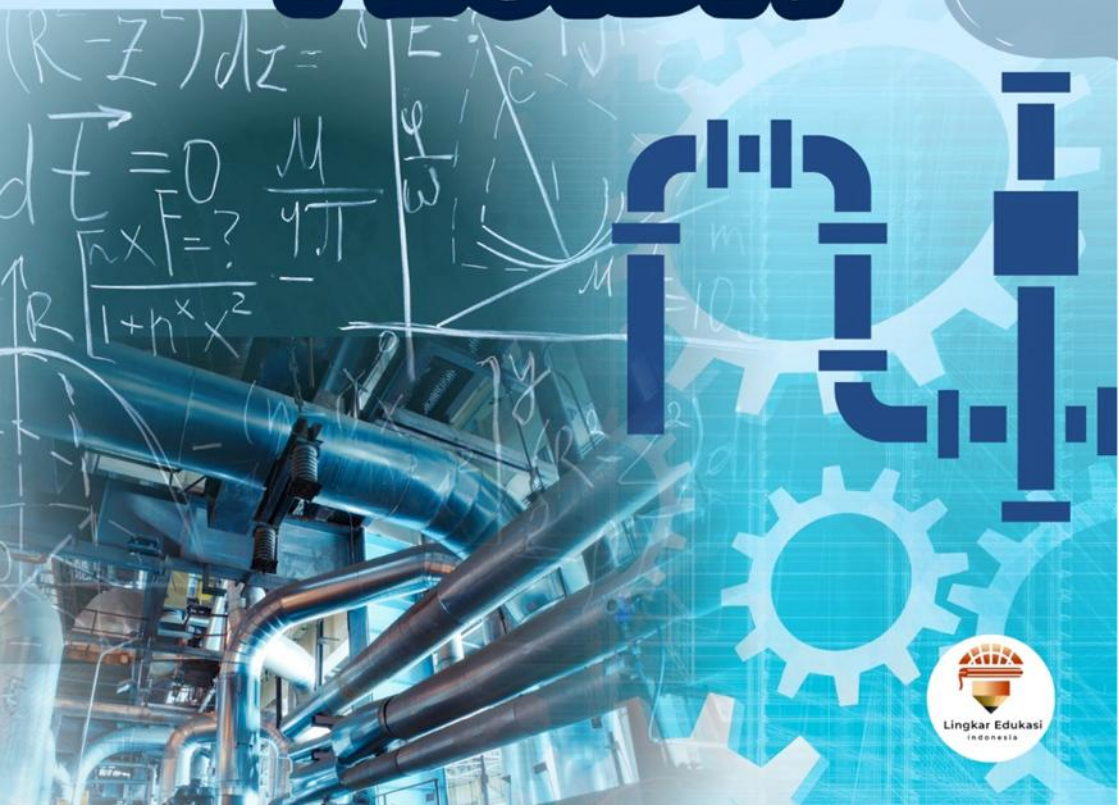


Dr. Diharyo, S.T., M.T. | Ir. Rida Respati, S.T., M.T. | Ir. Norseta Ajie Saputra, S.T., M.T. | Ir. Rudy Yoga Lesmana, S.T., M.Si. |
Ir. Reza Zulfikar Akbar, S.T., M.Sc. | Ir. Achmad Imam S., M.Ling. | Dr. Ir. Sari Marlina, S.Hut., M.Si. | Dr. Ise Afifah, S.Hut., M.P. |
Ir. Amelia Faradila, S.T., M.T. | Ir. Noviyanthi Handayani, S.T., M.T., IPM. | Gusti Iqbal Tawaqal, S.T., M.T. |
Ir. Rizkan Maulidi Ansyari, S.T., M.T., IPM | Ir. Nirwana Puspasari, S.T., M.T. |

MEKANIKA FLUIDA



MEKANIKA FLUIDA

Penulis:

Dr. Diharyo, S.T., M.T.

Ir. Rida Respati, S.T., M.T.

Ir. Norseta Ajie Saputra, S.T., M.T.

Ir. Rudy Yoga Lesmana, S.T., M.Si.

Ir. Reza Zulfikar Akbar, S.T., M.Sc.

Ir. Achmad Imam S., M.Ling.

Dr. Ir. Sari Marlina, S.Hut., M.Si.

Dr. Ise Afifah, S.Hut., M.P.

Ir. Amelia Faradila, S.T., M.T.

Ir. Noviyanthi Handayani, S.T., M.T., IPM.

Gusti Iqbal Tawaqal, S.T., M.T.

Ir. Rizkan Maulidi Ansyari, S.T., M.T., IPM

Ir. Nirwana Puspasari, S.T., M.T.



Lingkar Edukasi
Indonesia

LINGKAR EDUKASI INDONESIA

MEKANIKA FLUIDA

Penulis:

Dr. Diharyo, S.T., M.T. | Ir. Rida Respati, S.T., M.T. | Ir. Norseta Ajie Saputra, S.T., M.T. | Ir. Rudy Yoga Lesmana, S.T., M.Si. | Ir. Reza Zulfikar Akbar, S.T., M.Sc. | Ir. Achmad Imam S., M.Ling. | Dr. Ir. Sari Marlina, S.Hut., M.Si. | Dr. Ise Afitah, S.Hut., M.P. | Ir. Amelia Faradila, S.T., M.T. | Ir. Noviyanthi Handayani, S.T., M.T., IPM. | Gusti Iqbal Tawaqal, S.T., M.T. | Ir. Rizkan Maulidi Ansyari, S.T., M.T., IPM. | Ir. Nirwana Puspasari, S.T., M.T.

Editor: Risma, S.AP., M.M.

Penyunting: Putri Srimulia Ningsi

Desain Sampul dan Tata Letak: Diana Fitri, S.Ds., M.Sn.

Diterbitkan oleh:

Lingkar Edukasi Indonesia

Anggota IKAPI No. 058/SBA/2024

Kolam Janiah, Nagari Kudu Ganting

Kec. V Koto Timur, Kabupaten Padang Pariaman

Email: lingkaredukasiindonesia.id@gmail.com

Website: www.lingkaredukasiindonesia.com

ISBN: 978-634-7420-49-7

Cetakan pertama, Oktober 2025

© Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang keras memperbanyak, memfotokopi, Sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku *Mekanika Fluida* ini dapat terselesaikan dengan baik. Kehadiran buku ini diharapkan mampu memberikan bekal pengetahuan yang terstruktur mengenai konsep-konsep dasar hingga aplikasi praktis yang berkaitan dengan perilaku fluida dalam berbagai kondisi. Penyusunan materi disajikan secara sistematis agar pembaca dapat mengikuti alur pemahaman dari hal yang paling mendasar hingga ke tingkat analisis yang lebih kompleks.

Mekanika fluida merupakan salah satu bidang ilmu yang memiliki peran penting dalam berbagai cabang teknik, khususnya teknik sipil, teknik mesin, dan perencanaan sistem. Melalui kajian mengenai sifat-sifat fluida, prinsip tekanan, gaya apung, hingga persamaan fundamental seperti kontinuitas, Bernoulli, dan Navier–Stokes, pembaca akan memperoleh pemahaman yang kokoh mengenai fenomena aliran serta aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari maupun dunia rekayasa. Dengan demikian, buku ini dapat menjadi rujukan bagi siapa saja yang ingin memahami dasar-dasar mekanika fluida secara menyeluruh.

Materi yang tersusun dalam buku ini meliputi beragam aspek, mulai dari sejarah dan ruang lingkup fluida, konsep massa jenis, tegangan permukaan, kapilaritas, variasi tekanan, hingga gaya tekan hidrostatis. Selanjutnya juga dibahas aliran fluida dengan berbagai prinsip hukum, metode pengukuran debit aliran, keserupaan dalam model fluida, serta penerapan persamaan Navier–Stokes. Setiap

topik disajikan secara runtut sehingga membentuk gambaran utuh mengenai keterkaitan antar konsep dalam mekanika fluida.

Akhirnya, besar harapan penulis agar buku ini dapat menjadi sarana yang bermanfaat bagi pembaca dalam memperluas wawasan di bidang mekanika fluida. Semoga isi yang tersaji dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta mendukung penerapan konsep fluida dalam berbagai kebutuhan praktis di masyarakat.

Palangka Raya, Oktober 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
A. Sejarah Mekanika Fluida	1
B. Definisi Fluida.....	4
C. Ruang Lingkup Mekanika Fluida.....	8
D. Dimensi dan Satuan.....	10
BAB 2 MASSA JENIS, VOLUME JENIS DAN BERAT JENIS.....	15
A. Definisi Massa Jenis, Volume Jenis, dan Berat Jenis	15
B. Faktor yang Memengaruhi Massa Jenis.....	20
C. Hubungan Antarparameter (ρ , γ , V)	21
D. Satuan Internasional dan Konversi.....	21
BAB 3 BULK MODULUS ELASTISITAS, TEGANGAN PERMUKAAN, DAN KAPILARITAS.....	23
A. Definisi dan Konsep Bulk Modulus	23
B. Tegangan Permukaan pada Cairan	25
C. Kapilaritas dan Aplikasinya	28
D. Contoh Fenomena Sehari-hari	31

BAB 4 VARIASI TEKANAN FLUIDA STATIS DAN HIDROSTATIKA SERTA PEMBACAAN MANOMETER	32
A. Konsep Tekanan Hidrostatik, Tekanan Absolut, dan Tekanan Atmosfer	32
B. Variasi Tekanan dalam Fluida Statis (Hukum Hidrostatika).....	38
C. Prinsip Pascal dalam Hidrostatika	41
D. Pembacaan Manometer	46
BAB 5 GAYA TEKAN HIDROSTATIS PADA BIDANG DATAR.....	51
A. Pendahuluan	51
B. Distribusi Tekanan pada Dinding Datar.....	53
C. Titik Resultan Tekanan dan Gaya Total.....	54
D. Perhitungan Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Datar.....	57
BAB 6 GAYA TEKAN HIDROSTATIS PADA BIDANG LENGKUNG DAN GAYA APUNG.....	61
A. Konsep Dasar Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Lengkung.....	61
B. Komponen Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Lengkung.....	63
C. Konsep Gaya Apung dan Hukum Archimedes	66
D. Stabilitas Benda Tenggelam dan Benda Terapung	70
BAB 7 GARIS ARUS DALAM ALIRAN FLUIDA DAN MENERAPKAN PERSAMAAN KONTINUITAS.....	74

A.	Konsep Garis Arus dan Jenis Aliran Fluida.....	74
B.	Persamaan Kontinuitas pada Aliran Fluida	81
C.	Aplikasi Garis Arus dan Persamaan Kontinuitas	83
E.	Penerapan Persamaan Kontinuitas dalam Perhitungan Aliran Fluida	86
BAB 8 HUKUM BERNOULLI DAN APLIKASINYA PADA ALIRAN FLUIDA SEPANJANG GARIS ALIRAN..... 88		
A.	Prinsip Dasar Hukum Bernoulli	88
B.	Distribusi Tekanan, Kecepatan, dan Energi dalam Aliran Fluida.....	93
C.	Aplikasi Persamaan Bernoulli dalam Aliran Fluida	94
D.	Perhitungan Menggunakan Persamaan Bernoulli ..	95
BAB 9 KAJIAN SIFAT FLUIDA DAN APLIKASINYA DALAM ALIRAN NYATA TEGANGAN PERMUKAAN VISKOSITAS KAPILARITAS DAN TEKANAN HIDROSTATIS 97		
A.	Tegangan Permukaan dan Perilaku Permukaan Cairan.....	97
B.	Viskositas Kinematis dan Dinamika Aliran.....	99
C.	Kapilaritas dan Interaksi Permukaan-Fluida	101
D.	Integrasi Tekanan Hidrostatik dan Prinsip Bernoulli dalam Aplikasi Nyata	103
BAB 10 PENGUKURAN DEBIT ALIRAN FLUIDA MENGUNAKAN ORIFIS DAN VENTURI METER107		
A.	Konsep Dasar Debit Aliran dan Pengukuran Fluida	107

B.	Pengukuran Debit dengan Orifis.....	109
C.	Pengukuran Debit dengan Venturi Meter.....	112
D.	Perbandingan dan Penerapan Metode Pengukuran Debit Fluida	116
BAB 11 PENGUKURAN DEBIT ALIRAN FLUIDA MENGGUNAKAN BENDUNG (<i>WEIR</i>)		119
A.	Konsep Dasar Bendung dan Aliran Fluida.....	119
B.	Jenis-jenis Bendung dan Karakteristiknya.....	121
C.	Perhitungan Debit Bendung dan Penerapan Koefisien Koreksi	124
E.	Penerapan Bendung dalam Sistem Irigasi dan Monitoring Aliran.....	127
BAB 12 KESERUPAAN DAN PENERAPAN DIMENSIONAL PADA ALIRAN FLUIDA.....		130
A.	Konsep Keserupaan pada Sistem Fluida.....	130
B.	Keserupaan Geometrik dan Rasio Skala	132
C.	Keserupaan Kinematis	135
D.	Penerapan Dimensional dan Faktor Skala pada Aliran Fluida.....	139
BAB 13 ALIRAN STEDI DENGAN PERSAMAAN NAVIER-STOKES.....		142
A.	Konsep Dasar Aliran Stedi dan Asumsi Navier-Stokes	142
B.	Persamaan Navier–Stokes dalam Aliran Stedi	145
C.	Penyederhanaan Persamaan untuk Kondisi Khusus	147

D. Penerapan Persamaan Navier–Stokes pada Aliran Teknik.....	150
DAFTAR PUSTAKA	153
GLOSARIUM.....	156
BIODATA PENULIS.....	159

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 3 Menunjukkan Perbedaan Kemampuan Benda Padat dan Fluida dalam Menahan Tegangan Geser. Benda Padat Dapat Mengalami Defleksi Statis Tanpa Aliran, Sebagaimana Ditunjukkan pada Bagian (a) dan (b), Sementara Fluida Tidak Dapat Menahan Tegangan Geser Sehingga Memerlukan Dinding Penahan, Seperti Terlihat pada Bagian (c) dan (d).....	6
Gambar 2. 1 Variasi Kerapatan terhadap Suhu pada Berbagai Tekanan.....	17
Gambar 3. 1 Bulk Modulus Elastisitas.....	24
Gambar 3. 2 Distribusi Gaya antarmolekul pada Permukaan dan di dalam Air yang Menimbulkan Tegangan Permukaan	26
Gambar 3. 3 Ilustrasi Kapilaritas pada Tabung Berdiameter Kecil: (a) Kondisi Ketika Gaya Adesi Lebih Dominan Dibandingkan Gaya Kohesi; (b) Diagram Gaya Bebas yang Digunakan untuk Menentukan Ketinggian Kapiler; (c) Situasi Ketika Gaya Adesi Lebih Lemah Dibandingkan Gaya Kohesi.....	29
Gambar 4. 1 Contoh Perhitungan Tekanan Absolut	36
Gambar 4. 2 Diagram Benda Bebas untuk Menentukan Hukum Hidrostatika	39
Gambar 4. 3 Demonstrasi Hukum Pascal.....	42

Gambar 4. 4 Ilustrasi Hukum Pascal pada Dongkrak Hidrolik.....	44
Gambar 4. 5 Manometer Tabung U	47
Gambar 4. 6 Manometer Tabung Miring.....	48
Gambar 4. 7 (a) <i>U-tube Differential</i> Manometer dan (b) <i>Inverted U-tube</i> Manometer	49
Gambar 5. 1 Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Datar Miring dengan Proyeksi Horizontal dan Vertikal	59
Gambar 6. 1 Kondisi Benda dalam Fluida Menurut Hukum Archimedes	70
Gambar 6. 2 Prinsip Metasentris dan Stabilitas	71
Gambar 7. 1 Aliran Laminar	76
Gambar 7. 2 Aliran Turbulen	77
Gambar 7. 3 Aliran Transisi	78
Gambar 7. 4 Ilustrasi Saluran dengan Aliran Tunak.....	79
Gambar 7. 5 Ilustrasi Saluran dengan Aliran Tak Tunak....	79
Gambar 7. 6 Skema Aliran Fluida Melalui Penampang Pipa Berbeda Luas dengan Parameter Kecepatan (v) dan Massa Jenis (ρ) pada Penampang A_1 dan A_2	81
Gambar 8. 1 Elemen Fluida dalam Aliran	89
Gambar 10. 1 Orifice Meter	109
Gambar 10. 2 Variasi Tekanan Sepanjang Penampang Aliran pada Orifice Meter Sebagaimana Diukur dengan Tabung Piezometer, Memperlihatkan Penurunan Tekanan dan	

Proses Pemulihan Tekanan Setelah Melewati Orifice	112
Gambar 10. 3 Venturi Meter	113
Gambar 10. 4 Prinsip Kerja Venturi Meter yang Menunjukkan Hubungan antara Tekanan (p_1 , p_2), Kecepatan Aliran (v_1 , v_2), serta Perbedaan Tinggi Kolom Fluida Manometer (Δh) pada Bagian Penyempitan Pipa.....	114
Gambar 12. 1 Percobaan Osborn Reynold.....	137

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 2 Dimensi-dimensi Pokok dalam Sistem SI.....	11
Tabel 1. 3 Dimensi-dimensi Turunan dalam Mekanika Fluida (Sistem SI)	12
Tabel 2. 1 Besaran Fluida, Simbol dan Satuannya.....	22

BAB 1

PENDAHULUAN

A. Sejarah Mekanika Fluida

Mekanika fluida merupakan gabungan dari dua bidang yaitu mekanika dan fluida. Mekanika sendiri mempelajari gerak dan gaya, sedangkan fluida adalah zat yang, jika dikenai gaya, dapat berubah bentuk secara terus-menerus karena tidak mampu menahan gaya tersebut sekecil apa pun. Sifat inilah yang membuat fluida mudah mengalir; fluida mencakup cairan maupun gas. Oleh karena itu, mekanika fluida dipahami sebagai cabang ilmu yang menelaah gerak dan perilaku zat-zat yang bersifat cair atau gas. Walaupun mekanika fluida menitikberatkan pada gerakan fluida, dalam kajian ilmiahnya juga dipelajari kondisi fluida yang diam. Dalam kerangka yang lebih luas, mekanika fluida sering diletakkan sebagai bagian dari mekanika kontinum, yaitu disiplin yang mengkaji perilaku zat kontinu (seperti cairan dan gas) baik dalam keadaan bergerak maupun dalam keadaan diam (Kironoto, 2016).

