmos. Sci.* 50.
- Marlton, G.J., 2016. On the development, characterisation and applications of a balloon-borne atmospheric turbulence sensor. Reading.
- Nickerson, R.S., 1998. Confirmation Bias : A Ubiquitous Phenomenon in Many Guises. *Rev. Gen. Psychol.* 2, 175–220.
- Palacio-caro, I.D., Alvarado-torres, P.N., Cardona-sep, L.F., 2020. Numerical Simulation of the Flow and Heat Transfer in an Electric Steel Tempering Furnace. *energies* 13. doi:10.3390/en13143655
- Pasquill, F., 1971. Wind Structure in the Atmospheric Boundary Layer. *Philos. Trans. R. Soc. London A* 269, 439–458. doi:10.1098/rsta.1971.0043

- Rubenstein, D.A., Yin, W., Frame, M.D., 2015. *BIOFLUID MECHANICS - An Introduction to Fluid Mechanics, macrocirculation, and Microcirculation*, 2nd ed. Elsevier Inc., London.
- Sabbah, H.N., Stein, P.D., 1974. Turbulent Blood Flow in Humans. *Circ. Res.* 38.
- Saintillan, D., 2018. Rheology of Active Fluids. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 563–592. doi:10.1146/annurev-fluid-010816-060049
- Scruton, C., Rogers, E.W.E., 1971. Steady and Unsteady Wind Loading of Buildings and Structures. *Philos. Trans. R. Soc. London A* 269, 353–387.
- Sebastian, B., Dittrich, P.S., 2018. Microfluidics to Mimic Blood Flow in Health and Disease. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 483–504. doi:10.1146/annurev-fluid-010816-060246
- Seto, J., Tomine, K., 2011. Artificial Cloud Seeding Using Liquid Carbon Dioxide : Comparisons of Experimental Data and Numerical Analyses. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50, 1417–1431. doi:10.1175/2011JAMC2592.1
- Taylor, G.I., 1927. Turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 53.
- Truesdell, C., Rajagopal, K.R., 2000. *An Introduction to the Mechanics of Fluids*, 1999th ed. Birkhauser, Boston, USA. doi:10.1007/9780817648466
- Truskey, G.A., Yuan, F., Katz, D.F., 2004. *Transport Phenomena in Biological Systems*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Wang, M., Yang, N., Guo, Z., 2011. Non-Fourier heat conductions in nanomaterials. *J. Appl. Phys.* 064310. doi:10.1063/1.3634078
- Zhang, X., Oseyemi, A.E., 2019. Microfluidic Passive Valve with Ultra-Low Threshold Pressure for High-Throughput Liquid Delivery. *Micromachines* 10, 1–12. doi:10.3390/mi10120798
- Zhang, X., Sun, K., Abulimiti, A., Xu, P., Li, Z., 2019. Microfluidic System for Observation of Bacterial Culture and Effects on Biofilm Formation at Microscale. *Micromachines*. doi:10.3390/mi10090606
- Zhang, X., Zhang, Z., 2019. Microfluidic Passive Flow Regulatory Device with an Integrated Check Valve for Enhanced Flow Control. *Micromachines* 10, 1–12. doi:10.3390/mi10100653

- Zhao, Y.C., Vatankhah, P., Goh, T., Michelis, R., Kyanian, K., Zhang, Y., Li, Z., Ju, L.A., 2021. Hemodynamic analysis for stenosis microfluidic model of thrombosis with refined computational fluid dynamics simulation. *Nat. Sci. Reports* 11, 1–10. doi:10.1038/s41598-021-86310-2
- Zheng, W., Xue, F., Zhang, M., Wu, Q., Yang, Z., Ma, S., Liang, H., Wang, C., Wang, Y., Ai, X., Yang, Y., Yu, K., 2020. Charged Particle (Negative Ion) - Based Cloud Seeding and Rain Enhancement Trial Design and Implementation. *Water* 12, 1–22. doi:10.3390/w12061644



## SIFAT-SIFAT ALIRAN TURBULEN

---

Seperti telah diungkapkan dalam bab 1 buku ini bahwa bagi kalangan awam, sebagai salah satu fenomena alam (secara ilmiah disebut fenomena fisik), ada sebuah pandangan tentang fenomena turbulensi yang dianggap sebagai “hak” dari dunia penerbangan. Selain itu, terdapat juga banyak anggapan bahwa fenomena turbulensi atau aliran turbulen hanya terjadi di udara dan itu berhubungan dengan pesawat yang sedang terbang di angkasa, meskipun masih terdapat benda lain yang dapat mengangkasa seperti balon udara misalnya. Sedangkan para sopir, nahkoda kapal laut, para dokter, atau orang yang memiliki keahlian jauh dari bidang penerbangan tidak akan mempunyai pengetahuan akan turbulensi. Sehingga ketika orang-orang berbicara mengenai fenomena ini, maka perihal tersebut hanya diketahui dan dapat dijelaskan oleh orang-orang yang memiliki pekerjaan dalam penerbangan seperti pilot, insinyur pesawat, dan sedikit mungkin oleh pramugari. Namun, aliran turbulen dengan fenomena yang menandainya tidak mengawang di angkasa, aliran turbulen juga “membumi” sehingga menyentuh aspek-aspek dan lingkungan manusia di bumi (daratan).

# REFERENSI

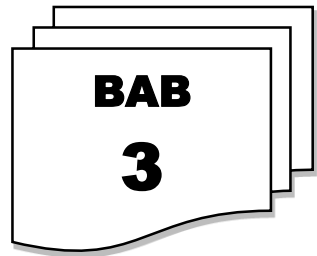
- Bendaas, S., 2018. Periodic wave shock solutions of Burgers equations. *Cogent Math. Stat.* 15. doi:10.1080/25742558.2018.1463597
- Bershadskii, A., 2019. Chaotic and turbulent dispersion of heavy inertial particles. *Phys. Fluids Dyn.* 3, 3–6.
- Bryden, H.L., Longworth, H.R., Cunningham, S.A., 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 degree N. *Nature* 438, 2004–2006. doi:10.1038/nature04385
- Chen, W.Y., 1974. Energy Dissipation rates of Free Atmospheric Turbulence. *J. Atmos. Sci.* 31, 2–5.
- Compagner, A., 1991. Definitions of randomness. *Am. J. Phys.* 700. doi:10.1119/1.16747
- Cotton, W.R., 1975. Theoretical Cumulus Dynamics. *Rev. Geophys. Sp. Phys.* 13.
- Craske, J., Reeuwijk, M. Van, 2015. Energy dispersion in turbulent jets . Part 2 . A robust model for unsteady jets. *J. Fluid Mech.* 763, 538–566. doi:10.1017/jfm.2014.669
- Dagalp, R., 2019. Randomness and Chaos : Explorations of Chaos and Complexity, in: *Chaos, Complexity and Leadership 2017*. Springer International Publishing AG, pp. 621–648. doi:10.1007/978-3-319-89875-9
- Davidson, P.A., 2004. *Turbulence-An Introduction for Scientist and Engineers*, 1st ed. Oxford University Press, New York, USA.
- Dhanak, A.M., 1958. Momentum and Mass Transfer by Eddy Diffusion in a Wetted-wall Channel. *A.I.Ch.E. J.* 4, 190–196. doi:10.1002/aic.690040213
- Feriet, J.K. de, 1945. Turbulent Atmospheric Diffusion : The First Twenty-Five Years, 1920-1945. doi:10.1016/S0065-2687(08)60450-1
- Franca, M.J., Brocchini, M., 2015. Turbulence in Rivers, in: P. Rowiński, Radecki-Pawlik, A. (Eds.), *Rivers—Physical, Fluvial and Environmental Processes*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 51–78. doi:10.1007/978-3-319-17719-9
- Frisch, U., Bec, J., 2000. Burgulence. arXiv:nlin/0012033v2 1–41.

- H. W. Wyld, J., 1961. Formulation of the Theory of Turbulence in an Incompressible Fluid. *Ann. Phys. (N. Y.)*. 165, 143–165.
- Harper, B.A., Kepert, J.D., Ginger, J.D., 2010. Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Ichimiya, M., Nakamura, I., 2013. Science and Randomness Representation in Turbulent Flows with Kolmogorov Complexity ( In Mixing Layer )\*. *J. Fluid Sci. Technol.* 8, 407–422. doi:10.1299/jfst.8.407
- Johnson, R.S., 1980. Water Waves and Korteweg-de Vries Equations. *J. Fluid Mech.* 97, 701–719. doi:10.1017/S0022112080002765
- Lesieur, M., 2008. *Turbulence in Fluids*, fourth. ed. Springer Netherlands, Grenoble.
- Li, Y., Zhang, H., Lin, Z., He, Z., Xiang, J., Su, X., 2019. Relationship between wear formation and large-particle motion in a pipe bend. *R. Soc. Open Sci.* 6, 1–15. doi:10.1098/rsos.181254
- Lorenz, E.N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmos. Sci.* 20. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- Maier, E., Chien, L., Hunter, D.A., 2016. Turbulence and Star Formation in A Sample of Spiral Galaxies. *Astron. J.* 152, 1–15. doi:10.3847/0004-6256/152/5/134
- Mihalache, D., Torner, L., Moldoveanu, F., Panoiu, N.C., Truta, N., 1993. Soliton Solutions for a Perturbed Nonlinear Schrodinger Equation. *J. Phys. A Math. Theor.* 757, 757–765.
- Mitrovic, B.M., Papavassiliou, D. V, 2004. Effects of a first-order chemical reaction on turbulent mass transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 47 47, 43–61. doi:10.1016/S0017-9310(03)00380-6
- Ohashi, H., Sato, H., Goto, M., Yan, X., Sumita, J., Tazawa, Y., Nomoto, Y., Aihara, J., Inaba, Y., Fukaya, Y., Noguchi, H., Imai, Y., Tachibana, Y., 2013. A Small-Sized HTGR System Design for Multiple Heat Applications for Developing Countries. *Int. J. Nucl. Energy* 2013. doi:10.1155/2013/918567
- Ortiz, R.D., Ramirez, A.Ma.M., N´uñez, O.M., 2020. Solution of Burger Equation with Viscosity Applying the Boundary Layer Theory. arXiv:2009.05715v1.



- Phillips, L., 2018. Turbulence, the oldest unsolved problem in physics [WWW Document]. www.arstechnica.com. URL <https://arstechnica.com/science/2018/10/turbulence-the-oldest-unsolved-problem-in-physics/> (accessed 6.21.21).
- Priestley, C.H.B., McCormick, R.A., Pasquill, F., 1958. Turbulent diffusion in the atmosphere. Geneva - Switzerland.
- Ramshaw, J.D., 2012. Turbulent concentration diffusion in multiphase flow. *Phys. Fluids* 093301. doi:10.1063/1.4748348
- Risso, R.I.C., Fabre, J., 1997. Diffusive turbulence in a confined jet experiment. *J. Fluid Mech.* 337, 233–261. doi:10.1017/S0022112097004965
- Schekochihin, A.A., Cowley, S.C., 2013. Turbulence, magnetic fields, and plasma physics in clusters of galaxies. *Phys. Plasmas* 056501. doi:10.1063/1.2179053
- Schwarz, W.H., Hoelscher, H.E., 1958. Mass Transfer in a Wetted-wall Column: Turbulent Flow. *A.I.Ch.E. J. 2*. doi:10.1002/aic.690020121
- Sharp, B.B., O'Neill, I.C., 1971. Lateral diffusion of large particles in turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* 45, 575–584.
- Shockling, M.A., Allen, J.J., Smits, A.J., 2006. Roughness effects in turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* 564, 267–285. doi:10.1017/S0022112006001467
- Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972. *A First Course in Turbulence*. The MIT Press, Cambridge, UK.
- Vallés-Pérez, D., Planelles, S., Quilis, V., 2021. Troubled cosmic flows : turbulence, enstrophy and helicity from the assembly history of the intracluster medium. *Cosmol. Nongalactic Astrophys.* 19, 1–19. doi:10.1093/mnras/stab880
- Vassilicos, J.C., 2015. Dissipation in Turbulent Flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 47, 95–114. doi:10.1146/annurev-fluid-010814-014637
- Werndl, C., 2013. What Are the New Implications of Chaos for Unpredictability? *Br. J. Philos. Sci.* doi:10.1093/bjps/axn053
- Wilczek, M., 2010. *Statistical and Numerical Investigations of Fluid Turbulence*. Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