Pada masa peradaban awal, masyarakat kuno telah memiliki pengetahuan praktis yang memadai untuk menyelesaikan persoalan aliran sederhana. Misalnya, penggunaan perahu layar yang sudah dilengkapi dengan dayung maupun sistem irigasi pertanian yang efektif. Pada abad ke-3 sebelum Masehi, Archimedes dan Hero dari Iskandariah memberikan kontribusi penting dengan memperkenalkan hukum jajan genjang dalam

penjumlahan vektor. Archimedes (285–212 SM) merumuskan hukum apung yang kemudian banyak diterapkan pada benda mengapung maupun melayang. Selain itu, ia juga mengembangkan cikal bakal kalkulus diferensial sebagai bagian dari analisis ilmiahnya.

Memasuki era setelah Masehi hingga masa Renaissance, berbagai perbaikan terus dilakukan dalam rancangan sistem aliran seperti pembuatan kapal, saluran air, hingga talang, meskipun tidak terdapat perkembangan analisis yang signifikan. Leonardo da Vinci (1452–1519) kemudian menjadi tokoh penting dengan menjabarkan persamaan kekekalan massa pada aliran tunak satu dimensi. Ia dikenal sebagai eksperimentalis ulung yang meninggalkan catatan terperinci mengenai fenomena fluida seperti gelombang, semburan, loncatan hidraulik, hingga pusaran. Ia juga merancang model dengan hambatan rendah (*streamlined*) dan parasut dengan hambatan tinggi. Selanjutnya, Galileo Galilei (1564–1642) memperkenalkan berbagai hukum mekanika, sedangkan Edme Mariotte (1642–1684) dari Prancis membangun terowongan angin pertama untuk menguji model aerodinamika.

Perkembangan analisis momentum fluida semakin pesat setelah Isaac Newton (1642–1727) memperkenalkan hukum-hukum gerak serta hukum viskositas untuk fluida linear, yang kemudian dikenal sebagai fluida Newton. Pada abad ke-18, sejumlah matematikawan besar seperti Daniel Bernoulli dan Leonhard Euler dari Swiss, Clairaut dan D'Alembert dari Prancis, Joseph-Louis Lagrange (1736–1813), Pierre-Simon Laplace (1749–1827), hingga Gerstner (1756–1832), mengembangkan fondasi hidrodinamika untuk menjelaskan aliran tanpa gesekan. Euler merumuskan persamaan gerak dalam bentuk diferensial dan integral yang kini kita kenal sebagai persamaan

Bernoulli. D'Alembert kemudian menggunakan persamaan tersebut untuk mengajukan paradoks bahwa benda yang terbenam dalam fluida ideal tidak mengalami gaya hambat, sedangkan Gerstner memanfaatkannya untuk menjelaskan gelombang permukaan.

Meskipun teori fluida ideal berkembang pesat, penerapannya di dunia nyata terbatas. Sebagian besar aliran teknik dipengaruhi oleh kekentalan, sehingga teori yang sepenuhnya idealistik mulai ditinggalkan. Para insinyur kemudian mengembangkan hidraulika berbasis eksperimen. Tokoh-tokoh seperti Pitot, Chezy, Borda, Bossut, Coulomb (1736–1806), Weber (1804–1891), Francis (1815–1892), Russel (1808–1882), Hagen (1797–1889), Poiseuille (1799–1869), Darcy (1803–1858), Manning (1816–1897), Bazin (1829–1917), dan Weisbach (1806–1871) memberikan kontribusi penting berupa data eksperimen mengenai berbagai jenis aliran, mulai dari saluran terbuka, hambatan kapal, aliran pipa, hingga gelombang dan turbin.

Menjelang akhir abad ke-19, hidraulika eksperimental dan hidrodinamika teoretis mulai dipadukan. William Froude (1810–1879) bersama putranya Robert (1842–1924) mengembangkan hukum pengujian model, sementara Lord Rayleigh (1842–1919) memperkenalkan metode analisis dimensional. Osborne Reynolds (1842–1912) memberikan kontribusi besar dengan memperkenalkan bilangan Reynolds, yang menjadi parameter penting dalam karakterisasi aliran fluida. Pada periode yang sama, Navier (1785–1836) dan Stokes (1819–1903) memperluas persamaan gerak dengan memasukkan efek kekentalan, sehingga lahirlah persamaan Navier-Stokes, meskipun persamaan ini masih sulit digunakan untuk aliran umum.

Lompatan besar berikutnya datang pada tahun 1904 melalui Ludwig Prandtl (1875–1953) yang memperkenalkan teori lapisan batas. Ia menunjukkan bahwa aliran dengan viskositas rendah, seperti air dan udara, dapat dibagi menjadi lapisan kental di dekat permukaan padat dan lapisan luar yang lebih encer. Teori ini menjadi salah satu instrumen utama dalam analisis aliran modern, diperkuat oleh karya Theodore von Karman (1881–1963) dan Sir Geoffrey I. Taylor (1886–1975).

B. Definisi Fluida

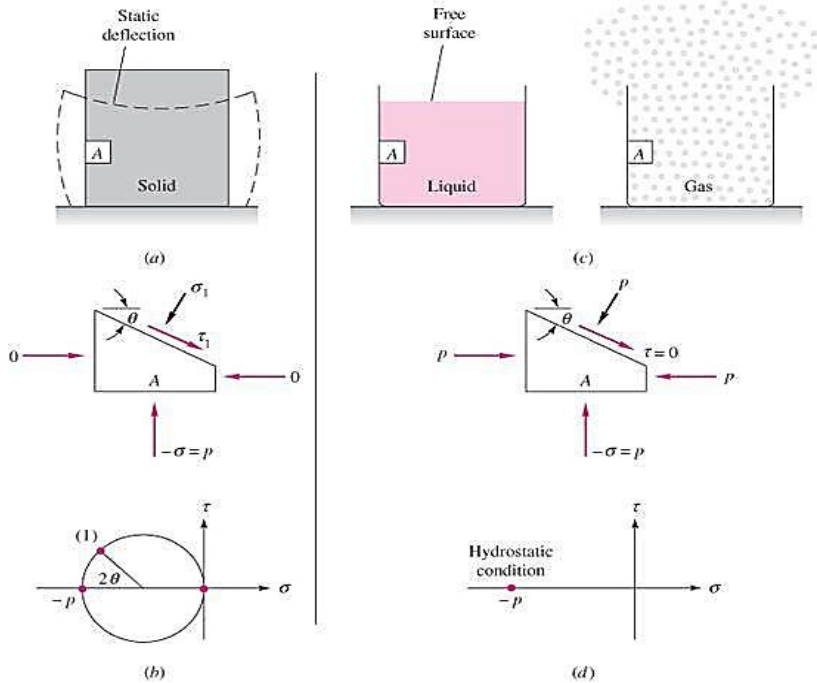
Dalam kajian mekanika fluida, semua materi digolongkan hanya ke dalam dua wujud utama, yakni zat padat dan fluida. Perbedaan mendasar keduanya terletak pada respons terhadap tegangan geser. Zat padat mampu menahan tegangan geser dengan deformasi tetap, sedangkan fluida, meskipun hanya diberi tegangan geser kecil, akan selalu mengalami perubahan bentuk dan bergerak secara berkesinambungan selama gaya tersebut bekerja. Oleh karena itu, fluida yang diam (*hidrostatik*) berarti berada dalam kondisi tanpa tegangan geser.

Fluida dapat dipahami sebagai suatu zat atau substansi yang akan mengalami perubahan bentuk secara terus-menerus ketika dikenai gaya geser, bahkan jika gaya yang bekerja sangat kecil sekalipun. Sifat ini membedakannya dengan zat padat, yang hanya akan berubah bentuk atau terdeformasi apabila gaya geser yang diberikan melampaui batas elastisitas atau kemampuan deformasi yang dimilikinya (Mitsoulis dan Vlachopoulos, 1984).

Gambar dibawah ini menunjukkan sebuah balok padat yang berada di atas bidang kaku dan mengalami

tegangan akibat beratnya sendiri. Balok tersebut mengalami defleksi statis yang digambarkan secara berlebih dengan garis putus-putus untuk menegaskan adanya tahanan terhadap tegangan geser tanpa terjadi aliran. Diagram gaya bebas pada elemen A di sisi balok menunjukkan adanya tegangan geser pada bidang yang dipotong dengan sudut θ melalui titik A. Karena sisi-sisi balok tidak mendapat penopang, tegangan pada sisi kiri dan kanan elemen A bernilai nol, sedangkan tegangan tekan sebesar $\sigma = -p$ bekerja pada bagian atas dan bawah. Dalam keadaan ini, lingkaran Mohr tidak berimpit menjadi satu titik, yang menandakan keberadaan tegangan geser yang tidak nol di dalam balok.

Berbeda dengan benda padat, zat cair dan gas dalam keadaan diam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.3 memerlukan dinding penahan untuk menghilangkan tegangan geser. Dinding tersebut memberikan tegangan tekan sebesar $-p$, sehingga lingkaran Mohr menyusut menjadi satu titik, menandakan tidak adanya tegangan geser di seluruh bagian fluida, atau yang dikenal sebagai kondisi hidrostatis. Zat cair mempertahankan volumenya dan membentuk permukaan bebas di dalam wadah. Apabila dinding wadah dihilangkan, akan timbul tegangan geser dalam zat cair yang menyebabkan cairan mengalir dan menimbulkan cipratan. Jika wadah dimiringkan, tegangan geser kembali muncul, gelombang terbentuk, dan permukaan bebas berusaha menyesuaikan diri ke posisi mendatar, bahkan dapat meluap keluar dari wadah.



Gambar 1. 1 Menunjukkan Perbedaan Kemampuan Benda Padat dan Fluida dalam Menahan Tegangan Geser. Benda Padat Dapat Mengalami Defleksi Statis Tanpa Aliran, Sebagaimana Ditunjukkan pada Bagian (a) dan (b), Sementara Fluida Tidak Dapat Menahan Tegangan Geser Sehingga Memerlukan Dinding Penahan, Seperti Terlihat pada Bagian (c) dan (d).

(Sumber: White, 2011)

Sementara itu, gas bersifat tidak terbatas dan akan mengembang keluar dari wadah, mengisi seluruh ruang yang tersedia. Elemen A dalam gas juga berada dalam kondisi hidrostatik dan memberikan tegangan tekan $-p$ pada dinding wadah.

Dalam pembahasan sebelumnya, perbedaan antara padatan, cairan, dan gas dapat dijelaskan dengan jelas. Sebagian besar persoalan dalam mekanika fluida teknik berhubungan dengan kondisi semacam ini, yaitu fluida umum seperti air, minyak, merkuri, bensin, dan alkohol untuk zat cair, serta udara, helium, hidrogen, dan uap air untuk gas, dalam kisaran suhu dan tekanan normal. Namun demikian, terdapat sejumlah kasus perbatasan yang perlu diperhatikan. Beberapa zat yang tampak “padat” seperti aspal dan timah mampu menahan tegangan geser hanya dalam waktu singkat, tetapi dalam jangka panjang perlahan-lahan mengalami deformasi dan menunjukkan perilaku menyerupai fluida.

Sebaliknya, beberapa zat lain seperti koloid dan campuran lumpur (*slurry*) dapat menahan tegangan geser kecil, namun akan mulai mengalir apabila mengalami tegangan besar, menyerupai perilaku fluida. Bidang kajian yang meneliti fenomena deformasi dan aliran semacam ini disebut reologi (*rheology*) dan dibahas secara mendalam dalam literatur khusus.

Selain itu, zat cair dan gas dapat berkoeksistensi dalam bentuk dua fasa, seperti campuran uap–air atau air dengan gelembung udara. Analisis tentang aliran multifasa ini juga dibahas dalam buku-buku khusus. Pada kondisi tertentu, perbedaan antara cairan dan gas bahkan menjadi samar, khususnya pada suhu dan tekanan di atas titik kritis suatu zat, di mana hanya ada satu fasa yang umumnya menyerupai gas. Jika tekanan terus meningkat jauh di atas titik kritis, zat tersebut menjadi sangat rapat sehingga memperlihatkan sifat yang mirip dengan cairan, dan hukum gas ideal tidak lagi berlaku dengan tepat.

Untuk air, suhu dan tekanan kritis masing-masing adalah $T_c = 647 \text{ K}$ dan $p_c = 219 \text{ atm}$, sehingga sebagian besar permasalahan yang melibatkan air dan uap berada di bawah titik kritis tersebut. Udara, sebagai campuran beberapa gas, tidak memiliki titik kritis yang spesifik, namun komponen utamanya, nitrogen, memiliki $T_c = 126 \text{ K}$ dan $p_c = 34 \text{ atm}$. Dengan demikian, sebagian besar persoalan yang berkaitan dengan udara terjadi pada suhu tinggi dan tekanan rendah, di mana udara secara jelas berperilaku sebagai gas.

C. Ruang Lingkup Mekanika Fluida

Permukaan bumi sekitar 75% ditutupi oleh air dan seluruhnya diselimuti atmosfer berupa gas. Kondisi ini menjadikan ruang lingkup mekanika fluida sangat luas, mencakup hampir setiap aspek kehidupan. Dalam bidang ilmu kebumihan, mekanika fluida berperan penting pada kajian meteorologi, oseanografi fisik, serta hidrologi yang berhubungan dengan fenomena aliran alami. Dalam dunia medis, ilmu ini terkait dengan sistem pernapasan manusia maupun mekanisme peredaran darah.

Di sektor transportasi, cabang aerodinamika dimanfaatkan dalam perancangan pesawat terbang dan roket, sementara hidrodinamika diterapkan pada kapal maupun kapal selam. Dalam bidang energi, sebagian besar listrik dihasilkan melalui aliran air pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) atau aliran uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang memutar turbin. Aplikasi lain dapat ditemukan pada proses pembakaran, perancangan sistem irigasi, mitigasi banjir, distribusi air bersih, pembuangan limbah, serta pembangunan jaringan pipa minyak dan gas.

Memahami mekanika fluida berarti mendalami prinsip dan konsep dasar yang digunakan untuk menganalisis maupun merancang mesin serta perangkat lain yang memanfaatkan fluida sebagai media kerja. Kajian ini membantu menjelaskan berbagai fenomena dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya, bagaimana mesin-mesin fluida seperti pompa, kompresor, turbin air, turbin gas, dan turbin uap dapat beroperasi dengan efisien. Mekanika fluida juga memberikan pemahaman mengenai alasan sebuah pesawat mampu melayang di udara pada kecepatan tertentu, meskipun bobotnya mencapai puluhan ton. Selain itu, melalui ilmu ini kita dapat mengetahui mengapa pesawat jarak jauh seperti Boeing 747 dirancang dengan sayap yang lebih panjang dibandingkan pesawat tempur yang memiliki sayap delta, serta bagaimana Jet Foil dapat meluncur di atas permukaan laut pada kecepatan tertentu seolah-olah sedang terbang, meskipun memiliki berat yang sangat besar.

Secara garis besar, mekanika fluida mengkaji sifat-sifat fluida dalam keadaan diam maupun bergerak. Ruang lingkup ini terbagi ke dalam tiga cabang utama:

- **Statika Fluida**

Mempelajari fluida dalam keadaan diam tanpa adanya tegangan geser yang bekerja pada partikel-partikelnya. Analisis statis digunakan untuk menentukan distribusi tekanan di dalam fluida maupun tekanan yang bekerja pada benda terendam. Contoh penerapan: perencanaan bendungan dan pintu air.

- **Kinematika Fluida**

Mengkaji perilaku fluida bergerak dengan menekankan hubungan antara posisi partikel fluida dengan waktu,

tanpa memperhitungkan gaya penyebabnya. Aspek yang dipelajari meliputi lintasan, kecepatan, dan percepatan partikel fluida.

- **Dinamika Fluida**

Membahas gerakan partikel fluida akibat gaya luar yang bekerja padanya. Contoh aplikasinya meliputi aliran dalam pipa, saluran terbuka, turbin air, turbin gas, turbin uap, pompa hidrolis, kompresor, hingga aerodinamika pesawat udara.

D. Dimensi dan Satuan

Dimensi dapat dipahami sebagai besaran fisik yang menunjukkan sifat atau karakteristik suatu objek, sedangkan satuan merupakan standar yang digunakan untuk mengukur besaran tersebut. William Thomson (1824–1907), yang lebih dikenal sebagai Lord Kelvin (The Kelvin Library, 2011), seorang fisikawan dan matematikawan asal Inggris, dalam kuliahnya di *The Institution of Civil Engineers* pada 3 Mei 1883 menyampaikan sebuah pandangan terkenal: *“When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it.”* Ungkapan ini menekankan pentingnya kemampuan mengukur dan mengekspresikan suatu fenomena dalam bentuk angka untuk benar-benar memahami hakikatnya.

Pandangan tersebut dapat dimaknai bahwa untuk mendeskripsikan ataupun mengukur suatu besaran atau karakteristik fisik fluida diperlukan sistem atau standar tertentu. Sistem ini memungkinkan kita menjelaskan sifat fisik fluida baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Aspek kualitatif digunakan untuk mengenali sifat dasar suatu

fluida, sedangkan aspek kuantitatif diperlukan untuk menyatakan ukuran numeriknya secara jelas.

Sebagai contoh, aspek kualitatif dapat berupa panjang, massa, waktu, dan suhu. Keempat besaran ini disebut sebagai dimensi dasar atau besaran primer. Sementara itu, aspek kuantitatif akan mengekspresikan besaran tersebut dalam nilai numerik, seperti 1 meter untuk panjang, 1 kilogram untuk massa, 1 detik untuk waktu, atau 1 derajat untuk suhu. Dari dimensi-dimensi primer inilah kemudian diturunkan besaran sekunder, misalnya kecepatan, debit, maupun tegangan.

Panjang, misalnya, merupakan dimensi dasar yang dapat digunakan untuk menjelaskan jarak, lebar, kedalaman, tinggi, pergerakan, pergeseran, atau perpindahan. Waktu menunjukkan suatu proses atau keadaan yang sedang, akan, maupun telah berlangsung. Sementara itu, kecepatan adalah besaran turunan yang merepresentasikan pergerakan atau perpindahan per satuan waktu. Dengan demikian, kombinasi antara dimensi dasar dan turunan inilah yang menjadi fondasi dalam analisis berbagai fenomena fluida.

Tabel 1. 1 Dimensi-dimensi Pokok dalam Sistem SI

Dimensi Pokok	Satuan SI
Panjang (L)	meter (m)
Massa (M)	kilogram (kg)
Waktu (T)	detik (s)
Suhu (Θ)	kelvin (K)

Kuat arus listrik (I)	ampere (A)
Jumlah zat (N)	mol (mol)
Intensitas cahaya (J)	candela (cd)

Agar suatu deskripsi kualitatif memiliki arti yang jelas, karakteristik fisik suatu fluida perlu diungkapkan secara kuantitatif. Pendekatan kuantitatif ini memerlukan angka atau standar tertentu agar berbagai besaran fisik dapat dibandingkan secara konsisten. Misalnya, panjang dapat dinyatakan dalam meter atau kaki (*feet*), waktu dalam detik (*second*), dan kecepatan dalam meter per detik atau kaki per detik. Contoh lain termasuk massa yang diukur dalam kilogram atau slug, serta gaya yang diukur dalam newton, pound-force, atau lb (*pound*). Standar seperti ini dikenal sebagai satuan, yaitu tolok ukur untuk mengukur dimensi atau besaran fisik suatu objek, termasuk fluida.