- Winton, M., 2003. On the Climatic Impact of Ocean Circulation. *J. Clim.* 16, 2875–2889. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2875:OTCIOO>2.0.CO;2
- Winton, M., Griffies, S.M., Samuels, B.L., 2012. Connecting Changing Ocean Circulation with Changing Climate. *J. Clim.* 26, 2268–2278. doi:10.1175/JCLI-D-12-00296.1
- Zhang, H., Yokomine, T., Kunugi, T., 2015. Turbulence Modulation of The Upward Turbulent Bubbly Flow in Vertical Ducts. *Nucl. Eng. Technol.* 47, 513–522. doi:10.1016/j.net.2015.04.006



## TAHAPAN MENCAPAI KONDISI TURBULEN

---

*“Aliran yang terjadi di alam tidak hanya harus mengikuti persamaan dinamika fluida tetapi juga harus stabil” (Landau and Lifshits, 1959)*

Turbulensi tidak terjadi secara tiba-tiba seperti jin dalam kisah Aladin dari dongeng negeri seribu satu malam. Akan tetapi bila dicermati, kemunculan jin biru Aladin akan terwujud hanya jika teko, yang adalah rumah untuk si jin, mendapat ‘gangguan’ yakni dalam wujud digosok atau diusap sebanyak tiga kali. Jadi, kegiatan menggosok atau mengusap teko merupakan gangguan yang memberi energi bagi makhluk jin untuk keluar dari rumahnya. Masih banyak analogi yang lebih tepat selain analogi singkat ini yang ingin menggambarkan bahwa untuk membangkitkan turbulensi memerlukan energi dalam rupa ‘gangguan’, sekecil apa pun itu. Kecilnya gangguan tidak proporsional dengan dampaknya, turbulensi adalah nonlinier dan tidak terikat pada prinsip-prinsip Newton (Lorenz 1963).

Pada industri pengolahan dengan pelibatan fluida, baik cair maupun gas, sifat aliran umumnya turbulen, tidak terkecuali dengan pemrosesan cairan atau gas melalui pompa, kompresor, jaringan pipa pada umumnya akan turbulen. Begitu juga dalam bidang rekayasa seperti sipil dan mesin, aliran turbulen akan sering ditemui. Sistem rekayasa telah berkembang menjadi kompleks dengan melibatkan perpindahan massa, termal, pencampuran materi sebagai bagian reaksi kimia hingga persoalan sumber

# REFERENSI

- Alvarez, C. F., & Arnold, F. (2020). What the past decade can tell us about the future of coal. *iea*. <https://www.iea.org/commentaries/what-the-past-decade-can-tell-us-about-the-future-of-coal>. Accessed 14 July 2021
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics : Fundamental and Applications* (1st ed.). New York: McGraw-Hill.
- Dimotakis, P. (2000). The mixing transition in turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 409, 69–98.
- Friedlander, S., & Yudovich, V. (1962). Instabilities in Fluid Motion. *NOTICES OF THE AMS*, 46(11).
- Gilbrech, R. J. (1991). *An Experiment Investigation of Chemically-Reacting, Gas-Phase Turbulent Jets*. Thesis, Caltech.
- Hall, P. (2020). An instability mechanism for channel flows in the presence of wall roughness. *Journal of Fluid Mechanics*, 899(R2), 1–14. doi:10.1017/jfm.2020.493
- IEA. (2020). *Global Energy Review 2020*.
- JLM Poiseuille. (1840). Recherches experimentelles sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diameters. *C.R. Acad. Scie.*, 11, 961–967.
- Katz, J. I. (2009). Von Neumann Turbulent Transport Model. *arXiv:0906.1368v1*, (June), 1–9.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Science*, 20. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- Moonen, P., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9–11), 1289–1314. doi:10.1016/j.jweia.2007.02.027

- Osborne, F. R. S. R. (1883). An Experimental Investigation of the Circumstances which Determine Whether the Motion of Water Shall be Direct or Sinuous And of the Law of Resistance in Parallel Channels. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, March*. doi:10.1098/rstl.1883.0029
- Pomeau, Y., Normand, C., & Velarde, M. G. (1977). Convective instability : A physicist's approach. *Reviews of Modern Physics, 49*(3). doi:10.1103/RevModPhys.49.581
- Raissi, M., Yazdani, A., & Karniadakis, G. E. (2020). Hidden Fluid Mechanics : Learning Velocity and Pressure Fields from Flow Visualization. *Science, 4741*(January), 1–8. doi:10.1126/science.aaw4741
- Riley, C. (2021). Europe aims to kill gasoline and diesel cars by 2035. *CNN Business*.  
<https://edition.cnn.com/2021/07/14/business/eu-emissions-climate-cars/index.html>. Accessed 16 July 2021
- Shockling, M. A., Allen, J. J., & Smits, A. J. (2006). Roughness effects in turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics, 564*, 267–285. doi:10.1017/S0022112006001467
- Song, S., Yang, X., Xin, F., & Lu, T. J. (2018). Modeling of surface roughness effects on Stokes flow in circular pipes. *Physics of Fluids, 023604*. doi:10.1063/1.5017876
- Taylor, J. B., Carrano, A. L., & Kandlikar, S. G. (2006). Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow — past, present, and future. *International Journal of Thermal Sciences, 45*, 962–968. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2006.01.004