Tabel 1. 2 Dimensi-dimensi Turunan dalam Mekanika Fluida (Sistem SI)

Besaran	Dimensi	Satuan SI
Luas	L^2	m^2
Volume	L^3	m^3
Kecepatan	$L T^{-1}$	m/s
Percepatan	$L T^{-2}$	m/s^2
Tekanan	$M L^{-1} T^{-2}$	$Pa = N/m^2$

Kecepatan sudut	T^{-1}	rad/s
Energi, kalor, usaha	$M L^2 T^{-2}$	$J = N \cdot m$
Daya	$M L^2 T^{-3}$	$W = J/s$
Kerapatan	$M L^{-3}$	kg/m^3
Kekentalan	$M L^{-1} T^{-1}$	$kg/(m \cdot s)$
Kalor spesifik	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$	$m^2/(s^2 \cdot K)$

Saat ini, terdapat dua sistem satuan utama yang masih digunakan secara luas di dunia (Streeter, 1962; Fox & McDonald, 1985; Munson et al., 2002; FPSI, 2010). Pertama adalah Sistem Inggris (*The English System*) dan kedua adalah Sistem Internasional atau SI (*Système International d'Unités*). Sistem Inggris menggunakan dimensi dasar kaki (*foot*), *pound*, dan detik sebagai dasar bagi Sistem Imperial yang dahulu berlaku di negara-negara persemakmuran, serta Sistem USCS (*United States Customary System*) yang masih umum di Amerika Serikat. Sistem Inggris sendiri terbagi menjadi dua, yaitu a) *British Gravitation* (BG) System dan b) *English Engineering* (EE) System, yang berbeda dalam penerapan dimensi dasar pada persamaan hukum kedua Newton.

Sementara itu, Sistem Internasional (SI) menggunakan dimensi dasar meter, kilogram, dan detik. Sistem ini merupakan pengembangan dari Sistem Metrik lama, MKS (Meter-Kilogram-Second), sehingga sering disebut juga sebagai Sistem Metrik modern. Saat ini, SI telah digunakan hampir di seluruh dunia, termasuk di

Indonesia, sedangkan Sistem Inggris masih digunakan secara terbatas.

Sistem Internasional (SI) kini telah diterapkan hampir di seluruh negara di dunia, termasuk Indonesia. Di sisi lain, Sistem Inggris, meskipun masih banyak digunakan di Amerika Serikat, perlahan mulai digantikan oleh Sistem Internasional. Selain Amerika Serikat, beberapa negara lain yang masih memakai Sistem Inggris antara lain Myanmar, Liberia, dan sejumlah bekas koloni Inggris di kawasan Karibia. Sejak tahun 2008, Amerika Serikat secara resmi mengadopsi Sistem Internasional sebagai satuan resmi, meskipun Sistem Inggris (USCS) tetap digunakan dalam beberapa konteks. Di Inggris sendiri, penggunaan Sistem Inggris mulai tersingkir oleh SI, seiring dengan keikutsertaan Inggris dalam Uni Eropa, meskipun sebagian masyarakat tetap mempertahankan tradisi lama. Sistem Internasional juga telah meluas penggunaannya di negara-negara Anglo-Saxon lain, seperti Australia, Selandia Baru, dan Kanada.

Dibandingkan dengan Sistem Inggris, SI memiliki sejumlah keunggulan. Salah satunya adalah konsistensi faktor konversi, karena satuan besar dan kecil selalu berkelipatan 10, sehingga memudahkan penghitungan dan konversi antar satuan. Sistem Inggris, sebaliknya, memiliki konversi yang lebih kompleks dan tidak seragam, misalnya 1 mile = 1760 yard, 1 pound = 16 ons, dan 1 gallon = 8 pint. Selain itu, terdapat perbedaan antara Sistem Inggris yang diterapkan di Amerika Serikat dan di Inggris. Contohnya, 1 US gallon berbeda dengan 1 UK gallon; 1 short ton di Amerika Serikat setara 907 kilogram, sedangkan 1 long ton di Inggris sekitar 1016 kilogram. Dalam Sistem Metrik juga dikenal satuan ton, yang ditetapkan sebesar 1000 kilogram.

BAB 2

MASSA JENIS, VOLUME JENIS DAN BERAT JENIS

A. Definisi Massa Jenis, Volume Jenis, dan Berat Jenis

Dalam mekanika fluida, pemahaman tentang massa jenis, volume jenis, dan berat jenis adalah fundamental untuk menganalisis perilaku fluida baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Ketiga besaran ini saling terkait dan menjadi dasar dalam perhitungan tekanan, gaya, dan energi pada fluida.

1. Massa Jenis/kerapatan (ρ)

Massa jenis atau densitas merupakan salah satu sifat dasar suatu bahan yang menunjukkan hubungan antara massa dengan volumenya. Besaran ini bersifat karakteristik, artinya nilai kerapatan tidak dipengaruhi oleh besar-kecilnya ukuran benda. Dengan kata lain, bahan yang sama akan memiliki nilai kerapatan yang identik meskipun ukurannya berbeda (Suhendra, 2019).

a. Massa Jenis Cairan

Secara matematis dituliskan:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

di mana:

- ρ = massa jenis (kg/m^3)
- m = massa zat (kg)
- v = volume zat (m^3)

Massa jenis fluida bervariasi tergantung pada jenis zat, temperatur, dan tekanan. Misalnya, air memiliki massa jenis sekitar 1000 kg/m^3 pada temperatur 4°C , sedangkan udara pada kondisi standar memiliki massa jenis sekitar $1,225 \text{ kg/m}^3$.

b. Massa Jenis Gas

Kerapatan atau massa jenis gas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan keadaan gas ideal, yang menggabungkan prinsip-prinsip hukum Boyle dan hukum Charles:

$$pv = RT$$

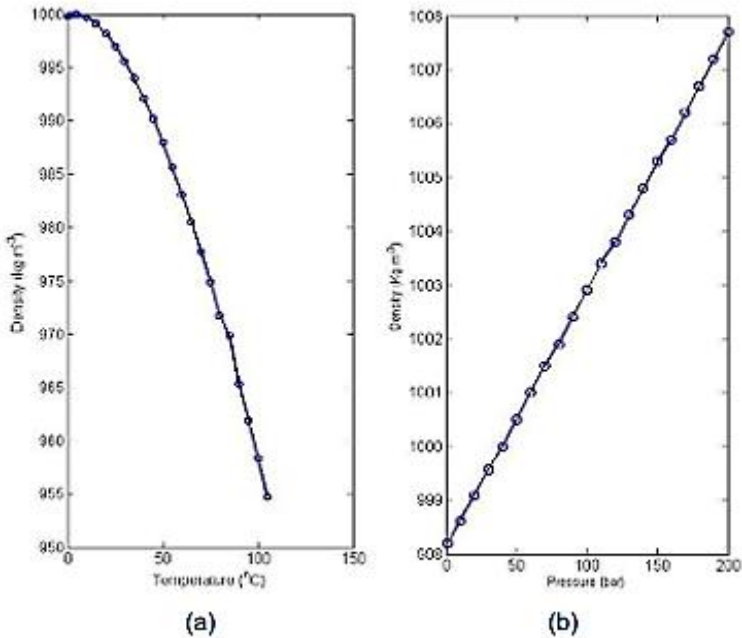
di mana:

- p = tekanan absolut [Pa]
- v = volume spesifik atau volume per satuan massa [m^3/kg]
- T = suhu mutlak [K]
- R = konstanta gas spesifik [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

Dengan hubungan antara massa jenis ρ dan volume spesifik v , yaitu $\rho = 1/v$, persamaan di atas dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kerapatan gas berbanding lurus dengan tekanan dan berbanding terbalik dengan temperatur mutlaknya.



Gambar 2. 1 Variasi Kerapatan terhadap Suhu pada Berbagai Tekanan

(Sumber: Hewakandamby, 2012)

Kerapatan fluida bervariasi secara luas antar jenis fluida. Gambar 2.1(a) memperlihatkan variasi kerapatan air terhadap suhu pada tekanan atmosfer. Dari gambar tersebut tampak bahwa kerapatan air menurun seiring dengan meningkatnya suhu. Perlu dicatat bahwa pada tekanan 1 atm, kerapatan air mencapai nilai maksimum

sebesar 1000 kg/m^3 pada suhu 4°C sebelum kemudian menurun.

Gambar 2.1(b) menunjukkan pengaruh tekanan terhadap kerapatan pada suhu 20°C . Kerapatan meningkat dengan bertambahnya tekanan. Karena sifat kemampatan (*compressibility*) air sangat kecil, maka perubahan kerapatan air relatif kecil untuk rentang tekanan yang luas. Berdasarkan Gambar 2.1(b), kerapatan hanya meningkat sekitar 1% meskipun terjadi kenaikan tekanan hingga 200 kali lipat. Oleh sebab itu, perubahan kerapatan terhadap tekanan sering kali dianggap dapat diabaikan untuk zat cair. Namun, pada gas, variasi tersebut cukup signifikan karena tingkat kemampatan gas jauh lebih tinggi.

Peningkatan kerapatan akibat kenaikan tekanan disebabkan oleh daya mampat fluida. Mengabaikan faktor ini berarti mengasumsikan bahwa fluida bersifat tak termampatkan (*incompressible*), suatu pendekatan yang dalam banyak kasus masih dapat diterima. Dalam perhitungan teknik, asumsi ini sering digunakan karena mampu menghasilkan solusi yang cukup realistis (Hewakandamby, 2012).

2. Volume Jenis (v)

Volume jenis merupakan kebalikan dari massa jenis. Besaran ini menunjukkan volume yang ditempati oleh setiap satu kilogram zat:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Satuan volume jenis dalam sistem SI adalah m^3/kg . Konsep volume jenis sangat berguna dalam analisis fluida, terutama ketika menghubungkan massa dan volume fluida dalam sistem tertutup atau terbuka.

3. Berat Jenis (γ)

Berat jenis (*specific weight*) merupakan besaran yang menunjukkan perbandingan antara berat suatu fluida W dengan volumenya V . Besaran ini menggambarkan seberapa besar gaya berat yang dimiliki fluida dalam setiap satuan volume.

Secara matematis, berat jenis γ dapat dinyatakan sebagai:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Karena berat fluida merupakan hasil kali antara massa dan percepatan gravitasi $W = m \cdot g$, maka persamaan di atas dapat ditulis ulang dengan melibatkan kerapatan ρ sebagai berikut:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

dengan keterangan:

- γ = berat jenis [N/m^3]
- ρ = kerapatan fluida [kg/m^3]
- g = percepatan gravitasi [m/s^2]

Konsep berat jenis sangat penting untuk mengkarakterisasi sifat berat suatu fluida. Besaran ini tidak hanya bergantung pada jenis fluida, tetapi juga pada kondisi lingkungan seperti percepatan gravitasi. Sebagai acuan, pada kondisi standar (tekanan atmosfer 1 atm dan temperatur ruang), diperoleh nilai berat jenis sebagai berikut:

- **Air:**

$$\gamma = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} = 9810 \frac{N}{m^3}$$

- **Udara:**

$$\gamma = 1,225 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} = 12,02 \frac{N}{m^3}$$

Perbandingan ini menunjukkan bahwa air memiliki berat jenis jauh lebih besar dibanding udara, sehingga air jauh lebih “berat” dalam satuan volume yang sama. Hal ini menjelaskan mengapa udara relatif ringan dan mudah bergerak, sementara air cenderung lebih padat dan stabil.

B. Faktor yang Memengaruhi Massa Jenis

Massa jenis fluida tidak selalu konstan. Beberapa faktor yang memengaruhi antara lain:

1. **Temperatur:** Umumnya, kenaikan temperatur menyebabkan pemuaian fluida, sehingga volume meningkat dan massa jenis menurun. Misalnya, air panas memiliki massa jenis lebih rendah dibandingkan air dingin.
2. **Tekanan:** Pada fluida cair, perubahan tekanan kecil tidak banyak memengaruhi massa jenis karena sifat cairan yang relatif tidak mudah dimampatkan. Namun pada gas, tekanan memiliki pengaruh signifikan terhadap massa jenis sesuai hukum gas ideal $\rho = \frac{p}{RT}$.

3. Kandungan zat terlarut: Kehadiran garam atau zat lain dalam air akan meningkatkan massa jenis. Misalnya, air laut lebih padat dibandingkan air tawar.

C. Hubungan Antarparameter (ρ , γ , V)

Massa jenis, volume jenis, dan berat jenis memiliki hubungan matematis yang sederhana namun penting untuk analisis fluida:

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad v = \frac{1}{\rho}, \quad \gamma = \rho \cdot g$$

Dengan memahami hubungan ini, insinyur dan ilmuwan dapat menghitung massa, volume, atau berat fluida secara akurat.

Contoh numerik:

Suatu tangki menampung minyak dengan volume $0,5 \text{ m}^3$ dan massa jenis 850 kg/m^3 . Maka:

- Massa fluida:

$$m = \rho \cdot v = 850 \cdot 0,5 = 425 \text{ kg}$$

- Berat fluida:

$$W = m \cdot g = 425 \cdot 9,81 = 4169,25 \text{ N}$$

- Volume jenis:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{850} \approx 0,001176 \text{ m}^3/\text{kg}$$

D. Satuan Internasional dan Konversi

Penggunaan satuan standar internasional (SI) menjamin konsistensi dalam perhitungan dan publikasi ilmiah. Berikut tabel satuan utama:

Tabel 2. 1 Besaran Fluida, Simbol dan Satuannya

Besaran	Simbol	Satuan SI	Satuan Lain
Massa Jenis	ρ	kg/m^3	g/cm^3
Volume Jenis	v	m^3/kg	cm^3/g
Berat Jenis	γ	N/m^3	kgf/m^3

Konversi penting:

- $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$
- $1 \text{ kgf/m}^3 \approx 9,81 \text{ N/m}^3$

Perhitungan Massa Jenis dalam Kondisi Nyata

1. Air dan Minyak

- Air tawar: $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- Minyak bumi: $\rho \approx 800\text{--}900 \text{ kg/m}^3$
Perbedaan massa jenis ini menentukan gaya apung, distribusi fluida, dan stabilitas sistem cairan.

2. Gas

Menggunakan hukum gas ideal, massa jenis gas pada temperatur dan tekanan tertentu:

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

di mana p = tekanan, M = massa molar gas, R = konstanta gas universal, dan T = temperatur absolut.

BAB 3

BULK MODULUS ELASTISITAS, TEGANGAN PERMUKAAN, DAN KAPILARITAS

A. Definisi dan Konsep Bulk Modulus

Modulus bulk (K) dikenal sebagai elastisitas volumetrik, yaitu ukuran yang menunjukkan sejauh mana suatu material mampu menahan tekanan yang bekerja secara seragam dari segala arah. Nilai K merepresentasikan tingkat ketidakmampatan (*incompressibility*) batuan. Jika nilai K rendah, maka batuan lebih mudah mengalami pemampatan dan perubahan volume. Sebaliknya, nilai K yang tinggi menandakan batuan lebih resisten terhadap gaya tekan. Selain itu, kehadiran fluida dalam pori-pori batuan juga berperan penting dalam memengaruhi besar kecilnya K , sehingga parameter ini dapat digunakan sebagai penunjuk keberadaan fluida, khususnya gas, di dalam formasi batuan. Besaran ini didefinisikan sebagai:

$$K = -V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

dengan:

- K = Bulk modulus (N/m^2 atau Pascal)
- V = Volume awal (m^3)
- ΔP = Perubahan tekanan (Pa)

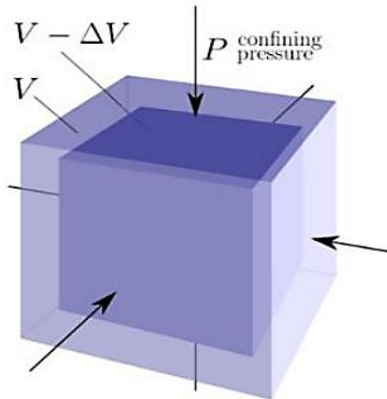
- ΔV = Perubahan volume (m^3)

Bulk modulus pada fluida penting dipahami karena berkaitan dengan fenomena kompresibilitas.

- Fluida cair umumnya hampir tak termampatkan $\rightarrow$ nilai K sangat besar.
- Fluida gas lebih mudah dimampatkan $\rightarrow$ nilai K lebih kecil.

Bulk modulus

$$K = \frac{P}{\Delta V/V}$$



Gambar 3. 1 Bulk Modulus Elastisitas

(Sumber: [agilescientific](#))

Contoh perhitungan sederhana:

Sebuah cairan memiliki volume awal $V = 1 m^3$. Ketika diberi tekanan tambahan $\Delta P = 2 \times 10^6 Pa$, volumenya berkurang sebesar $\Delta V = 0,001 m^3$. Maka:

$$K = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} = -(1) \frac{2 \times 10^6}{0,001} = 2 \times 10^9 Pa$$

Artinya cairan tersebut memiliki bulk modulus sebesar 2 GPa, menandakan sangat sulit dimampatkan.

B. Tegangan Permukaan pada Cairan

Apabila dua fluida dengan perbedaan kecepatan massa saling bersinggungan, maka pada area pertemuan keduanya akan terbentuk bidang lengkung. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik antar molekul pada permukaan fluida. Perbedaan gaya tarik dari masing-masing fluida terhadap bidang lengkung tersebut menimbulkan suatu gaya yang dikenal sebagai tegangan permukaan (*surface tension*). Gejala ini dapat diamati, misalnya pada bentuk permukaan lengkung cairan di dalam sebuah tabung kapiler (Hendratta & Tangkudung, 2019).

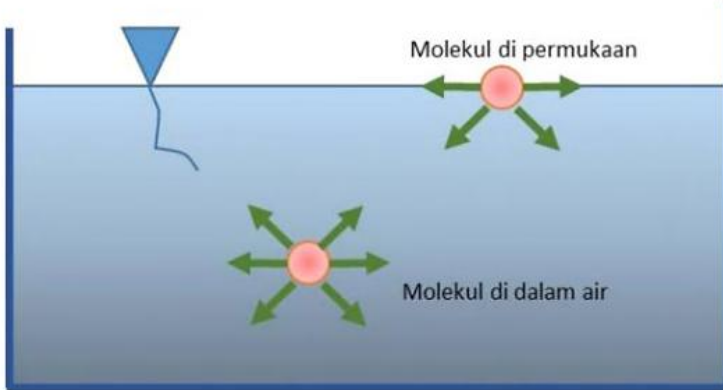
$$\gamma = \frac{F}{L}$$

Dengan:

- σ = Tegangan permukaan (N/m)
- F = Gaya yang bekerja sepanjang permukaan (N)
- L = Panjang garis tempat gaya bekerja (m)

Contoh fenomena:

- Adanya bentuk bulat pada tetesan air.
- Serangga (misalnya *water strider*) mampu berjalan di atas permukaan air.
- Pembentukan gelembung sabun.



Gambar 3. 2 Distribusi Gaya antarmolekul pada Permukaan dan di dalam Air yang Menimbulkan Tegangan Permukaan

(Sumber: Sarjito & Siswanto, 2021)

Faktor-Faktor yang Memengaruhi Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan pada suatu cairan tidak bersifat konstan, melainkan dipengaruhi oleh beberapa kondisi tertentu. Faktor-faktor utama yang memengaruhi besar kecilnya tegangan permukaan antara lain (Yunianta & Wijaya, 2025):

1. Jenis Cairan

Setiap cairan memiliki nilai tegangan permukaan yang khas, bergantung pada susunan dan kekuatan ikatan antar molekulnya. Cairan dengan gaya kohesi yang kuat, seperti air, umumnya memiliki tegangan permukaan lebih tinggi dibandingkan cairan organik ringan seperti alkohol.

2. Suhu

Peningkatan suhu cenderung menurunkan nilai tegangan permukaan. Hal ini disebabkan bertambahnya energi kinetik molekul, sehingga molekul pada permukaan dapat bergerak lebih leluasa dan ikatan antar molekul menjadi lebih lemah. Sebaliknya, pada suhu rendah, pergerakan molekul lebih terbatas sehingga tegangan permukaan meningkat.

3. Zat Terlarut atau Kehadiran Surfaktan

Penambahan zat terlarut tertentu, khususnya surfaktan (seperti sabun dan deterjen), dapat menurunkan tegangan permukaan secara signifikan. Surfaktan cenderung berkumpul di daerah antarmuka antara dua fase (misalnya cairan-udara), lalu mengganggu gaya tarik menarik antar molekul cairan. Akibatnya, gaya kohesi melemah dan tegangan permukaan menjadi lebih kecil.

Untuk memahami besar gaya yang dibutuhkan guna menyeimbangkan tarikan akibat tegangan permukaan, perhitungan dapat dilakukan dengan meninjau gaya-gaya yang bekerja pada belahan sebuah tetesan cairan. Misalkan terdapat tetesan berbentuk bola dengan jari-jari r dan tekanan internal P , maka:

Gaya akibat tekanan dalam tetesan dapat dituliskan sebagai:

$$F_{dalam} = P \cdot \pi r^2 \cdot 2$$

Gaya akibat tegangan permukaan di sepanjang keliling adalah:

$$F_{permukaan} = 2\pi r \cdot \sigma$$

Dengan adanya kondisi setimbang, maka akan diperoleh tegakan permukaan:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{2}$$

dengan:

- σ = tegangan permukaan (N/m)
- P = tekanan dalam tetesan (Pa)
- r = jari-jari tetesan (m)

Contoh perhitungan sederhana:

Jika diperlukan gaya sebesar $F = 0,02 \text{ N}$ untuk menarik kawat sepanjang $L = 0,01 \text{ mL}$ di permukaan cairan, maka:

$$\gamma = \frac{F}{L} = \frac{0,02}{0,01} = 0,2 \text{ N/m}$$

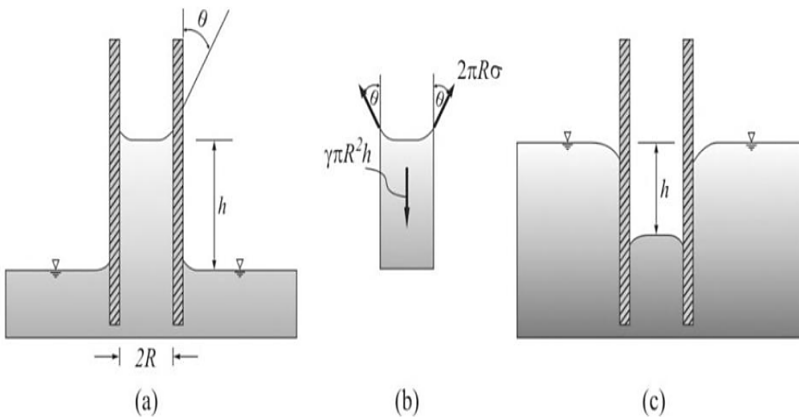
C. Kapilaritas dan Aplikasinya

Kapilaritas adalah fenomena naik atau turunnya permukaan cairan di dalam pipa kapiler akibat interaksi antara tegangan permukaan dan gaya adhesi–kohesi. Fenomena kapilaritas terjadi ketika sebuah tabung kecil (kapiler) dimasukkan ke dalam suatu zat cair. Gejala ini disebabkan oleh adanya interaksi antara gaya kohesi dan gaya adesi.

- Gaya kohesi adalah gaya tarik-menarik antarpartikel dalam zat cair itu sendiri.
- Gaya adesi adalah gaya tarik-menarik antara partikel zat cair dengan dinding tabung.

Perbedaan besar kecilnya gaya kohesi dan adhesi akan menentukan arah permukaan zat cair di dalam tabung kapiler:

- Jika **kohesi** < **adesi**, maka zat cair akan cenderung menempel pada dinding tabung dan menyebabkan permukaan cairan naik di dalam tabung. Contoh fenomena ini dapat diamati pada air yang berada dalam tabung kapiler kaca.
- Jika **kohesi** > **adesi**, maka zat cair akan lebih tertarik pada partikel sesamanya dibandingkan pada dinding tabung. Akibatnya, permukaan zat cair akan turun di dalam tabung. Contoh peristiwa ini terlihat pada air raksa (merkuri) dalam tabung kapiler kaca.



Gambar 3. 3 Ilustrasi Kapilaritas pada Tabung Berdiameter Kecil: (a) Kondisi Ketika Gaya Adesi Lebih Dominan Dibandingkan Gaya Kohesi; (b) Diagram Gaya Bebas yang Digunakan untuk Menentukan Ketinggian Kapiler; (c) Situasi Ketika Gaya Adesi Lebih Lemah Dibandingkan Gaya Kohesi.

Rumus tinggi kenaikan kapiler:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

dengan:

- h = tinggi kapiler (m)
- γ = tegangan permukaan cairan (N/m)
- θ = sudut kontak antara cairan dan dinding pipa
- ρ = massa jenis cairan (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- r = jari-jari pipa kapiler (m)

Aplikasi:

- Naiknya air pada batang tanaman (xilem).
- Penyerapan tinta pada kertas.
- Alat laboratorium (pipet, buret, dll.).

Contoh perhitungan sederhana:

Air dengan tegangan permukaan $\gamma = 0,072 \text{ N/m}$, massa jenis $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, sudut kontak $\theta = 0^\circ$, dan jari-jari pipa $r = 0,001 \text{ m}$. Maka:

$$h = \frac{2 \times 0,072 \times \cos \theta}{1000 \times 9,81 \times 0,001}$$
$$h = \frac{0,144}{9,81} \approx 0,0147 \text{ m} = 1,47 \text{ cm}$$

Jadi, air naik setinggi 1,47 cm pada pipa kapiler.

D. Contoh Fenomena Sehari-hari

Beberapa fenomena nyata yang menunjukkan konsep bulk modulus, tegangan permukaan, dan kapilaritas:

- **Bulk modulus:** tekanan tinggi di laut dalam menyebabkan organisme memiliki adaptasi khusus agar tubuhnya tahan kompresi.
- **Tegangan permukaan:** tetesan air membentuk bola di atas daun talas.
- **Kapilaritas:** sumbu kompor minyak tanah dapat menyerap minyak ke atas untuk terbakar.

BAB 4

VARIASI TEKANAN FLUIDA STATIS DAN HIDROSTATIKA SERTA PEMBACAAN MANOMETER

A. Konsep Tekanan Hidrostatik, Tekanan Absolut, dan Tekanan Atmosfer

1. Tekanan Hidrostatik

Apabila suatu zat cair bersentuhan dengan permukaan benda padat, maka zat cair tersebut akan memberikan tekanan pada setiap elemen permukaan batas antara keduanya. Jika luas elemen permukaan tersebut dinyatakan sebagai a , maka besar gaya tekan pada elemen tersebut adalah hasil kali antara tekanan p dan luas a (yakni $F = p \times a$).

Pada umumnya, tekanan p ini tidak seragam, melainkan bervariasi dari satu titik ke titik lainnya di sepanjang permukaan benda padat yang bersinggungan dengan cairan. Dengan demikian, jumlah total tekanan yang bekerja pada permukaan benda padat dapat dinyatakan sebagai penjumlahan seluruh gaya tekanan pada tiap elemen permukaan, atau secara sederhana $\Sigma F = \Sigma(p \times a)$.

Karena fluida berada dalam keadaan diam, maka gaya yang bekerja pada setiap titik permukaan benda padat selalu tegak lurus terhadap permukaan tersebut. Hal ini terjadi karena tidak adanya gaya geser pada fluida yang

diam. Jumlah seluruh gaya normal ini akan menghasilkan suatu gaya total atau gaya resultan yang bekerja pada suatu titik tertentu yang disebut sebagai pusat tekanan (*center of pressure*).

Apabila permukaan benda padat tersebut datar, maka besar gaya resultan sama dengan jumlah dari seluruh gaya tekan, karena arah gaya-gaya tersebut sejajar. Namun, jika permukaan benda padat berbentuk lengkung, gaya-gaya yang bekerja pada setiap titik permukaan tidak lagi sejajar. Akibatnya, terdapat gaya-gaya yang saling berlawanan arah, sehingga besar gaya resultannya menjadi lebih kecil dibandingkan dengan gaya yang bekerja pada permukaan datar. Konsep ini menjadi dasar dalam analisis gaya tekan hidrostatik pada bidang datar dan lengkung, yang merupakan salah satu aspek penting dalam mekanika fluida (Soedrajat, 1983).

Secara matematis, besar tekanan hidrostatik pada suatu kedalaman dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

dengan keterangan:

- P = tekanan hidrostatik (Pascal, Pa),
- ρ = massa jenis fluida (kilogram per meter kubik, kg/m^3),
- g = percepatan gravitasi (meter per detik kuadrat, m/s^2),
- h = kedalaman dari permukaan fluida (meter, m).

Persamaan tersebut menjelaskan bahwa tekanan hidrostatik berbanding lurus dengan kedalaman. Hal ini dapat diibaratkan saat seseorang menyelam di dalam air. Semakin dalam ia berada di bawah permukaan, semakin

besar pula tekanan yang dirasakan pada telinga dan tubuhnya. Fenomena ini juga menjelaskan mengapa dasar laut memiliki tekanan yang jauh lebih tinggi dibandingkan permukaan laut.

Selain itu, tekanan hidrostatis bersifat isotropik, artinya tekanan bekerja sama besar ke segala arah pada kedalaman tertentu. Hal ini berbeda dengan gaya, yang memiliki arah tertentu. Oleh karena itu, sebuah benda yang dicelupkan ke dalam fluida akan menerima tekanan dari segala arah dengan besar yang sama, tergantung pada kedalaman tempat benda tersebut berada.

2. Tekanan Atmosfer

Tekanan atmosfer adalah tekanan yang ditimbulkan oleh berat kolom udara di atas permukaan bumi. Udara, meskipun tampak ringan, memiliki massa dan memberikan tekanan pada setiap benda yang ada di bawahnya. Tekanan ini bervariasi tergantung pada ketinggian suatu tempat dari permukaan laut.

Pada permukaan laut, tekanan atmosfer standar bernilai sekitar:

$$P_{atm} = 101,325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$$

Nilai tekanan atmosfer akan menurun seiring meningkatnya ketinggian, karena jumlah partikel udara di atas permukaan tersebut semakin sedikit. Misalnya, di daerah pegunungan, tekanan udara lebih rendah dibandingkan di dataran rendah.

Tekanan atmosfer memainkan peranan penting dalam berbagai fenomena fisika dan teknik, seperti pembacaan barometer, manometer, serta dalam analisis sistem fluida tertutup dan terbuka.

3. Tekanan Absolut

Tekanan absolut adalah jumlah dari tekanan atmosfer dan tekanan pengukur (*gauge pressure*) pada suatu titik di dalam fluida. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge}$$

dengan keterangan:

- P_{abs} = tekanan absolut (Pa)
- P_{atm} = tekanan atmosfer (Pa)
- P_{gauge} = tekanan terukur dari sistem (Pa)

Konsep tekanan absolut penting dalam perhitungan sistem fluida tertutup, seperti tangki bertekanan atau pipa hidrolik, karena tekanan yang bekerja di dalam sistem selalu dibandingkan terhadap ruang hampa (vakum), bukan terhadap atmosfer.

Sebagai ilustrasi, jika tekanan udara di dalam sebuah tangki adalah 200 kPa (tekanan terukur), maka tekanan absolutnya adalah:

$$P_{abs} = 101,325 + 200,000 = 301,325 \text{ Pa}$$

Sementara itu, bila tekanan di bawah tekanan atmosfer (misalnya pada sistem vakum parsial), maka tekanan absolut menjadi lebih kecil daripada tekanan atmosfer.

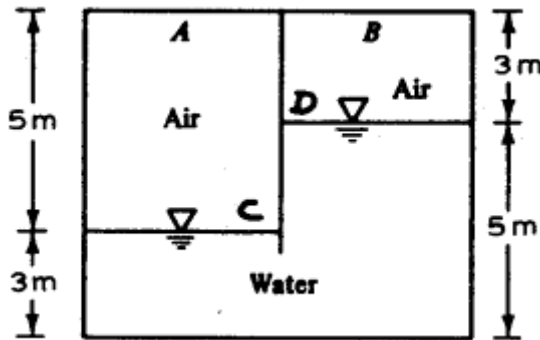
4. Hubungan Antara Ketiga Jenis Tekanan

Hubungan antara tekanan hidrostatik, tekanan atmosfer, dan tekanan absolut dapat dijelaskan melalui prinsip dasar berikut:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{hidro}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa tekanan total (absolut) pada suatu titik dalam fluida merupakan hasil penjumlahan dari tekanan atmosfer dan tekanan akibat kolom fluida di atas titik tersebut. Pemahaman hubungan ini sangat penting dalam menganalisis sistem fluida baik dalam keadaan diam maupun bergerak, serta dalam pembacaan alat ukur seperti manometer, barometer, dan alat ukur tekanan lainnya.

Contoh Perhitungan:



Gambar 4. 1 Contoh Perhitungan Tekanan Absolut

(Sumber: Evett & Liu, 1989)

Sebuah tangki tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 berada pada suhu 20 °C. Diketahui bahwa tekanan pada titik A adalah 98 kPa absolut. Tentukan berapa tekanan absolut pada titik B, serta hitung persentase kesalahan apabila berat jenis udara diabaikan.

Persamaan Dasar

$$P_A + \gamma_{air} h_{AC} - \gamma_{air} h_{DB} = P_B$$

Substitusi Nilai ke Persamaan

$$P_B = 98 + (0,0118)(5) - (9,790)(5 - 3) - (0,0118)(3)$$
$$P_B = 78,444 \text{ kPa}$$

Apabila Berat Jenis Udara Diabaikan

$$P_B = 98 - (9,790)(5 - 3)$$
$$P_B = 78,420 \text{ kPa}$$

Perhitungan Persentase Kesalahan

$$\text{Kesalahan} = \frac{(78,444 - 78,420)}{78,444} = 0,00031 = 0,031\%$$

Pengaruh berat jenis udara terhadap hasil perhitungan tekanan hidrostatik pada sistem ini sangat kecil, yaitu hanya sekitar 0,031%. Dengan demikian, dalam praktik perhitungan teknis, berat jenis udara dapat diabaikan tanpa menyebabkan kesalahan yang signifikan pada hasil akhir.

Aplikasi Tekanan Hidrostatik

Konsep tekanan hidrostatik banyak diterapkan dalam kehidupan sehari-hari dan rekayasa teknik, antara lain:

1. Desain Bendungan dan Waduk

Dinding bendungan harus dirancang lebih tebal di bagian bawah karena tekanan hidrostatik meningkat seiring bertambahnya kedalaman.

2. Perancangan Kapal Selam

Struktur kapal selam harus mampu menahan tekanan hidrostatik yang sangat besar ketika berada di kedalaman laut.

3. Alat Pengukur Tekanan

Prinsip ini juga digunakan pada manometer dan barometer yang memanfaatkan kolom fluida untuk mengukur tekanan.

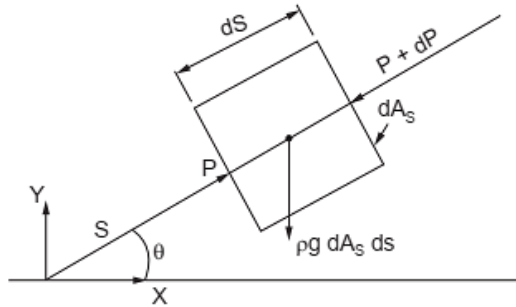
4. Sistem Hidrolik

Pada sistem hidrolik, tekanan fluida yang terdistribusi merata ke segala arah memungkinkan fluida digunakan sebagai media untuk mengangkat beban berat.

Dengan pemahaman yang baik mengenai tekanan hidrostatik, seorang insinyur atau praktisi teknik dapat merancang berbagai sistem yang aman dan efisien, baik untuk penyimpanan fluida, transportasi bawah laut, maupun pengukuran tekanan dalam dunia industri.

B. Variasi Tekanan dalam Fluida Statis (Hukum Hidrostatika)

Dalam analisis fluida statis, penting untuk mengetahui bagaimana tekanan berubah di berbagai titik dalam fluida yang diam. Pemahaman ini diperlukan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan teknik yang melibatkan fluida dalam keadaan tidak bergerak. Gaya akibat tekanan disebut gaya permukaan (*surface force*) karena bekerja pada permukaan batas fluida, sedangkan gaya gravitasi disebut gaya tubuh (*body force*) karena bekerja pada seluruh massa fluida.



Gambar 4. 2 Diagram Benda Bebas untuk Menentukan Hukum Hidrostatika

(Sumber: Kothandaraman & Rudramoorthy, 2007)

Bayangkan sebuah elemen fluida berbentuk silinder kecil dengan luas penampang konstan dA_s sepanjang arah s , yang membentuk sudut θ terhadap bidang horizontal. Pada bagian ujung silinder terdapat gaya tekanan P di penampang s dan $P + dP$ di penampang $s + ds$. Sementara itu, gaya pada bagian lengkung silinder dianggap saling meniadakan karena simetri. Gaya berat fluida bekerja secara vertikal ke bawah dan besarnya dapat dinyatakan sebagai $\gamma \times ds \times dA_s$, di mana γ adalah berat jenis fluida.