## PENDEKATAN MODEL EMPIRIS

---

Model empirik sebagai salah satu metode alternatif dari sekian model pendekatan yang dilakukan untuk mendapatkan pemahaman lebih komprehensif akan sifat-sifat atau perilaku fluida saat sedang mengalir, karena saat-saat fluida sedang mengalir ini dapat dengan mudah diperoleh kemudian diamati pada lingkungan sekitar manusia dibandingkan dengan gejala fisika lainnya. Meskipun pemahaman sebelumnya membatasi fenomena aliran turbulen dalam suatu definisi yang statis atau universal belum tercapai hingga sekarang. Kondisi tersebut berlawanan dengan contoh-contoh fenomena turbulen, cukup mudah untuk mendapatkannya dari kejadian alam di sekitar manusia. Begitupun dengan pengaruh dan efek aliran turbulen yang cukup mudah diamati, seperti bentuk gumpalan kumpulan awan oleh fluktuasi aliran angin, sedimentasi di dasar sungai, dan seterusnya.

Dalam bab 3 sebelumnya telah menampilkan sekilas paparan mengenai viskositas turbulen yang memiliki tingkatan utama dengan komposisi yang terbesar dalam karakterisasi turbulen. Begitu pula dengan difusivitas turbulen, bahkan bila dibandingkan dengan ukuran molekulnya, yang dihasilkan dan didominasi oleh pusaran-pusaran (*eddies*) dalam skala besar. Pusaran dengan skala kecil hanya efektif untuk difusi pada distribusi lebih kecil dan pusaran skala besar akan aktif saat distribusi membesar. Ukuran distribusi konsentrasi dapat diperoleh dari kuat relatif bilangan gelombang *Fourier* (Berkowicz and Prahm, 1980).

## REFERENSI

- Ahmed, S.A., Giddens, D.P., 1983. Flow Disturbance Measurements Through A Constricted Tube At Moderate Numbers. *J. Biomech.* 16, 955–963.
- Avila, K., Moxey, D., Lozar, A. de, Avila, M., Barkley, D., Hof, B., 2014. The Onset of Turbulence in Pipe Flow. *Sci. AAAS* 192. doi:10.1126/science.1203223
- Bejan, A., Ziaei, S., Lorente, S., 2014. Evolution: Why all plumes and jets evolve to round cross sections. *Sci. Rep.* 4, 1–5. doi:10.1038/srep04730
- Berger, S.A., Jou, L., 2000. Flows in Stenotic Vessels. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 347–382.
- Berkowicz, R., Prahm, L.P., 1980. On the spectral turbulent diffusivity theory for homogeneous turbulence. *J. Fluid Mech.* 100, 433–448.
- Bernard, P.S., Wallace, J.M., 2002. *TURBULENT FLOW: Analysis, Measurement, and Prediction*, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Cerbus, R.T., Liu, C., Gioia, G., Chakraborty, P., 2018. Laws of Resistance in Transitional Pipe Flows. *Phys. Rev. Lett.* 120, 54502. doi:10.1103/PhysRevLett.120.054502
- Clark, C., 1976. The Fluid Mechanics of Aortic Stenosis-I. Theory and Steady Flow Experiments\*. *J. Biomech.* 9, 521–528.
- Colonia, S., Romano, G.P., 2016. Steady and Pulsating Turbulent Flows in Complex Pipe Geometries. *J. Fluids Eng.* 136, 1–15. doi:10.1115/1.4027825
- Cutrone, L., Palma, P. De, Pascazio, G., Napolitano, M., 2008. Predicting transition in two- and three-dimensional separated flows. *Int. J. Heat Fluid Flow* 29, 504–526. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.11.005
- Davidson, P.A., Kaneda, Y., Moffatt, K., Sreenivasan, K.R. (Eds.), 2011. *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Dyke, M. Van, 1982. *An Album of Fluid Motion*. The Parabolic Press, California, USA.
- Eckhardt, B., 2011. A Critical Point for Turbulence. *Sci. AAAS* 165. doi:10.1126/science.1208261
- Eckhardt, B., Schneider, T.M., Hof, B., Westerweel, J., 2007. Turbulence Transition in Pipe Flow. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39, 447. doi:10.1146/annurev.fluid.39.050905.110308
- Friedlander, S., Yudovich, V., 1962. *Instabilities in Fluid Motion*. Not. AMS 46.
- Gutmark, E., Ho, C., 2006. Preferred modes and the spreading rates of jets. *Phys. Fluids* 2932. doi:10.1063/1.864058
- He, S., Jackson, J.D., 2000. A study of turbulence under conditions of transient flow in a pipe. *J. Fluid Mech.* 408, 1–38. doi:10.1017/S0022112099007016
- Idelchik, I.E., 2007. *HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE*, 4th ed. Begell House, Inc, Moscow.
- Kühnen, J., Song, B., Scarselli, D., Budanur, N.B., Riedl, M., Willis, A.P., Avila, M., Hof, B., 2018. Destabilizing turbulence in pipe flow. *Nat. Phys.* doi:10.1038/s41567-017-0018-3
- Lim, D.C., Al-kayiem, H.H., Kurnia, J.C., 2018. Comparison of different turbulence models in pipe flow of various Reynolds numbers, in: *AIP Conference Proceedings* 2035. AIP Publishing, pp. 020005–1. doi:10.1063/1.5075553
- List, E.J., 1982. Turbulent jets and plumes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 14, 189–212.
- Lu, H., 2018. Study on the Effect of Reciprocating Pump Pipeline System Vibration on Oil Transportation Stations. *energies* 11, 1–24. doi:10.3390/en11010132
- Matsuda, K., Onishi, R., Takahashi, K., 2018. Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 173, 53–66. doi:10.1016/j.jweia.2017.11.015
- McKeon, B.J., Swanson, C.J., Zagarola, M.V., Donnelly, R.J., Smits, A.J., 2004. Friction factors for smooth pipe flow. *J. Fluid Mech.* 66, 671–684. doi:10.1017/S0022112004009796