Agar elemen fluida berada dalam keadaan keseimbangan, jumlah gaya pada arah s harus sama dengan nol, sehingga dapat ditulis persamaan:

$$P \times dA_s - (P + dP) \times dA_s - \gamma \times dA_s \times ds \times \sin \theta = 0$$

Menyederhanakan persamaan tersebut diperoleh:

$$\frac{dP}{ds} = -\gamma \sin \theta \text{ atau } dP = -\gamma ds \sin \theta$$

Persamaan ini merupakan persamaan dasar dalam statika fluida, yang dikenal sebagai hukum hidrostatika.

Hukum ini menyatakan bahwa perubahan tekanan dalam fluida statis berbanding lurus dengan berat jenis fluida (γ) dan perubahan kedalaman vertikal. Artinya, semakin dalam posisi titik di dalam fluida, semakin besar tekanannya. Jika berat jenis fluida bervariasi terhadap posisi atau tekanan, maka variasi tersebut juga dapat dimasukkan dalam perhitungan dengan menyesuaikan bentuk fungsi γ terhadap lokasi atau tekanan.

$$\gamma = \gamma(P, s)$$

Artinya, berat jenis fluida (γ) dapat bergantung pada tekanan (P) dan posisi (s) di dalam fluida. Namun, untuk fluida cair yang umumnya tidak termampatkan (*incompressible*), nilai γ dianggap konstan.

Jika kita mempertimbangkan sumbu- x , maka $\theta = 0$ dan $\sin \theta = 0$. Dari persamaan (2.4.1) diperoleh:

$$\frac{dP}{dx} = 0$$

Hal ini menunjukkan bahwa dalam fluida yang diam (tanpa percepatan), gradien tekanan sepanjang arah horizontal bernilai nol. Dengan kata lain, tekanan di setiap titik yang berada pada satu bidang horizontal (tegak lurus arah gravitasi) adalah sama.

Untuk arah vertikal (sumbu- y), sudut $\theta = 90^\circ$ sehingga $\sin \theta = 1$. Maka persamaan menjadi:

$$\frac{dP}{dy} = -\gamma = -\rho \frac{g}{g_o}$$

Dengan melakukan penyusunan ulang dan integrasi antara dua titik, yaitu dari y_1 ke y , dan dari P_1 ke P , maka:

$$\int_{P_1}^P dP = - \int_{y_1}^y \gamma dy$$

atau ditulis sebagai:

$$P - P_1 = -\gamma(y - y_1) = -\rho g(y - y_1)/g_o$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa perbedaan tekanan di antara dua titik dalam fluida statis sebanding dengan berat jenis fluida dan selisih kedalaman vertikal antara kedua titik tersebut. Jika berat jenis (γ) bersifat konstan, maka tekanan hanya bergantung pada kedalaman. Dengan demikian, pada kedalaman yang sama, tekanan dalam fluida akan bernilai sama. Prinsip ini berlaku untuk fluida yang terhubung dan memiliki berat jenis seragam atau hanya bergantung pada tekanan.

Konsekuensi langsung dari hukum ini adalah bahwa permukaan bebas (*free surface*) suatu cairan dalam wadah-wadah yang saling terhubung akan selalu berada pada ketinggian yang sama, selama permukaan tersebut terkena tekanan udara luar yang sama. Sebagai tambahan, jika $y = y_1$, maka $P = P_1$ dan $dP = 0$. Hasil ini sering digunakan secara luas dalam penyelesaian permasalahan manometer, di mana hubungan antara tekanan dan kedalaman menjadi dasar perhitungan perbedaan tekanan antar kolom fluida.

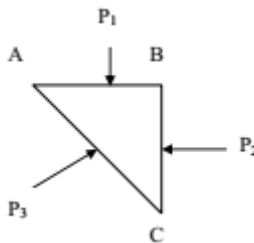
C. Prinsip Pascal dalam Hidrostatika

1. Konsep Dasar Hukum Pascal

Hukum Pascal pertama kali dikemukakan oleh Blaise Pascal (1623–1662), seorang ilmuwan asal Prancis. Ia menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada fluida dalam ruang

tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar. Dengan kata lain, apabila sebuah fluida tak termampatkan (*incompressible*) diberi tambahan tekanan pada suatu titik, maka tekanan tersebut akan menyebar merata ke seluruh bagian fluida dan ke dinding wadah yang menahannya.

Hukum Pascal menyatakan bahwa intensitas tekanan pada suatu titik dalam fluida yang diam adalah sama ke segala arah. Perhatikan sebuah prisma fluida kecil dengan ketebalan satuan pada arah z yang terdapat di dalam massa fluida seperti yang ditunjukkan di bawah ini (Al-Shemmeri, 2012). Karena penampang prisma berbentuk segitiga sama sisi, P_3 membentuk sudut 45° terhadap sumbu x. Jika intensitas tekanan yang tegak lurus terhadap ketiga permukaan adalah P_1 , P_2 , P_3 seperti yang ditunjukkan, maka:



Gambar 4. 3 Demonstrasi Hukum Pascal

(Sumber: Al-Shemmeri, 2012)

$$Gaya = Tekanan \times Luas$$

$$Gaya \text{ pada bidang } AB = P_1 \times (AB \times 1)$$

$$Gaya \text{ pada bidang } BC = P_2 \times (BC \times 1)$$

$$Gaya \text{ pada bidang } AC = P_3 \times (AC \times 1)$$

Penyelesaian komponen gaya secara vertikal:

$$P_1 \times AB = P_3 \times AC \times \cos \theta$$

Namun karena $AC \times \cos \theta = AB$, maka $P_1 = P_3$.

Penyelesaian komponen gaya secara horizontal:

$$P_2 \times BC = P_3 \times AC \times \sin \theta$$

Dan karena $AC \times \sin \theta = BC$, maka $P_2 = P_3$.

Dengan demikian, diperoleh bahwa:

$$P_1 = P_2 = P_3$$

Artinya: Tekanan pada suatu titik dalam fluida memiliki nilai yang sama ke segala arah.

Secara matematis, hukum Pascal dapat dituliskan:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

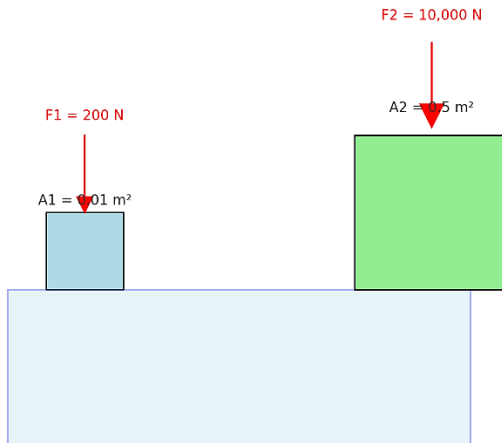
dengan F_1 adalah gaya yang bekerja pada piston kecil dengan luas penampang A_1 , dan F_2 adalah gaya yang dihasilkan pada piston besar dengan luas penampang A_2 . Persamaan ini menunjukkan bahwa meskipun gaya awal relatif kecil, gaya keluaran dapat menjadi jauh lebih besar jika luas penampang yang menerima gaya diperbesar. Prinsip inilah yang menjadi dasar kerja berbagai sistem hidrolik.

2. Mekanisme Kerja Tekanan Hidrolik

Sebuah sistem hidrolik biasanya terdiri atas dua piston yang dihubungkan oleh pipa berisi fluida, misalnya oli atau minyak hidrolik. Ketika gaya kecil diberikan pada piston dengan luas penampang kecil, fluida akan meneruskan tekanan yang sama ke piston dengan luas penampang lebih besar. Akibatnya, piston besar menghasilkan gaya yang

lebih besar walaupun tekanan yang dialami fluida tetap sama.

Hal ini dapat dianalogikan seperti “pengganda gaya” (*force multiplier*). Meskipun energi tidak diciptakan, prinsip kekekalan energi tetap berlaku. Jika gaya yang dihasilkan lebih besar, maka perpindahan piston besar akan lebih kecil dibanding piston kecil.



Gambar 4. 4 Ilustrasi Hukum Pascal pada Dongkrak Hidrolik

3. Aplikasi Hukum Pascal

Prinsip Pascal banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, terutama dalam peralatan yang memerlukan penguatan gaya. Beberapa contoh aplikasinya adalah:

- **Dongkrak Hidrolik (*Hydraulic Jack*):**

Digunakan untuk mengangkat mobil atau beban berat dengan gaya manusia yang relatif kecil.

- **Rem Hidrolik (*Hydraulic Brake*):**

Pada kendaraan bermotor, gaya kecil dari pedal rem ditekan melalui fluida ke piston-piston rem sehingga menghasilkan gaya besar yang menekan kampas rem.

- **Mesin Press Hidrolik:**

Digunakan dalam industri untuk menekan, membentuk, atau mengepress logam dengan gaya yang sangat besar.

Contoh Perhitungan:

Soal:

Sebuah dongkrak hidrolik memiliki dua piston. Luas penampang piston kecil adalah $0,01 \text{ m}^2$, sedangkan luas piston besar adalah $0,5 \text{ m}^2$. Jika gaya sebesar 200 N diberikan pada piston kecil, tentukan gaya yang dihasilkan pada piston besar.

Penyelesaian:

- Berdasarkan hukum Pascal:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

- Substitusi nilai yang diketahui:

$$\frac{200}{0,01} = \frac{F_2}{0,5}$$

- Hitung F_2

$$F_2 = \frac{200 \times 0,5}{0,01} = 10.000 \text{ N}$$

Gaya keluaran pada piston besar adalah 10.000 N , cukup besar untuk mengangkat beban berat seperti mobil.

D. Pembacaan Manometer

1. Pengertian Manometer

Manometer merupakan salah satu alat ukur sederhana namun sangat penting dalam mekanika fluida. Fungsinya adalah untuk mengetahui besarnya tekanan pada suatu sistem fluida tertutup, baik berupa gas maupun cairan. Prinsip kerja manometer didasarkan pada kesetimbangan kolom fluida di dalam tabung yang menerima pengaruh dari tekanan sistem. Tekanan yang ingin diketahui akan menggeser posisi fluida di dalam tabung, dan perbedaan tinggi kolom cairan tersebut kemudian dihubungkan dengan persamaan hidrostatika.

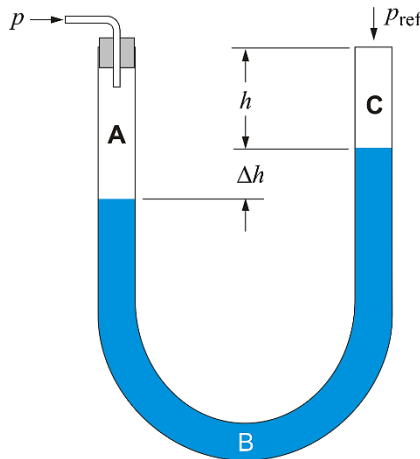
Manometer biasanya digunakan di laboratorium, industri, maupun sistem instalasi teknik seperti pipa air, sistem gas, dan mesin. Alat ini tidak memerlukan sumber energi listrik karena bekerja berdasarkan hukum dasar fluida, sehingga relatif sederhana, ekonomis, dan mudah diaplikasikan.

2. Jenis-jenis Manometer

a. Manometer Tabung U (*U-Tube Manometer*)

- Merupakan bentuk manometer paling sederhana dan paling sering digunakan.
- Terdiri dari tabung berbentuk huruf U yang diisi sebagian dengan cairan manometrik (misalnya air raksa, minyak, atau air).
- Satu ujung tabung terhubung dengan sistem yang tekanannya ingin diukur, sedangkan ujung lainnya biasanya terbuka ke atmosfer.

- Tekanan dihitung berdasarkan perbedaan tinggi permukaan cairan pada kedua kaki tabung.
- Kelebihan: akurat untuk tekanan rendah hingga menengah. Kekurangan: tidak praktis untuk tekanan sangat tinggi karena membutuhkan cairan berat.



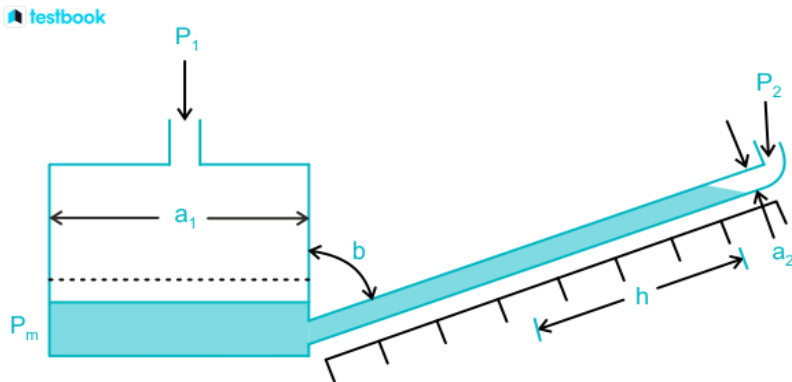
Gambar 4. 5 Manometer Tabung U

(Sumber: U-tube+manometer)

b. Manometer Tabung Miring (*Inclined Manometer*)

- Merupakan modifikasi dari manometer tabung U, di mana salah satu lengan dibuat miring dengan sudut tertentu.
- Fungsi kemiringan adalah untuk memperbesar perubahan tinggi kolom cairan sehingga lebih sensitif terhadap tekanan yang sangat kecil.
- Cocok digunakan dalam pengukuran tekanan diferensial kecil, misalnya untuk aliran udara pada ventilasi atau sistem pendingin.

- Kelebihan: lebih teliti pada tekanan rendah karena skala lebih mudah dibaca. Kekurangan: tidak praktis untuk tekanan besar.



Inclined Tube Manometer

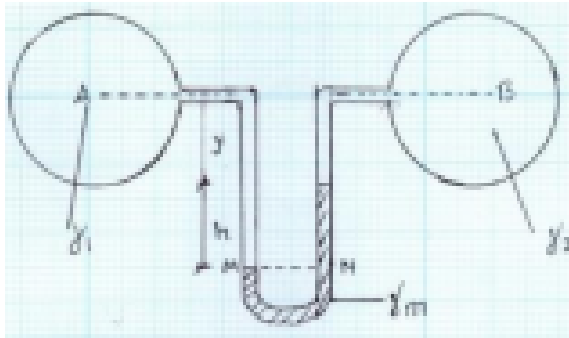
Gambar 4. 6 Manometer Tabung Miring

(Sumber: [inclined-tube-manometer-definition-properties-and-types](#))

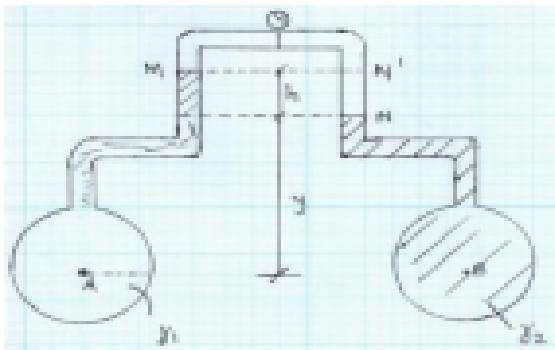
3. Manometer Diferensial

- Digunakan untuk mengukur selisih tekanan antara dua titik dalam sistem fluida.
- Konstruksinya mirip dengan tabung U, namun kedua ujungnya dihubungkan pada dua titik yang berbeda dalam sistem.
- Tekanan di kedua titik menyebabkan cairan manometrik dalam tabung bergerak hingga mencapai kesetimbangan.
- Biasa digunakan untuk mengukur penurunan tekanan akibat gesekan dalam pipa, perbedaan

tekanan sebelum dan sesudah katup, atau pada alat ukur kecepatan aliran (seperti tabung pitot).



(a)



(b)

Gambar 4. 7 (a) *U-tube Differential Manometer* dan (b) *Inverted U-tube Manometer*

(Sumber: Hendratta & Tangkudung, 2019)

4. Prinsip Perhitungan pada Manometer

Dasar perhitungan manometer selalu menggunakan persamaan tekanan hidrostatik, yaitu:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

dengan:

- P = tekanan (Pa)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h = selisih tinggi kolom fluida (m)

Jika manometer digunakan untuk mengukur selisih tekanan, maka:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Keterangan: Δh adalah perbedaan tinggi permukaan fluida dalam manometer.

5. Contoh Penerapan Manometer

- Industri perminyakan dan gas: memantau tekanan fluida dalam pipa.
- Industri kimia: mengukur tekanan reaktor atau tabung penyimpanan gas.
- Sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning): mengecek tekanan udara di saluran ventilasi.
- Laboratorium: mengukur perbedaan tekanan pada percobaan aliran fluida.

BAB 5

GAYA TEKAN HIDROSTATIS PADA BIDANG DATAR

A. Pendahuluan

Fluida yang berada dalam keadaan diam, baik cairan maupun gas, memberikan tekanan pada setiap permukaan yang bersentuhan dengannya. Tekanan ini dikenal sebagai tekanan hidrostatik, suatu konsep dasar dalam mekanika fluida yang menjadi acuan dalam berbagai aplikasi teknik. Fenomena ini muncul pada struktur yang berinteraksi dengan fluida, seperti tangki penampung air, bendungan, kolam, kapal, menara air, atau pipa yang menahan cairan.

Tekanan hidrostatik muncul sebagai akibat langsung dari berat fluida yang berada di atas suatu titik. Semakin dalam titik tersebut berada di bawah permukaan bebas fluida, semakin besar tekanan yang dialami. Hal ini terjadi karena fluida yang berada di atas titik tersebut memberikan gaya tekan yang didistribusikan ke segala arah pada permukaan yang bersentuhan. Hubungan antara kedalaman dan tekanan dapat dinyatakan secara matematis melalui persamaan:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

di mana:

- P = tekanan pada titik tertentu (Pa)
- ρ = kerapatan fluida (kg/m^3)

- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = kedalaman titik dari permukaan bebas fluida (m)

Persamaan ini menunjukkan bahwa tekanan hidrostatik berbanding lurus dengan kerapatan fluida dan kedalaman. Semakin padat fluida atau semakin besar kedalaman titik, semakin besar tekanan yang dihasilkan. Prinsip ini memungkinkan perancang struktur untuk menentukan ketebalan dan kekuatan material agar mampu menahan tekanan sesuai kondisi nyata.

Tekanan hidrostatik bekerja tegak lurus terhadap permukaan bidang yang bersentuhan dengan fluida dan bersifat isotropik, yaitu sama besar ke segala arah pada titik tertentu. Karakteristik ini penting saat merancang tangki, bendungan, atau lambung kapal, karena memastikan bahwa tekanan yang diterima permukaan tidak bergantung pada orientasinya, tetapi hanya pada kedalaman fluida.

Penerapan prinsip tekanan hidrostatik dapat ditemukan pada berbagai bidang teknik. Misalnya, pada dinding bendungan, tekanan meningkat dari permukaan hingga dasar, sehingga bagian bawah harus lebih tebal atau diperkuat dengan material yang lebih kuat. Pada lambung kapal, tekanan hidrostatik menjadi pertimbangan utama dalam menentukan bentuk dan ketahanan struktur agar mampu menahan tekanan air yang meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Dengan memahami distribusi dan mekanisme tekanan hidrostatik, perancang struktur dapat memastikan keamanan dan keandalan bangunan atau peralatan yang bersentuhan dengan fluida. Konsep ini menjadi fondasi penting dalam perhitungan desain struktur teknik dan perencanaan rekayasa yang melibatkan fluida.

B. Distribusi Tekanan pada Dinding Datar

Ketika sebuah bidang datar vertikal direndam dalam fluida, tekanan yang dialami oleh setiap titik pada bidang tersebut tidak seragam. Hal ini disebabkan karena tekanan hidrostatik bergantung pada kedalaman titik tersebut dari permukaan bebas fluida. Semakin dalam suatu titik, semakin besar tekanan yang bekerja. Dengan kata lain, tekanan hidrostatik meningkat secara linear seiring bertambahnya kedalaman.

Secara konseptual, distribusi tekanan pada bidang vertikal berbentuk segitiga, dengan ciri-ciri:

- Tekanan di permukaan bebas fluida: nol, karena tidak ada fluida di atasnya yang memberikan beban.
- Tekanan di dasar bidang: maksimum, karena seluruh kolom fluida di atas titik ini memberikan tekanan.

Bentuk distribusi ini menjadi dasar dalam menentukan titik resultan gaya, yaitu titik di mana seluruh gaya hidrostatik dapat dianggap bekerja seolah-olah terpusat pada satu titik. Penentuan titik resultan ini sangat penting dalam perancangan struktur, terutama untuk menghitung momen lentur, ketebalan dinding, dan penempatan penopang yang menahan tekanan maksimum.

Jika tinggi bidang vertikal adalah h , maka tekanan pada kedalaman y dari permukaan bebas dapat dituliskan:

$$p(y) = \rho g y$$

Dengan demikian, gaya total F yang bekerja pada bidang vertikal dapat dihitung melalui integral tekanan terhadap luas bidang A :

$$F = \int_0^h \rho g y b \, dy = \rho g b \int_0^h y \, dy = \rho g b \frac{h^2}{2}$$

di mana b adalah lebar bidang. Titik pusat tekanan, atau kedalaman di mana gaya total dapat dianggap bekerja, berada pada sepertiga tinggi dari dasar bidang:

$$h_c = \frac{2}{3}h$$

Pentingnya Pemahaman Distribusi Tekanan

Mengetahui bagaimana tekanan hidrostatik **terdistribusi** pada bidang datar sangat penting dalam praktik rekayasa:

- Pada bendungan, dinding harus lebih tebal di bagian bawah untuk menahan tekanan maksimum.
- Pada tangki air atau silo cairan, distribusi ini menentukan lokasi penopang dan ketebalan dinding yang aman.
- Pada struktur kapal, tekanan hidrostatik memengaruhi bentuk lambung agar mampu menahan gaya tekan air.

Distribusi tekanan segitiga ini juga menjadi dasar bagi konsep desain struktur penahan fluida yang efektif dan aman.

C. Titik Resultan Tekanan dan Gaya Total

Ketika suatu bidang datar terendam dalam fluida, distribusi tekanan yang bekerja pada bidang tersebut tidak seragam. Tekanan akan semakin besar seiring bertambahnya kedalaman, sehingga gaya tekan hidrostatik yang bekerja bukan hanya bergantung pada besar tekanan, tetapi juga

pada luas permukaan bidang dan posisi bidang terhadap permukaan fluida.

Untuk menghitung gaya total yang bekerja pada bidang, digunakan pendekatan integral:

$$F = \int p dA$$

dengan:

- F = gaya total (N)
- p = tekanan pada elemen luas dA (Pa)
- dA = elemen luas permukaan (m^2)

Jika bidang berbentuk datar dan terendam pada kedalaman tertentu, perhitungan gaya total dapat disederhanakan menjadi:

$$F = \rho g h_c A$$

Keterangan:

- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)
- h_c = kedalaman titik pusat massa (centroid) bidang dari permukaan fluida (m)
- A = luas bidang (m^2)

Selain mengetahui besar gaya total, sangat penting untuk menentukan letak titik resultan gaya atau titik pusat tekanan. Titik ini merupakan posisi pada bidang di mana gaya total dianggap bekerja.

Untuk bidang datar vertikal yang terendam, distribusi tekanannya berbentuk segitiga: tekanan bernilai nol di permukaan fluida dan maksimum pada bagian bawah

bidang. Karena distribusinya tidak merata, titik pusat tekanan tidak berada di centroid bidang, tetapi sedikit lebih ke bawah.

Rumus letak titik pusat tekanan (h_p) dapat ditentukan dengan:

$$h_p = h_c + \frac{I_g}{h_c A}$$

Keterangan:

- h_p = kedalaman titik pusat tekanan dari permukaan fluida (m)
- h_c = kedalaman centroid bidang (m)
- I_g = momen inersia bidang terhadap sumbu horisontal melalui centroid (m^4)
- A = luas bidang (m^2)

Letak Titik Resultan pada Bidang Vertikal

- Untuk bidang vertikal persegi panjang yang seluruhnya terendam, titik pusat tekanan berada di sepertiga bagian bawah dari dasar bidang.
- Hal ini berarti gaya resultan selalu bekerja lebih dalam dibandingkan titik centroid, karena distribusi tekanan yang semakin besar di kedalaman bawah memberi pengaruh lebih kuat.

Pentingnya Menentukan Titik Resultan

Mengetahui posisi titik resultan sangat penting dalam desain rekayasa sipil dan kelautan, seperti:

- Perancangan dinding bendungan, di mana gaya air dapat menimbulkan momen lentur besar.

- Pembuatan tangki penampung air, agar dinding tangki mampu menahan gaya lateral air.
- Desain pintu air, kapal, dan struktur bawah laut, yang harus aman dari tekanan tidak merata.

Dengan menentukan titik pusat tekanan, insinyur dapat menghitung momen yang terjadi pada struktur dan memastikan keamanan konstruksi terhadap gaya maksimum.

D. Perhitungan Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Datar

1. Gaya Tekan pada Bidang Datar Horizontal

Bidang datar **horizontal** yang terendam dalam fluida mengalami gaya tekan yang **seragam**, karena kedalaman setiap titik pada bidang tersebut sama. Tekanan pada seluruh permukaan bidang horizontal memiliki besar yang sama, sehingga gaya tekan total dapat dihitung dengan sederhana.

Rumus:

$$F = P \times A \text{ atau } F = \rho g h_A$$

Keterangan:

- F = gaya tekan hidrostatik (N)
- P = tekanan hidrostatik pada kedalaman h ($P = \rho g h$)
- A = luas permukaan bidang (m^2)
- ρ = massa jenis cairan (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = kedalaman bidang dari permukaan fluida (m)

Pada bidang horizontal, gaya tekan total sebanding dengan luas bidang dan kedalaman fluida.

2. Gaya Tekan pada Bidang Datar Vertikal

Bidang vertikal mengalami tekanan yang tidak seragam, karena kedalaman titik-titik di permukaan bidang berbeda. Tekanan mulai dari nol di permukaan fluida dan meningkat secara linear hingga maksimum di dasar bidang. Gaya total yang bekerja pada bidang vertikal dapat dihitung dengan menggunakan berat jenis fluida ($\gamma = \rho g$) dan kedalaman titik pusat tekanan (h_c).

Rumus:

$$F = \gamma \cdot A \cdot h_c$$

Keterangan:

- F = gaya tekan hidrostatik total (N)
- γ = berat jenis cairan (ρg)
- A = luas permukaan bidang (m^2)
- h_c = jarak vertikal dari permukaan fluida ke titik pusat tekanan bidang (m)

Untuk bidang vertikal datar, titik pusat tekanan berada pada sepertiga tinggi dari dasar bidang, sehingga gaya total dapat dianggap bekerja pada posisi ini.

Contoh perhitungan sederhana:

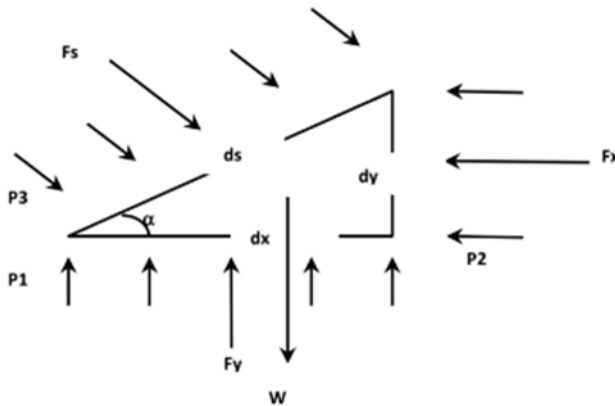
- Bidang vertikal setinggi 3 m dan lebar 2 m terendam dalam air ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$).
- Berat jenis air: $\gamma = 1000 \times 9,81 = 9.810 \text{ N/m}^3$.
- Titik pusat tekanan: $h_c = \frac{3}{3} \times 2 = 1 \text{ m}$ dari dasar (untuk ilustrasi sederhana)

- Luas bidang: $A = 3 \times 2 = 6 \text{ m}^2$
- Gaya total: $F = 9.810 \times 6 \times 1 \approx 58.860 \text{ N}$

Nilai ini menunjukkan besarnya gaya yang harus ditahan dinding bidang vertikal oleh struktur pendukung.

3. Gaya Tekan pada Bidang Datar Miring

Bidang miring terendam dalam fluida juga mengalami gaya tekan hidrostatis, yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan bidang miring. Besarnya gaya total dapat dihitung dengan rumus yang sama seperti pada bidang vertikal, tetapi kedalamannya dihitung secara vertikal dari permukaan fluida ke titik pusat bidang:



Gambar 5. 1 Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Datar Miring dengan Proyeksi Horizontal dan Vertikal

(Sumber: Arsana et al., 2022)

$$F = \gamma \cdot A \cdot h_c$$

Keterangan:

- F = gaya tekan hidrostatik total (N)

- γ = berat jenis cairan (ρg)
- A = luas permukaan bidang (m^2)
- h_c = jarak vertikal dari permukaan fluida ke titik pusat tekanan bidang (m)

Meskipun bidang miring memiliki orientasi berbeda, prinsip perhitungan gaya total tetap sama: gaya total bekerja tegak lurus terhadap bidang, dan kedalaman diukur secara vertikal.

BAB 6

GAYA TEKAN HIDROSTATIS PADA BIDANG LENGKUNG DAN GAYA APUNG

A. Konsep Dasar Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Lengkung

Pada dasarnya, gaya tekan hidrostatik merupakan gaya yang ditimbulkan oleh fluida diam terhadap suatu permukaan yang bersinggungan dengannya. Jika pada bidang datar gaya ini relatif mudah dianalisis karena distribusinya mengikuti kedalaman fluida secara seragam, maka pada bidang lengkung perhitungannya menjadi lebih kompleks. Hal ini disebabkan karena permukaan lengkung tidak menerima gaya secara merata dan lurus, melainkan menyebar sesuai bentuk kelengkungan bidang tersebut.

Bidang lengkung dapat ditemui dalam berbagai aplikasi teknik, misalnya pada permukaan silinder horizontal, pipa melengkung, dinding reservoir berbentuk setengah lingkaran, pintu air berbentuk melengkung, maupun tangki penyimpanan berbentuk tabung. Pada bidang-bidang tersebut, tekanan hidrostatik yang bekerja pada tiap titik berbeda arah sesuai dengan orientasi permukaan lokal. Oleh karena itu, gaya total yang bekerja pada bidang lengkung tidak dapat langsung ditentukan seperti pada bidang datar, melainkan harus diuraikan ke dalam komponen-komponen gaya.

Prinsip utama yang digunakan adalah bahwa gaya hidrostatis pada bidang lengkung dapat dipisahkan menjadi dua komponen utama, yaitu gaya horizontal dan gaya vertikal:

1. Komponen Horizontal (F_x)

Komponen ini diperoleh dengan memproyeksikan bidang lengkung ke arah vertikal. Besarnya gaya horizontal sama dengan gaya yang bekerja pada bidang proyeksi vertikal dari permukaan lengkung tersebut. Dengan demikian, meskipun permukaan aslinya berbentuk lengkung, perhitungan gaya horizontal cukup dihitung berdasarkan luas dan kedalaman proyeksi vertikalnya.

2. Komponen Vertikal (F_y)

Komponen ini berasal dari berat fluida yang berada tepat di atas permukaan lengkung hingga permukaan bebas fluida. Dengan kata lain, gaya vertikal ekuivalen dengan berat kolom fluida yang menekan bidang tersebut. Konsep ini penting karena gaya vertikal sering menjadi faktor penentu dalam mendesain stabilitas struktur, seperti pada pintu air atau dinding bendungan lengkung.

Setelah kedua komponen ini diperoleh, gaya total atau gaya resultan dapat dihitung melalui resultan vektor dari kedua komponen tersebut. Titik tangkap gaya total juga penting untuk diketahui, karena berhubungan langsung dengan stabilitas struktur yang bersentuhan dengan fluida. Pemisahan gaya tekan hidrostatis menjadi komponen horizontal dan vertikal bukan hanya sekadar metode perhitungan, melainkan juga memberikan gambaran fisik yang lebih jelas mengenai bagaimana fluida berinteraksi

dengan bidang lengkung. Misalnya, pada tangki bawah tanah berbentuk silinder horizontal, gaya horizontal dari fluida berfungsi menekan dinding tangki ke samping, sedangkan gaya vertikal bekerja sebagai beban tambahan ke arah bawah.

B. Komponen Gaya Tekan Hidrostatik pada Bidang Lengkung

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, gaya tekan hidrostatik yang bekerja pada permukaan lengkung tidak dapat ditentukan secara langsung karena arah tekanannya selalu tegak lurus terhadap elemen permukaan pada setiap titik. Dengan demikian, untuk memperoleh gaya total yang bekerja, gaya-gaya kecil tersebut perlu diuraikan menjadi komponen-komponen yang lebih sederhana, yaitu komponen horizontal dan komponen vertikal. Pendekatan ini memudahkan dalam perhitungan sekaligus memberikan gambaran fisik yang jelas tentang bagaimana fluida memberikan tekanan pada struktur lengkung.

1. Komponen Gaya Horizontal

Komponen gaya horizontal pada bidang lengkung dihitung dengan memproyeksikan permukaan lengkung ke arah vertikal. Proyeksi ini membentuk suatu bidang datar yang luasnya sama dengan luas bayangan permukaan lengkung pada bidang vertikal. Besar gaya horizontal yang bekerja sama dengan gaya hidrostatik yang diterima oleh bidang proyeksi tersebut. Dengan kata lain, walaupun permukaan yang sebenarnya berbentuk melengkung, gaya horizontal cukup dihitung melalui bidang datarnya.

Rumus umum:

$$F_x = P_c \cdot A_v$$

di mana P_c adalah tekanan pada titik pusat proyeksi vertikal, sedangkan A_v adalah luas proyeksi vertikal bidang lengkung. Konsep ini sangat membantu, misalnya pada pintu air berbentuk setengah lingkaran, di mana gaya horizontalnya sama dengan gaya pada bidang persegi panjang yang merupakan proyeksi vertikal dari pintu tersebut.

2. Komponen Gaya Vertikal

Berbeda dengan gaya horizontal, komponen gaya vertikal tidak dihitung dari proyeksi bidang, melainkan dari berat fluida yang terletak di atas bidang lengkung tersebut hingga permukaan bebas. Dengan kata lain, gaya vertikal merupakan beban ekuivalen dari kolom fluida yang berada tepat di atas bidang yang ditinjau.

Rumus umum:

$$F_y = W$$

di mana W adalah berat fluida di atas bidang lengkung. Cara ini sangat logis, sebab setiap gaya normal dari fluida yang diarahkan ke bawah dapat dianggap menambah berat fluida itu sendiri.

3. Resultan Gaya dan Titik Kerja

Setelah diperoleh komponen horizontal dan vertikal, gaya total atau gaya resultan dapat ditentukan dengan prinsip vektor:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

Arah gaya resultan diperoleh dari:

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x}$$

Selain besar dan arah gaya, hal penting lain adalah titik kerja (*line of action*) gaya tersebut. Titik kerja gaya resultan menentukan bagaimana distribusi tekanan memengaruhi stabilitas struktur. Pada bidang lengkung, penentuan titik kerja dilakukan dengan pendekatan integral atau dengan mempertimbangkan momen gaya yang bekerja terhadap titik acuan tertentu.

4. Penyelesaian Matematis

Secara matematis, perhitungan gaya pada bidang lengkung memerlukan penggunaan integral karena tekanan berubah seiring kedalaman fluida. Persamaan umum gaya hidrostatik pada elemen bidang kecil dA adalah:

$$dF = p \cdot dA = \rho gh \cdot dA$$

Dengan mengintegrasikan seluruh elemen bidang, maka diperoleh gaya total. Dalam praktik, langkah ini sering disederhanakan melalui penggunaan proyeksi bidang dan berat fluida seperti dijelaskan pada poin sebelumnya.

5. Contoh Aplikasi

Sebagai contoh, pada pintu air berbentuk setengah lingkaran dengan radius tertentu, gaya horizontal dapat dihitung berdasarkan proyeksi vertikalnya (berupa persegi panjang), sedangkan gaya vertikalnya berasal dari berat fluida yang menekan permukaan setengah lingkaran tersebut. Dengan menjumlahkan kedua komponen itu secara vektor, dapat ditentukan gaya resultan dan arah kerja gaya terhadap pintu air. Informasi ini penting bagi insinyur untuk merancang engsel, kunci, atau rangka penahan yang sesuai agar pintu tidak rusak akibat tekanan air.

C. Konsep Gaya Apung dan Hukum Archimedes

Gaya apung merupakan salah satu fenomena penting dalam mekanika fluida yang muncul ketika suatu benda ditempatkan di dalam fluida. Gaya ini bekerja ke arah atas dan timbul akibat distribusi tekanan hidrostatik pada seluruh permukaan benda. Besarnya gaya apung sebanding dengan volume fluida yang dipindahkan oleh benda, sehingga konsep ini tidak hanya bersifat teoritis tetapi juga memiliki penerapan luas dalam berbagai bidang teknik dan kehidupan sehari-hari.