- Meseguer, A., Trefethen, L.N., 2003. Linearized pipe flow to Reynolds number  $10^7$ . *J. Comput. Phys.* 186, 178–197. doi:10.1016/S0021-9991(03)00029-9
- Morris, P.D., Narracott, A., Tengg-koblighk, H. Von, Alejandro, D., Soto, S., Hsiao, S., Lungu, A., Evans, P., Bressloff, N.W., Lawford, P. V, Hose, D.R., Gunn, J.P., 2016. Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine. *Heart* 102, 18–28. doi:10.1136/heartjnl-2015-308044
- Mullin, T., 2011. Experimental Studies of Transition to Turbulence in a Pipe. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43, 1–24. doi:10.1146/annurev-fluid-122109-160652
- Onimowo, D., 2018. The effects of fluid flow geometry on the physics of flow. Anglia Ruskin University.
- Osborne, F.R.S.R., 1883. An Experimental Investigation of the Circumstances which Determine Whether the Motion of Water Shall be Direct or Sinuous And of the Law of Resistance in Parallel Channels. *Philos. Trans. R. Soc. London March.* doi:10.1098/rstl.1883.0029
- Piomelli, U., Balaras, E., Pascarelli, A., 2011. Turbulent structures in accelerating boundary layers. *J. Turbul.* 1, 37–41. doi:10.1088/1468-5248/1/1/001
- Savill, A.M., 1987. Recent Developments In Rapid-Distortion Theory. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 19.
- Scase, M.M., Caulfield, C.P., Dalziel, S.B., Hunt, J.C.R., 2006. Time-dependent plumes and jets with decreasing source strengths. *J. Fluid Mech.* 563, 443–461. doi:10.1017/S0022112006001212
- Schlichting, H., 2017. Fundamentals of Boundary – Layer Theory, in: *Boundary-Layer Theory*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, pp. 29–50. doi:10.1007/978-3-662-52919-5
- Schlichting, H., 1968. *Boundary Layer Theory*, 7th ed. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Rhode Island.
- Sevilla, A., Martinez-Bazan, C., 2019. Vortex shedding in high Reynolds number axisymmetric bluff-body wakes: local linear instability and global bleed control. arXiv:1912.07088v1 1–14.

- Shockling, M.A., Allen, J.J., Smits, A.J., 2006. Roughness effects in turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* 564, 267–285. doi:10.1017/S0022112006001467
- Stratford, B.S., 1958. The prediction of separation of the turbulent boundary layer. *Fluids Mech.* 5, 1–16.
- Whalley, R.D., Walsh, J.L., 2016. Turbulent jet flow generated downstream of a low temperature dielectric barrier atmospheric pressure plasma device. *Nat. Publ. Gr.* 1–7. doi:10.1038/srep31756
- White, F.M., 1991. Laminar Boundary Layer, in: *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill, Inc, Rhode Island, p. 230.
- Zanoun, E.S., Kito, M., Egbers, C., 2016. A Study on Flow Transition and Development in Circular and Rectangular Ducts. *J. Fluids Eng.* 131, 1–10. doi:10.1115/1.3112384
- Zijnen, B.G. van der H., 1924. Measurements Of The Velocity Distribution In The Boundary Layer Along A Plane Surface. Technical University Delft, Delft.



**BAB**  
**5**

## **ANTARA METODE DETERMINISTIK ATAU STATISTIK**

---

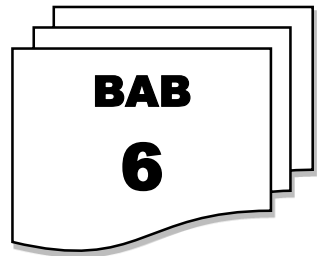
Telah diketahui bersama bahwa turbulen merupakan gejala fisika, menjadi kajian dalam mekanika fluida yang terus berkembang, yang selalu menarik untuk dibahas. Salah satu daya tarik dari fenomena fisis ini adalah persoalan pokok dalam menggambarkan turbulensi karena sifat acak, ketidakstabilan dan kesulitan dalam menduga kecenderungan alirannya. Persoalan ini ditunjang oleh interaksi antar derajat kebebasan dalam aliran turbulen yang *non-lokal* dan kuat.

Kenyataan di lapangan mengindikasikan bahwa belum terdapat instrumen memadai yang dapat menangkap dan mengukur fenomena turbulen ini, ketidakpastian data akuisisi dan sifat acak data sampel menghasilkan perbandingan terbalik antara akurasi yang cukup rendah dan kenaikan kesalahan relatif sebagai konsekuensi sifat turbulen dan *noise* pada sensor (Campbell *et al.*, 2001; Farley *et al.*, 2020; Langford *et al.*, 2015; Melikov *et al.*, 2015). Penempatan alat dan teknik yang diterapkan dalam pengambilan sampel data kovarian-eddy, perlakuan dan pengolahan data terutama kesalahan relatif adalah aspek-aspek yang harus diperhatikan (Bonin *et al.*, 2017; Fulghum, 2014). Namun, tidak kesemua pengukuran turbulensi dari instrumen dengan metode akuisisinya masing-masing menghasilkan sampling kesalahan yang berpengaruh banyak. Dalam situasi pengukuran tertentu, sifat-sifat