Prinsip ini pertama kali dijelaskan oleh Archimedes, seorang ilmuwan Yunani kuno, sehingga dikenal dengan sebutan Hukum Archimedes. Hukum tersebut menyatakan bahwa setiap benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya dalam fluida akan mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Dengan kata lain, gaya apung merupakan bentuk “daya dukung” fluida terhadap benda yang berada di dalamnya.

Pada bidang tegak yang terendam dalam fluida, distribusi tekanan tidak seragam karena besarnya tekanan meningkat seiring dengan kedalaman. Akibatnya, gaya total yang bekerja pada bidang tegak dapat dianggap sebagai resultan dari distribusi tekanan tersebut. Titik kerja gaya resultan ini dikenal sebagai titik pusat tekanan (*center of pressure*), yang sangat penting dalam perhitungan rekayasa, misalnya pada dinding bendungan, pintu air, atau tangki penyimpanan.

Secara matematis, gaya apung yang dialami benda dirumuskan sebagai:

$$F_B = \rho_f \cdot g \cdot V_t$$

dengan:

- F_B = gaya apung (N)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- V_t = volume benda yang terendam (m^3)

Gaya total (resultan):

$$F = \rho g h_c A$$

dengan:

- F = gaya total hidrostatis (N)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h_c = kedalaman titik berat bidang (m)
- A = luas bidang (m^2)

Letak titik pusat tekanan (y_{cp}):

$$y_{cp} = \frac{I_g}{h_c A} + h_c$$

dengan:

- y_{cp} : = kedalaman titik pusat tekanan (m)
- I_g = momen inersia bidang terhadap sumbu horisontal yang melalui titik berat (m^4)
- A = luas bidang (m^2)

- h_c = kedalaman titik berat bidang (m)

Titik pusat tekanan selalu lebih dalam daripada titik berat bidang, karena tekanan bertambah dengan kedalaman.

Gaya Apung dan Hukum Archimedes

Selain gaya tekan pada bidang datar, fluida juga memberikan gaya ke atas pada benda yang terendam sebagian atau seluruhnya, yang disebut gaya apung (*buoyant force*). Konsep ini dirumuskan secara sistematis dalam Hukum Archimedes.

Hukum Archimedes menyatakan bahwa *sebuah benda yang terendam sebagian atau seluruhnya dalam fluida akan mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut*.

Ada dua pendekatan untuk menjelaskan gaya apung:

1) Pendekatan bidang lengkung atas dan bawah

- Gaya horizontal pada permukaan lengkung saling meniadakan, sehingga resultannya nol.
- Gaya vertikal yang bekerja pada permukaan lengkung bagian bawah lebih besar daripada gaya vertikal pada permukaan bagian atas. Selisih kedua gaya ini menghasilkan gaya ke atas.

$$F_B = \gamma V_t$$

dengan:

- F_B = gaya apung (N)
- γ = berat jenis fluida (N/m³)
- V_t = volume fluida yang dipindahkan (m³)

2) Pendekatan penjumlahan gaya vertikal elemen

Ambil sebuah elemen silinder dengan luas penampang A dan tinggi h :

Tekanan di bagian bawah silinder:

$$P_1 = \gamma(x + h)$$

Tekanan di bagian atas silinder:

$$P_2 = \gamma(x)$$

Sehingga gaya vertikal:

$$dF_B = (P_1 - P_2) A = \gamma h A = \gamma dV$$

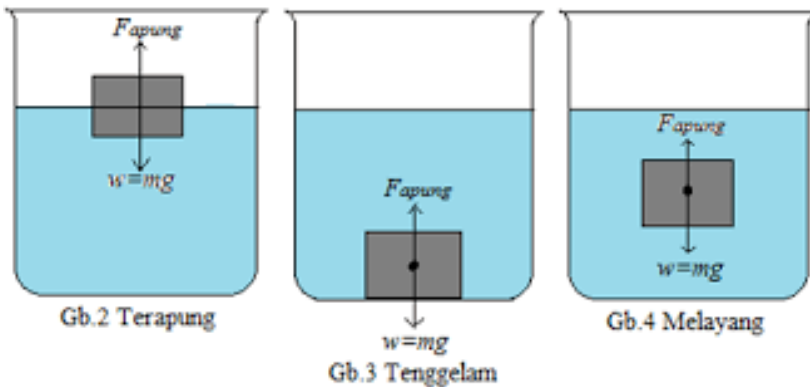
Jika diintegrasikan:

$$F_B = \int dF_B = \gamma V$$

dengan V = volume benda yang terendam.

- Jika $FB > W$ (berat benda), benda akan terapung.
- Jika $FB = W$, benda berada dalam keadaan melayang.
- Jika $FB < W$, benda akan tenggelam.

Konsep gaya apung ini sangat penting dalam perancangan kapal, perahu, balon udara, hingga pengukuran massa jenis zat cair dengan menggunakan hidrometer.



Gambar 6. 1 Kondisi Benda dalam Fluida Menurut Hukum Archimedes

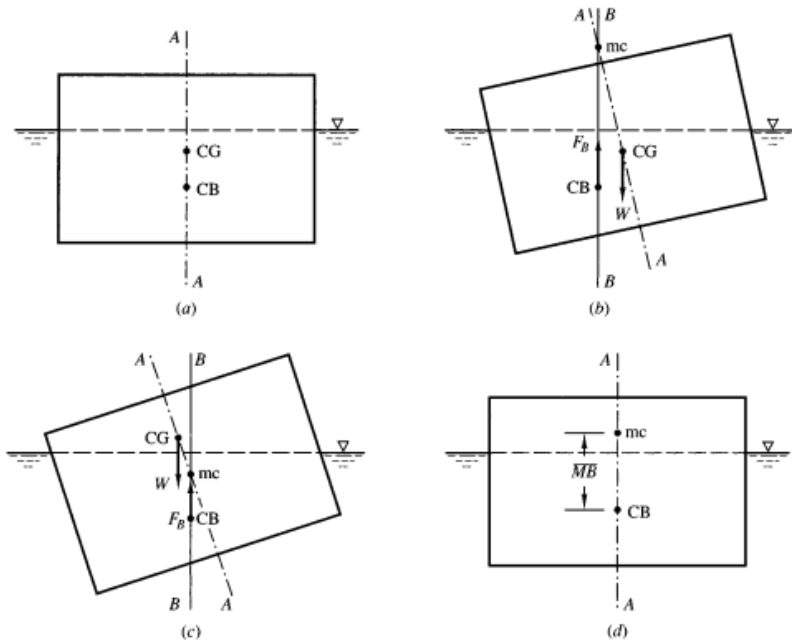
(Sumber: [hukum-archimedes](#))

D. Stabilitas Benda Tenggelam dan Benda Terapung

Untuk menjaga stabilitas sebuah benda yang sepenuhnya tenggelam, titik berat (*center of gravity*, CG) benda harus terletak tepat di bawah titik apung (*center of buoyancy*, CB) dari fluida yang dipindahkan. Apabila kedua titik ini berimpit, maka benda tersebut berada dalam keadaan keseimbangan netral, sehingga tetap stabil pada posisi apa pun.

Pada benda terapung seperti silinder atau bola, syarat stabilitasnya adalah bahwa titik berat benda (CG) harus berada di bawah titik apung (CB). Dengan demikian, benda akan kembali ke posisi semula setelah mengalami sedikit gangguan atau kemiringan. Namun, untuk benda terapung dengan bentuk lain, tingkat stabilitasnya tergantung pada apakah terjadi momen penegak (*righting moment*) atau momen pembalik (*overturning moment*) ketika titik berat

dan titik apung tidak lagi berada pada satu garis vertikal akibat pergeseran posisi titik apung. Pergeseran ini terjadi karena ketika benda terapung miring, bentuk volume fluida yang dipindahkan berubah, sehingga pusat apung (CB) juga ikut bergeser.



Gambar 6. 2 Prinsip Metasentris dan Stabilitas

(Sumber: Giles, Evett, & Liu, 1994)

Pada Gambar 6.2(a) digambarkan suatu benda terapung yang berada dalam keadaan seimbang, di mana titik berat (CG) terletak tepat di atas titik apung (CB). Apabila benda tersebut sedikit diputar berlawanan arah jarum jam seperti pada Gambar 6.2(b) dan garis kerja gaya apung masih berada di sebelah kanan titik berat, maka benda tersebut akan menghasilkan momen penegak dan

kembali ke posisi seimbang dengan kata lain, benda stabil. Sebaliknya, jika setelah kemiringan garis kerja gaya apung berada di sebelah kiri titik berat, seperti pada Gambar 6.2(c), maka benda akan mengalami momen pembalik yang memperbesar kemiringan, sehingga benda tersebut menjadi tidak stabil.

Untuk memahami perbedaan antara kondisi stabil dan tidak stabil, diperkenalkan konsep metasentrum (metacenter, M). Titik metasentrum merupakan titik potong antara sumbu vertikal awal (A-A) dengan garis kerja gaya apung yang baru (B-B) setelah benda mengalami sedikit kemiringan.

Dari pengamatan terhadap Gambar 6.2(b) dan Gambar 6.2(c) dapat disimpulkan:

- Sebuah benda terapung stabil apabila titik berat (CG) berada di bawah titik metasentrum (M).
- Sebaliknya, benda menjadi tidak stabil apabila titik berat (CG) berada di atas titik metasentrum (M).

Untuk menentukan apakah posisi titik berat berada di atas atau di bawah metasentrum (dan dengan demikian apakah benda stabil atau tidak), dapat dilakukan perhitungan jarak antara titik apung (CB) dan titik metasentrum (M) secara kuantitatif. Jarak ini disebut tinggi metasentris (*metacentric height*), dan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$BM = \frac{I}{V}$$

dengan keterangan:

- BM = jarak antara titik apung dan metasentrum (meter, m)

- I = momen inersia bidang permukaan air terhadap sumbu yang melalui pusatnya ($\text{meter}^4, \text{m}^4$)
- V = volume fluida yang dipindahkan oleh benda terapung ($\text{meter}^3, \text{m}^3$)

Nilai BM yang besar menunjukkan bahwa benda memiliki stabilitas yang tinggi, sedangkan nilai BM yang kecil atau negatif menandakan kecenderungan benda untuk terbalik.

BAB 7

GARIS ARUS DALAM ALIRAN FLUIDA DAN MENERAPKAN PERSAMAAN KONTINUITAS

A. Konsep Garis Arus dan Jenis Aliran Fluida

Garis arus (*streamline*) merupakan representasi visual dari arah aliran partikel fluida pada setiap titik dalam ruang. Pada garis arus, kecepatan partikel fluida selalu menyinggung garis tersebut sehingga menggambarkan arah aliran aktual. Pemahaman mengenai garis arus sangat penting karena mempermudah analisis pola pergerakan fluida, baik pada saluran terbuka maupun pipa tertutup.

Aliran fluida ditentukan berdasarkan kecepatan perpindahan fluida yang membentuk suatu garis aliran. Garis aliran tersebut dapat ditandai melalui garis singgung di setiap titik perpindahan fluida yang diamati dengan menggunakan vektor kecepatan. Berdasarkan pola garis aliran ini, aliran fluida dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu aliran stasioner dan aliran non-stasioner.

Aliran stasioner terjadi apabila garis aliran selalu sejajar dan berimpit dengan arah pergerakan fluida pada setiap saat. Sebaliknya, aliran non-stasioner terbentuk ketika garis aliran tidak berimpit dengan arah alirannya, sehingga pola aliran cenderung berubah dari waktu ke waktu. Kedua jenis aliran tersebut pada akhirnya akan membentuk tabung aliran, yaitu suatu ruang berbentuk

tabung yang dibatasi oleh sekumpulan garis aliran. Apabila tabung aliran tidak memiliki luas penampang, maka batas ruangnya sama dengan garis aliran itu sendiri. Dalam kondisi demikian, vektor kecepatan pada tabung aliran bernilai sama dengan garis singgung pada permukaan pembatasnya. Pada dinding tabung aliran, tidak terjadi perpindahan partikel karena tabung tersebut tidak memiliki komponen kecepatan yang tegak lurus (normal) terhadap permukaannya.

Dayana dan Marbun (2023) menekankan bahwa pemahaman tentang kecepatan aliran fluida memiliki peran penting karena menjadi landasan utama dalam menganalisis perilaku fluida pada berbagai sistem teknik. Kecepatan ini menunjukkan bagaimana fluida bergerak melewati suatu penampang dan erat kaitannya dengan jumlah tabung aliran yang terbentuk di sepanjang jalur aliran. Variasi kecepatan aliran fluida dapat terjadi pada setiap penampang, bergantung pada kondisi serta jumlah tabung aliran yang melaluinya. Dalam praktiknya, fenomena ini biasanya diamati pada zat cair yang mengalir dalam kurun waktu tertentu sepanjang jalur alirannya. Untuk menyatakan besar alirannya, dapat digunakan beragam satuan, baik berupa volume, massa, maupun berat per satuan waktu.

Pada keadaan di mana zat cair bergerak tanpa adanya tambahan tekanan luar, terutama dalam aliran stasioner, nilai kecepatan pada setiap bagian tabung aliran tetap konstan. Stabilitas ini menjadikan distribusi kecepatan di sepanjang tabung aliran relatif seragam sehingga memudahkan perhitungan debit maupun analisis kinerja sistem aliran.

5. Aliran Laminar

Aliran laminar adalah jenis aliran fluida yang terjadi ketika setiap lapisan fluida bergerak secara sejajar tanpa adanya gangguan yang menyebabkan percampuran antar lapisan. Pada kondisi ini, garis-garis aliran fluida tidak saling berpotongan sehingga alirannya berlangsung teratur. Ciri utama aliran laminar yaitu tidak terbentuk pusaran maupun persilangan aliran, melainkan setiap partikel fluida bergerak mengikuti lintasan yang sejajar dengan arah aliran.

Fenomena aliran laminar menjadi bagian penting dalam kajian dinamika fluida. Kondisi yang mendukung terjadinya aliran ini biasanya muncul ketika fluida bergerak dengan kecepatan rendah atau pada fluida dengan viskositas (kekentalan) yang cukup tinggi. Dalam aliran laminar, difusi momentum yang berlangsung relatif besar, sedangkan momentum konveksi yang timbul sangat kecil. Secara matematis, karakteristik aliran laminar dapat ditentukan melalui bilangan Reynolds. Jika nilai bilangan Reynolds berada di bawah 2000, maka aliran yang terbentuk dikategorikan sebagai aliran laminar. Namun, seiring berjalannya waktu dan perubahan kondisi, aliran laminar dapat berkembang menjadi aliran turbulen.



Gambar 7. 1 Aliran Laminar

6. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah kondisi aliran fluida yang ditandai dengan kecepatan yang tidak tetap dan selalu berubah-

ubah. Dalam jenis aliran ini, partikel-partikel fluida bergerak secara acak, tidak teratur, dan cenderung tidak stabil. Akibatnya, garis aliran dari partikel-partikel tersebut saling berpotongan, sehingga pola aliran menjadi kompleks.

Aliran turbulen biasanya terbentuk pada kecepatan fluida yang sangat tinggi, dengan nilai kecepatan yang terus mengalami fluktuasi dari waktu ke waktu. Umumnya, aliran turbulen hanya berlangsung sementara, karena partikel-partikel fluida di dalamnya akan sering bertumbukan sehingga kestabilan aliran cepat hilang.

Secara matematis, karakteristik aliran turbulen dianalisis menggunakan bilangan Reynolds yang tidak berdimensi. Suatu aliran dikategorikan turbulen ketika nilai bilangan Reynolds melebihi 4000. Dalam perhitungannya, bilangan Reynolds pada aliran turbulen memperhitungkan pengaruh gaya inersia, namun tidak lagi menekankan kontribusi dari gaya akibat viskositas fluida.



Gambar 7.2 Aliran Turbulen

7. Aliran Transisi

Aliran transisi adalah kondisi peralihan fluida dari keadaan laminar menuju turbulen. Jenis aliran ini muncul karena adanya perbedaan karakteristik antara aliran laminar dan turbulen, terutama terkait dengan kehilangan energi akibat gaya gesek yang dialami selama proses pengaliran. Untuk mengenali apakah suatu aliran berada pada fase transisi, digunakan parameter bilangan Reynolds.

Aliran transisi biasanya terjadi ketika bilangan Reynolds meningkat dari nilai khas aliran laminar. Rentang bilangan Reynolds yang menunjukkan aliran transisi berada di antara nilai 2000 hingga 4000. Besarnya rentang ini bergantung pada ketidaksempurnaan sistem aliran fluida serta tingkat gangguan eksternal yang memengaruhi aliran. Dalam kondisi tertentu, aliran transisi dapat berkembang lebih lanjut dan berubah menjadi aliran turbulen sepenuhnya. Fenomena aliran transisi banyak dijumpai pada aliran udara yang menumbuk permukaan benda dengan bentuk melengkung, misalnya pada bola. Pada situasi ini, interaksi antara fluida dan permukaan benda tersebut menjadi salah satu faktor utama terbentuknya pola aliran transisi.



Gambar 7. 3 Aliran Transisi

Aliran fluida juga dapat dikategorikan dalam berbagai jenis, antara lain:

- **Aliran Tunak (*Steady*) dan Tak Tunak (*Unsteady*)**

Suatu aliran disebut tunak apabila kecepatannya tidak berubah terhadap waktu, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.6. Secara matematis dituliskan sebagai:



Gambar 7. 4 Ilustrasi Saluran dengan Aliran Tunak

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0, \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad v = \text{konstan}$$

$$Q = A \cdot V = \text{konstan} \quad (Q_{in} = Q_{out})$$

Sebaliknya, aliran dikatakan tak tunak jika kecepatan berubah terhadap waktu, contohnya banjir atau pasang surut seperti pada Gambar 7.5:



Gambar 7. 5 Ilustrasi Saluran dengan Aliran Tak Tunak

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \quad v \neq \text{konstan}$$

$$Q = A \cdot V = \text{tidak konstan} \quad (Q_{in} \neq Q_{out})$$

- **Aliran Seragam (*Uniform*) dan Tak Seragam (*Non-Uniform*)**

Jika kedalaman aliran sama di setiap penampang saluran, maka disebut seragam. Apabila berbeda, disebut tidak seragam. Variasi lain termasuk *steady uniform flow*, *unsteady uniform flow*, *steady varied flow*, dan *unsteady varied flow*.

- **Aliran Termampatkan (*Compressible*) dan Tak Termampatkan (*Incompressible*)**

Aliran dikatakan termampatkan jika volumenya berubah akibat tekanan, sedangkan aliran tak termampatkan tidak mengalami perubahan volume.