# REFERENSI

- Bonin, T.A., Choukulkar, A., Brewer, W.A., Sandberg, S.P., Weickmann, A.M., Pichugina, Y.L., Banta, R.M., Oncley, S.P., Wolfe, D.E., 2017. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar. *Atmos. Meas. Tech.* 10, 3021–3039. doi:10.5194/amt-10-3021-2017
- Campbell, M., Cosgrove, J.A., Greated, C.A., Jack, S., Rockli, D., 2001. Review of LDA and PIV applied to the measurement of sound and acoustic streaming. *Opt. Laser Technol.* 32, 629–639.
- Farley, O.J.D., Osborn, J., Morris, T., Fusco, T., Neichel, B., Correia, C., Wilson, R.W., 2020. Limitations imposed by optical turbulence profile structure and evolution on tomographic reconstruction for the ELT. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 494, 2–13. doi:10.1093/mnras/staa795
- Fulghum, M.R., 2014. Turbulence Measurements In High-Speed Wind Tunnels Using Focusing Laser Differential Interferometry (Thesis). The Pennsylvania State University.
- Guckenheimer, J., 2000. Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields.
- Kraichnan, R.H., Chen, S., 1989. Is There A Statistical Mechanics Of Turbulence? *Phys. D* 37, 160–172. doi:10.1016/0167-2789(89)90126-7
- Langford, B., Acton, W., Ammann, C., Valach, A., Nemitz, E., 2015. Eddy-covariance data with low signal-to-noise ratio: time-lag determination, uncertainties and limit of detection. *Atmos. Meas. Tech.* 8, 4197–4213. doi:10.5194/amt-8-4197-2015
- Melikov, A.K., Popielek, Z., Silva, M.C.G., Care, I., Sefker, T., 2015. Accuracy Limitations for Low-Velocity Measurements and Draft Assessment in Rooms. *HVAC&R Res.* 9669, 1–17. doi:10.1080/10789669.2007.10391465
- Monin, A.S., 1958. The Structure of Atmospheric Turbulence. *Theory Probab. Its Appl.* III, 1–31. doi:10.1137/1103023

- Oh, S., Suh, K., 2007. Investigation of decomposition methods of turbulent flow field beneath wind waves. *researchgate*, pp. 1–11. doi:10.1142/9789812709554
- Orszagt, S.A., 1970. Analytical theories of turbulence. *J. Fluid Mech.* 41, 363–386.
- Václav, U., 2012. Decomposition methods in turbulence research, in: *EPJ Web of Conferences* 25. EDP Sciences, Czech, pp. 01095.p.1-01095.p.21. doi:10.1051/epjconf/201225010
- von Neumann, J., Richtmyer, R.D., 1950. A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks. *J. Appl. Phys.* 232, 1–7. doi:10.1063/1.1699639
- Walker, I.J., 2005. Physical and logistical considerations of using ultrasonic anemometers in aeolian sediment transport research. *Geomorphology* 68, 57–76. doi:10.1016/j.geomorph.2004.09.031
- Westerweel, J., Elsinga, G.E., Adrian, R.J., 2013. Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 45, 409–436. doi:10.1146/annurev-fluid-120710-101204



## KETERBATASAN ANALITIK

---

### A. SOLUSI TUNGGAL

Suatu masalah terkait aliran turbulen pada fluida, khususnya menyangkut masalah rekayasa, diselesaikan dengan menerapkan Persamaan *Navier-Stokes* (Catatan: Persamaan *Navier-Stokes* lebih lanjut akan disingkat dengan akronim PNS) membutuhkan syarat batas dan kondisi awal tertentu. Sebenarnya syarat batas dan kondisi awal tertentu dibutuhkan dalam semua persoalan yang berhubungan dengan metode numerik, juga dalam metode eksperimen. Dengan metode numerik dibantu dengan pemodelan komputasi, tersedia pemodelan *Direct Numerical Simulation* (DNS) yang memungkinkan untuk mendapatkan sepenuhnya solusi terselesaikan pada bilangan *Reynolds* moderat PNS. Meski demikian, patut diingat bahwa penyelesaian yang didapat tidak serta-merta merupakan representasi dari seluruh masalah bahkan yang mirip, karena solusi tertentu dan tidak dalam bentuk analitis kemungkinan tidak banyak menyumbang pada pemahaman dasar fisika aliran turbulen. Seperti disebutkan sebelumnya maka tidak ada suatu kesepakatan khusus menyangkut apa lingkup permasalahan turbulensi mereka dan bagaimana nantinya dengan solusi yang diperoleh. Pemahaman yang diterapkan dalam penyelidikan juga bukan suatu hasil kesepakatan. Khususnya dalam domain tiga dimensi pada semua selang waktu atau semacamnya, PNS terlihat seperti kehilangan kemampuan menyajikan solusi halus sebagai pembuktian keunikan dari persamaan ini.

## REFERENSI

- Balk, A.M., 2000. On the Kolmogorov – Zakharov spectra of weak turbulence. *Phys. D* 139, 137–157.
- Bradshaw, P., Ferriss, D.H., Attwell, N.P., 1967. Calculation of boundary layer development using the turbulent energy equation. *J. Fluid Mech.* 28, 593. doi:10.1017/S0022112067002319
- Doering, C.R., Spiegel, E.A., Worthing, R.A., 2000. Laminar and Turbulent Dissipation in Shear Flow with Suction. *Stoch. Chaotic Dyn. Lakes* 497–503.
- Guckenheimer, J., 2000. Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields.
- Kolmogorov, A.N., 1961. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure 82–85.
- Kolmogorov, A.N., 1890. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence, in: *Mathematical and Physical Sciences. The Royal Society London-A*, pp. 15–17.
- Kraichnan, R.H., 1971. Inertial-range transfer in two- and three-dimensional turbulence. *J. Fluid Mech.* 47, 525–535.
- Rigelo, J.C., Zingano, P., Zingano, P.R., 2016. Leray ' s problem for the Navier-Stokes equations revisited. doi:10.1016/j.crma.2016.02.008
- Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972. *A First Course in Turbulence*. The MIT Press, Cambridge, UK.
- Tikhomirov, V.M., Piskunov, N.S., Petrovskii, I.G., 1991. A Study of the Diffusion Equation with Increase in the Amount of Substance, and its Application to a Biological Problem, in: *Selected Works of A. N. Kolmogorov*. pp. 1–26. doi:10.1007/978-94-011-3030-1\_38
- Tsinober, A., Shtilman, L., Vaisburd, H., 1997. A study of properties of vortex stretching and enstrophy generation in numerical and laboratory turbulence. *Fluid Dyn. Res.* 21, 477–494.

- von Neumann, J., Richtmyer, R.D., 1950. A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks. *J. Appl. Phys.* 232, 1–7. doi:10.1063/1.1699639
- Xiu, Q., 1988. A Formula for Eddy Viscosity in the Presence of Moist Symmetric Instability. *J. Atmos. Sci.* 45, 21–24.





## KONSEP KASKADE DAN INTERMITENSI

---

*“Big whorls have little whorls that feed on their velocity, and little whorls have smaller whorls and so on to viscosity - in the molecular sense”*

**L.F. Richardson**

### A. KONSEP KASKADE

Istilah *kaskade* atau bertingkat atau juga bertahap (*cascade*) pada aliran turbulen diperkenalkan oleh Onsager (Onsager, 1945 dan 1949), sedangkan gambaran kaskade sebagai gerak konvensional yang terhalang oleh pembentukan berupa pusaran-pusaran kecil karena ketidakstabilan dinamis diberikan lebih dahulu oleh Richardson (Richardson, 1922). Pengamatan dengan melihat struktur awan sebagai proses kondensasi uap air merupakan gambaran yang dapat mewakili perwujudan kaskade tersebut. Adalah struktur awan kumulus pada antarmuka aliran laminar dan turbulen dalam jumlah besar yang tidak mencerminkan struktur medan kecepatan yang mendasarinya. Gerak dan arus awan kumulus besar naik ke atas menimbulkan banyak turbulensi di dalam, di bawah, dan di sekitar awan, dan struktur awan yang sering terjadi menjadi sangat rumit. Kesan yang sama atas perubahan struktur yang drastis dapat diperoleh dan menjadi jelas saat membuat gambar awan kumulus bergerak naik dari titik awalnya, di mana detail awan akan berubah sebelum sketsa diselesaikan dengan lengkap. Bila diperhatikan struktur awan kumulus, maka akan tampak pusaran besar memiliki pusaran kecil

# REFERENSI

- Arneodo, A., et.al. 1999. "Revealing a log-normal cascading process in turbulent velocity statistics with wavelet analysis". *Phil. Trans. Proc. Roy. Soc. London, A* 357, 2415–38
- Batchelor and Townsend, 1949. "Decay of Turbulence in the Final Period". *Proc. R. Soc. Lond. A* 1948 194, 527-543. doi: 10.1098/rspa.1948.0095
- Borue, V. and Orszag, S.A. 1998. "Local energy flux and subgrid scale statistics in three-dimensional turbulence". *J. Fluid Mech.*, 336, 1-31
- Corrsin, S., 1964. "Further Generalizations of Onsager's Cascade Model for Turbulent Spectra". *The Physics of Fluids, Vol. 7.* pp. 1156-1159
- Douglas, C.K.M. 1920. *Clouds As Seen As From an Aeroplane.* *Q.J. of Royal Meteorological Society, Vol. XLVI, No.195.*
- Frederiksen, R.D., et.al. 1998. "Experimental assessment of fractal scale similarity in turbulent flows". Part 4: Effects of Reynolds and Schmidt numbers, *J. Fluid Mech.*, 377,, 169–187
- Frick, P. and Zimin, V. "Hierarchical models of turbulence", in *Wavelets, Fractals, and Fourier Transforms.* 265–283. Oxford: Clarendon Press, 1993.
- Frisch, U. 1995. *Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov.* London: Cambridge University Press.
- Frisch, U. and Orszag, S.A. 1990. Turbulence: challenges for theory and experiment, *Phys. Today*, 9, 24–32
- Germano. 1991. "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model". *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 3 (7), 1760–1765.
- Holmes, P.J., Berkooz, G. and Lumley, J.L. 1996. *Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry,* London: Cambridge University Press.
- Jimenez, Javier. 1993. "The structure of intense vorticity in isotropic turbulence". *Journal of Fluid Mechanics.* Vol. 255. 65–90.
- Kahaleras, H. 1998. "Intermittency and Reynolds number". *Phys. Fluids.* Vol. 10. 910–921

- Kraichnan, Robert H. 1974. On kolmogorov's inertial-range theories. *Journal of Fluid Mechanics* 62 (2), 305–330.
- Mahrt, L. and Howell, J.F. 1994. "The influence of coherent structures and microfronts on scaling laws using global and local transforms". *J. Fluid Mech.* Vol. 260. 247–270.
- Meneveau, C. 1991. "Analysis of turbulence in the orthonormal wavelet representation". *J. Fluid Mech.* Vol. 232. 469–520.
- Monin, AS & Yaglom, Ao M. 1975. *Statistical fluid mechanics*, vol. 2.
- Onsager, L. 1953a. in *Proceedings of the International Conference on Theoretical Physics*, pp. 669–675. (Kyoto and Tokyo: Science Council of Japan, Sept. 1953).
- Onsager, L., and Kaufman, B. 1947. in *Rep. Intern. Conf. on Fund. Particles and Low Temp.* Cambridge. July 1946. The Physical Society London. Vol. 2. 137–144.
- Parisi, G., and Frisch, U. "Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics". in *Proceedings of the International School of Physics "E. Fermi"*, Varenna, Italy. Edited by M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, 84–87. (Amsterdam: North-Holland, 1985).
- Renner, C. 2001. "Experimental indications for Markov properties of small-scale turbulence". *J. Fluid Mech.* Vol. 433. 383–409.
- Richardson, L. F. 1922. "The supply of energy from and to atmospheric eddies". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 97 (686), 354–373.
- Sirovich, L. 1997. "Dynamics of coherent structures in wall bounded turbulence". *Comp. Mech. Publ.* 333–364.
- Sreenivasan, Katepalli R., Antonia, R.A. 1997. "The phenomenology of small-scale turbulence". *Annual review of fluid mechanics* 29. Vol. 1. 435–472.
- Taylor G. I. 1938. "The spectrum of turbulence". *Proc. Roy. Soc. London*, A164. 476–490.
- Townsend, A. A. 1956. *The Structure of Turbulent Shear Flow*, London: Cambridge University Press.
- Vassilicos, J.C. Silverman B.W. 2000. *Wavelets – The Key to Intermittent Information?* Oxford: Oxford University Press.

- Villermaux et.al. 2001. "Short circuits in the Corrsin–Obulhov cascade".  
Phys. Fluids, 13, 284–289
- von Neumann, J. 1949. "Recent Theories of Turbulence". in Collected  
Works of J. von Neumann (1949–1963), Vol. 6, edited by A. H. Taub.  
437–472. (New York: Pergamon Press, 1963).

## PROFIL PENULIS

### Prof. Dr. Ismail, S.T., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 12 Mei 1980 di kota Pagar Alam Sumatera Selatan, penulis mempunyai pendidikan dasar di SD Muhammadiyah 3 Pagar Alam, SMP Negeri 1 Pagar Alam dan SMA Muhammadiyah 1 Pagar Alam. Pada tahun 2002, penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya. Pada tahun 2008, penulis menyelesaikan pendidikan S2 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Pancasila. Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan pendidikan S3 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada. Karier pertama kali bekerja di dunia industri pada tahun 2003 s/d 2010 dengan posisi terakhir sebagai Asisten *Manager Planning Production Control*. Karier sebagai dosen dimulai pada tahun 2009 s/d 2012 penulis menjadi dosen luar biasa di STT Bina Tunggal, kemudian tahun 2009 s/d 2010 penulis menjadi dosen tetap *homebase* di Universitas Mercu Buana dan pada tahun 2010 s/d sekarang menjadi dosen tetap di Universitas Pancasila. Selain melaksanakan Tri Dharma Perguruan Tinggi juga menjalankan tugas tambahan, pada tahun 2016 s/d 2018 sebagai Kepala Laboratorium Optimasi dan Desain Produk dan pada tahun 2017 s/d sekarang Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin di Universitas Pancasila. Pada tahun 2022 ditetapkan sebagai Guru Besar di bidang Teknik Mesin. Fokus penelitian penulis adalah bidang konversi energi dan pengembangan teknologi di bidang energi terbarukan.

### **Johanis John Verius, S.Si., M.T.**



Penulis dilahirkan di Tana Toraja–Sulawesi Selatan pada tanggal 11 Desember 1979. Keseluruhan pendidikan ditempuh di Parepare–Sulawesi Selatan yakni mulai dari tingkat dasar pada SD Negeri 44, Sekolah Menengah Pertama di SMP Swasta Frater, hingga Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1. Merampungkan studi tingkat sarjana di Universitas Padjadjaran Bandung pada tahun 2003 dan studi magister di Universitas Pancasila tahun 2018. Penulis menjadi dosen luar biasa di Universitas Atma Jaya Makassar hingga tahun 2021. Ketertarikan akan persoalan lingkungan hidup yang dipengaruhi oleh efisiensi penggunaan energi dan peranan teknologi mengantar penulis untuk terlibat dalam kajian dan pengembangan energi ramah lingkungan pada daerah-daerah pinggiran di Sulawesi Selatan hingga sekarang.

### **Reza Abdu Rahman, S.Pd., M.T.**



Pendidikan vokasi Teknik Otomotif berhasil diselesaikan pada Tahun 2008, kemudian melanjutkan program Strata-I di Universitas Negeri Jakarta dan lulus pada tahun 2014 untuk program studi pendidikan teknik mesin. Penulis aktif di Pendidikan Vokasi mulai tahun 2013-2019 di SMKN 10 Kota Bekasi dan menjabat sebagai Kepala Program Keahlian Teknik Otomotif. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2020. Mulai tahun 2019, penulis aktif pada bidang STEM dengan fokus pada *Engineering Program for High School*, dan menjadi Guru tamu di *HighScope Indonesia Institute* serta mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Pancasila Sejak Tahun 2021. Fokus penelitian penulis adalah bidang penyimpanan energi dan hibridisasi sistem *renewable energy*, khususnya *solar thermal system*.

# TURBULEN

Buku ini bertujuan untuk memberikan dasar-dasar aliran turbulen dalam bentuk penjelasan sederhana dan menghindari kompleksitas fenomena fisik yang terdapat pada fluida yang mengalir dengan mencoba menggunakan pilihan kata yang mudah dipahami. Secara khusus membuka wawasan mahasiswa teknik dan sains yang berada pada level dasar di mana mata kuliah mekanika fluida menjadikan aliran turbulen sebagai sub topik saja. Tidak hanya itu, kesederhanaan penyajian materi dalam buku ini dapat menjadi jembatan bagi kaum awam untuk mengenali fenomena yang bergejolak sebagai peristiwa alam yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan sehari-hari.

Tulisan mengenai aliran fluida turbulen yang diberikan didukung oleh hasil penelitian yang telah dilakukan oleh para ilmuwan dan telah dimuat dalam jurnal dan buku terkemuka dari berbagai belahan dunia seperti "*Butterfly Effect*" yang dikaitkan dengan fenomena iklim dan cuaca, serta isu dan perdebatan mengenai pendekatan mana yang harus dilakukan untuk dapat membuka celah dalam memahami fenomena turbulen dengan lebih baik. Serta pengaruh dan kontribusi Kolmogorov di bidang ini.

Upaya menyajikan konsep turbulensi secara sederhana merupakan cara lain dalam buku ini untuk meningkatkan minat penelitian aliran turbulen untuk mendapatkan gambaran tentang turbulensi, memahami karakteristik aliran turbulen dan juga melihat lebih jauh bagaimana parameter aliran fluida mempengaruhi aliran turbulen. Aliran (nomor Kolmogorov, kecepatan cairan, partikel pasif, dan banyak lagi).