- **Klasifikasi Aliran Berdasarkan Bilangan Froude (*Fr*)**

Bilangan ini dituliskan sebagai:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{\frac{gy}{\alpha}}}$$

dengan:

v = kecepatan aliran (m/s)

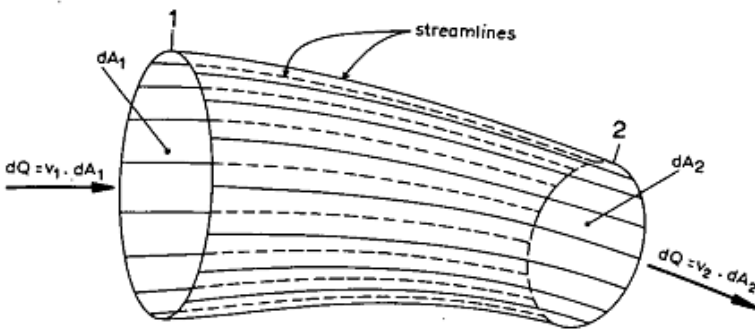
g = percepatan gravitasi (m/s²)

y = kedalaman aliran (m)

Jika $F_r > 1$ maka aliran disebut superkritis, jika $F_r < 1$ disebut subkritis, dan jika $F_r = 1$ berarti berada dalam kondisi kritis. Selain itu, aliran juga bisa dibedakan berdasarkan dimensi: satu dimensi (1D), dua dimensi (2D), dan tiga dimensi (3D), tergantung jumlah gradien kecepatan yang memengaruhi karakteristiknya.

B. Persamaan Kontinuitas pada Aliran Fluida

Persamaan kontinuitas merupakan salah satu prinsip fundamental dalam mekanika fluida yang berakar pada hukum kekekalan massa. Prinsip ini menegaskan bahwa dalam suatu sistem aliran tertutup, massa fluida yang masuk ke suatu penampang tertentu harus sama dengan massa fluida yang keluar dari penampang lain pada sistem yang sama, selama tidak terjadi akumulasi, kebocoran, maupun kehilangan massa di sepanjang jalur aliran. Dengan kata lain, massa fluida selalu terjaga atau konstan sepanjang aliran.



Gambar 7. 6 Skema Aliran Fluida Melalui Penampang Pipa Berbeda Luas dengan Parameter Kecepatan (v) dan Massa Jenis (ρ) pada Penampang A_1 dan A_2

(Sumber: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978)

Secara umum, persamaan kontinuitas dapat dinyatakan sebagai:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

dengan keterangan:

- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- A = luas penampang aliran (m^2)
- V = kecepatan rata-rata aliran (m/s)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa hasil kali massa jenis, luas penampang, dan kecepatan fluida pada suatu titik dalam aliran akan sama dengan hasil kali parameter-parameter tersebut pada titik lain.

Persamaan Kontinuitas pada Fluida Inkompresibel

Untuk fluida inkompresibel, yaitu fluida yang memiliki massa jenis relatif konstan (contohnya air pada kondisi normal), persamaan kontinuitas menjadi lebih sederhana:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Hal ini berarti menunjukkan perubahan luas penampang akan langsung berbanding terbalik dengan perubahan kecepatan aliran. Jika penampang mengecil, maka kecepatan fluida meningkat, sedangkan apabila penampang membesar, maka kecepatan fluida menurun. Fenomena ini sangat penting dalam memahami perilaku aliran fluida pada berbagai sistem pipa dan saluran.

Aplikasi Persamaan Kontinuitas

Prinsip kontinuitas memiliki banyak aplikasi praktis, di antaranya:

- **Perancangan pipa dan saluran air**

Dalam sistem distribusi air, kontinuitas digunakan untuk menghitung kecepatan aliran ketika pipa memiliki diameter berbeda.

- **Venturimeter**

Alat ini bekerja dengan prinsip kontinuitas, di mana penyempitan saluran menyebabkan peningkatan kecepatan dan perubahan tekanan yang dapat digunakan untuk mengukur laju aliran.

- **Nozel dan diffuser**

Pada mesin jet dan turbin, kontinuitas berperan penting dalam mengatur percepatan fluida melalui nozel atau memperlambatnya dalam diffuser.

- **Aliran dalam tubuh manusia**

Prinsip yang sama juga berlaku pada sistem peredaran darah, di mana penyempitan pembuluh darah (stenosis) menyebabkan peningkatan kecepatan aliran darah pada area tersebut.

Persamaan kontinuitas memberikan gambaran bahwa fluida bersifat “tidak dapat hilang begitu saja” dalam suatu sistem tertutup. Kecepatan aliran akan selalu menyesuaikan dengan kondisi penampang agar massa fluida yang bergerak tetap seimbang. Pemahaman konsep ini penting tidak hanya secara teoretis, tetapi juga dalam rekayasa praktis, mulai dari sistem hidrolik sederhana hingga rancangan infrastruktur fluida berskala besar.

C. Aplikasi Garis Arus dan Persamaan Kontinuitas

Konsep garis arus dan persamaan kontinuitas tidak hanya memiliki nilai teoritis dalam kajian mekanika fluida, tetapi juga memberikan manfaat yang sangat besar dalam penerapan praktis di berbagai bidang kehidupan dan teknik. Pemahaman yang baik mengenai kedua konsep ini

memungkinkan seorang perencana atau insinyur untuk menganalisis serta merancang sistem aliran fluida dengan lebih efisien, baik dalam skala kecil maupun dalam infrastruktur berskala besar.

1. Venturimeter dan Orifismeter

Salah satu penerapan paling nyata dari persamaan kontinuitas adalah pada alat ukur debit fluida, seperti venturimeter dan orifismeter. Kedua instrumen ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa jika luas penampang suatu saluran berkurang, maka kecepatan aliran fluida akan meningkat, sedangkan tekanan menurun. Dengan mengukur perbedaan tekanan di antara dua penampang yang berbeda luasnya, maka laju aliran volumetrik dapat dihitung secara akurat. Penerapan alat ini sangat penting pada sistem perpipaan industri, jaringan distribusi air, serta instalasi pengolahan fluida.

2. Pipa Konvergen-Divergen

Saluran dengan bentuk konvergen (menyempit) dan divergen (melebar) juga menjadi contoh penerapan prinsip kontinuitas. Pada bagian yang menyempit, kecepatan fluida meningkat, sedangkan pada bagian yang melebar, kecepatan menurun. Pemahaman ini menjadi dasar dalam perancangan nosel (nozzle) pada turbin gas, mesin jet, maupun sistem hidrolik, di mana perubahan kecepatan aliran sangat menentukan kinerja alat. Selain itu, desain pipa konvergen-divergen juga digunakan dalam sistem pendingin, mesin otomotif, serta teknologi permesinan yang membutuhkan kontrol aliran.

3. Aerodinamika pada Sayap Pesawat Terbang

Prinsip garis arus dan kontinuitas juga berperan penting dalam menjelaskan fenomena aerodinamika. Pada sayap

pesawat, bentuk profil sayap dibuat sedemikian rupa sehingga udara yang mengalir di bagian atas sayap memiliki kecepatan lebih tinggi dibandingkan udara di bagian bawahnya. Berdasarkan persamaan kontinuitas yang dikombinasikan dengan hukum Bernoulli, perbedaan kecepatan aliran ini menghasilkan perbedaan tekanan yang menimbulkan gaya angkat (lift). Gaya angkat inilah yang memungkinkan pesawat dapat terbang. Tanpa pemahaman yang mendalam mengenai kontinuitas aliran, perancangan pesawat modern tidak akan mencapai tingkat efisiensi seperti saat ini.

4. Aliran pada Saluran Terbuka

Dalam konteks aliran pada saluran terbuka seperti sungai, kanal, dan bendungan, persamaan kontinuitas digunakan untuk memprediksi perubahan debit air sepanjang lintasan aliran. Misalnya, ketika sebuah sungai melebar, maka kecepatan aliran akan menurun, sedangkan ketika menyempit, kecepatan meningkat. Analisis ini penting untuk mengantisipasi potensi banjir, merancang bendungan, serta mengelola distribusi air irigasi secara efektif.

5. Aplikasi dalam Kehidupan Sehari-hari

Selain pada bidang teknik, penerapan garis arus dan persamaan kontinuitas dapat ditemukan dalam berbagai fenomena sehari-hari. Contohnya, ketika seseorang menutup sebagian ujung selang dengan jari, maka aliran air yang keluar menjadi lebih cepat dan kuat. Hal ini merupakan ilustrasi sederhana dari persamaan kontinuitas, di mana penyempitan luas penampang (A) mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran (V).

E. Penerapan Persamaan Kontinuitas dalam Perhitungan Aliran Fluida

Persamaan kontinuitas tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga memiliki nilai praktis yang sangat besar dalam menyelesaikan berbagai persoalan aliran fluida. Dalam praktik rekayasa, perhitungan berbasis persamaan ini digunakan untuk menganalisis sistem perpipaan, saluran terbuka, peralatan pengukur aliran, hingga mekanisme alami seperti peredaran darah. Oleh karena itu, penerapan persamaan kontinuitas menjadi bagian penting dalam perhitungan numerik maupun simulasi aliran.

Secara umum, persamaan kontinuitas untuk fluida inkompresibel dituliskan sebagai:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

dan untuk fluida kompresibel:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

dengan keterangan:

- A = luas penampang aliran (m^2),
- V = kecepatan rata-rata aliran (m/s),
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3).

Persamaan ini menunjukkan bahwa debit massa atau debit volumetrik fluida harus tetap konstan sepanjang lintasan aliran, selama tidak ada sumber atau keluaran massa dari sistem.

1. Aplikasi pada Pipa Berdiameter Berbeda

Dalam sistem distribusi air, sering ditemui pipa yang memiliki variasi diameter. Apabila fluida mengalir dari pipa berdiameter besar ke pipa berdiameter kecil, maka

kecepatan fluida akan meningkat untuk menjaga debit aliran tetap konstan. Hal ini dapat dihitung dengan persamaan kontinuitas.

Contoh: Jika air mengalir pada pipa dengan luas penampang $0,05 \text{ m}^2$ dengan kecepatan 2 m/s lalu memasuki pipa dengan luas penampang $0,02 \text{ m}^2$, maka kecepatan pada pipa kedua adalah:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{A_1 V_1}{A_2} = \frac{0,05 \times 2}{0,02} = 5 \text{ m/s}$$

Interpretasinya, penyempitan pipa meningkatkan kecepatan aliran lebih dari dua kali lipat.

2. Aplikasi pada Venturimeter dan Orifismeter

Venturimeter adalah alat ukur laju aliran yang menggunakan prinsip kontinuitas dan perbedaan tekanan. Ketika aliran fluida melewati bagian yang menyempit, kecepatan meningkat dan tekanan menurun. Dengan mengukur perbedaan tekanan pada dua penampang, laju aliran dapat dihitung. Persamaan dasarnya adalah kombinasi persamaan kontinuitas dan persamaan Bernoulli, sehingga menghasilkan hubungan antara debit fluida dengan beda tekanan.

3. Aplikasi pada Sistem Biologis

Persamaan kontinuitas juga berlaku pada sistem peredaran darah. Ketika darah melewati pembuluh yang mengalami penyempitan (stenosis), kecepatan aliran darah akan meningkat. Fenomena ini dapat menjelaskan perubahan tekanan darah pada penderita penyakit kardiovaskular. Dengan demikian, persamaan kontinuitas bukan hanya relevan dalam teknik sipil atau mesin, tetapi juga dalam ilmu kedokteran dan bioteknologi.

BAB 8

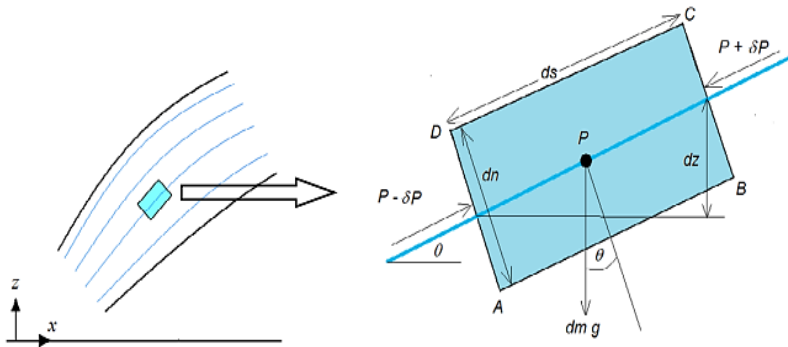
HUKUM BERNOULLI DAN APLIKASINYA PADA ALIRAN FLUIDA SEPANJANG GARIS ALIRAN

A. Prinsip Dasar Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli merupakan salah satu hukum fundamental dalam mekanika fluida yang menjelaskan hubungan antara tekanan, kecepatan, dan ketinggian suatu fluida dalam aliran sepanjang garis aliran. Konsep ini sangat penting karena memberikan dasar pemahaman mengenai bagaimana energi dalam fluida bekerja dan berpindah, serta bagaimana hubungan tersebut memengaruhi perilaku fluida dalam berbagai sistem teknik dan fenomena alam.

1. Sejarah Singkat Daniel Bernoulli dan Kontribusinya

Daniel Bernoulli (1700–1782) adalah seorang ilmuwan Swiss yang terkenal dengan karyanya *Hydrodynamica* (1738). Dalam buku ini, ia merumuskan prinsip bahwa energi total fluida yang mengalir dalam suatu sistem tertutup bersifat konstan jika diabaikan pengaruh gesekan dan kehilangan energi lain. Penemuannya menjadi tonggak penting dalam mekanika fluida modern, karena mampu menjelaskan banyak fenomena fisik seperti aliran udara di sekitar sayap pesawat hingga cara kerja alat sederhana seperti semprotan parfum.



Gambar 8. 1 Elemen Fluida dalam Aliran

(Sumber: Hewakandamby, 2012)

2. Energi dalam Aliran Fluida

Untuk memahami hukum Bernoulli, perlu dipahami terlebih dahulu bentuk-bentuk energi yang terdapat dalam fluida. Pada dasarnya, setiap partikel fluida dalam aliran dapat memiliki tiga komponen energi utama:

a. Energi Tekanan (*Pressure Energy*)

Energi ini timbul akibat adanya tekanan yang bekerja pada fluida. Secara matematis dinyatakan sebagai:

$$E = P \cdot V \quad \text{atau} \quad E = \frac{P}{\rho g}$$

di mana P adalah tekanan fluida (N/m^2), ρ massa jenis fluida (kg/m^3), dan g percepatan gravitasi (m/s^2). Besaran ini sering disebut sebagai *pressure head*.

b. Energi Kinetik (*Kinetic Energy*)

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki fluida karena gerakan atau kecepatannya. Energi ini terkait dengan kecepatan fluida yang mengalir.

Rumus umum energi kinetik total

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

dengan:

- E_k = Energi kinetik (Joule)
- m = Massa fluida (kg)
- v = Kecepatan fluida (m/s)

Energi kinetik per satuan volume

Karena $m = \rho V$, maka:

$$\frac{E_k}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Energi kinetik per satuan berat (*head* kinetik)

Jika dibagi dengan berat $W = mg$, maka:

$$\frac{E_k}{W} = \frac{v^2}{2g}$$

c. Energi Potensial (*Potential Energy*)

Energi potensial adalah energi yang dimiliki suatu massa fluida karena ketinggiannya terhadap suatu bidang acuan. Energi ini muncul akibat posisi ketinggian fluida terhadap suatu acuan. Dituliskan sebagai:

Rumus umumnya:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

dengan:

- E_p = Energi potensial (Joule)

- m = Massa fluida (kg)
- g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h = Ketinggian terhadap bidang acuan (m)

Jika dinyatakan dalam bentuk per satuan volume:

$$\frac{E_p}{V} = \rho \cdot g \cdot h$$

Jika dinyatakan dalam bentuk per satuan berat (*head*):

$$\frac{E_p}{W} = h$$

Asumsi Dasar Hukum Bernoulli

Persamaan Bernoulli hanya berlaku pada kondisi tertentu. Beberapa asumsi yang digunakan adalah:

1. Fluida bersifat *incompressible* (tidak dapat dimampatkan).
2. Aliran bersifat *steady flow* (keadaan tunak), artinya sifat fluida pada suatu titik tidak berubah terhadap waktu.
3. Tidak ada pengaruh viskositas (aliran dianggap ideal tanpa gesekan).
4. Analisis dilakukan sepanjang *streamline* (garis aliran).

Dengan asumsi tersebut, energi total fluida pada suatu garis aliran akan selalu konstan.

Rumus Umum Hukum Bernoulli

Dalam bentuk energi per satuan volume fluida:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konstan}$$

Dalam bentuk energi per satuan berat fluida (*head*):

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h = \text{konstan}$$

Keterangan:

- P = Tekanan fluida (N/m^2)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
- v = Kecepatan aliran fluida (m/s)
- g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h = Ketinggian fluida dari acuan (m)

Sehingga persamaan Bernoulli dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 = E$$

Interpretasi Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menunjukkan bahwa pada suatu aliran fluida ideal, jika kecepatan fluida meningkat, maka tekanan statisnya akan menurun, dan sebaliknya. Hal ini sering disebut sebagai prinsip dasar efek Bernoulli. Secara lebih rinci:

- Jika kecepatan fluida bertambah (misalnya pada pipa menyempit), maka tekanan fluida berkurang.
- Jika fluida mengalir ke tempat lebih tinggi, sebagian energi tekanan berubah menjadi energi potensial.
- Jika tekanan meningkat, maka kecepatan fluida cenderung menurun jika energi total harus tetap konstan.

Dengan interpretasi ini, hukum Bernoulli dapat digunakan untuk menjelaskan berbagai fenomena praktis, mulai dari desain sistem perpipaan, aliran air dalam bendungan, hingga prinsip kerja sayap pesawat.

B. Distribusi Tekanan, Kecepatan, dan Energi dalam Aliran Fluida

Dalam aliran fluida, energi tidak hanya tersimpan dalam bentuk tekanan, kecepatan, maupun ketinggian, tetapi juga didistribusikan dan saling berhubungan sepanjang lintasan aliran. Konsep distribusi ini menjadi dasar untuk memahami bagaimana fluida berperilaku ketika mengalami perubahan geometri saluran, variasi ketinggian, maupun perbedaan tekanan.

1. Hubungan Antara Tekanan dan Kecepatan

Ketika suatu fluida mengalir melalui pipa dengan penampang berbeda, kecepatan fluida akan berubah. Pada bagian pipa yang menyempit, kecepatan bertambah, sementara tekanannya menurun. Sebaliknya, pada bagian pipa yang melebar, kecepatan berkurang dan tekanan meningkat. Fenomena ini menjadi bukti nyata bahwa energi kinetik dan energi tekanan saling bertukar, namun jumlah total energinya tetap konstan sesuai dengan prinsip Bernoulli.

2. Pengaruh Ketinggian (Energi Potensial)

Perbedaan ketinggian juga memengaruhi distribusi energi dalam aliran. Fluida yang mengalir ke tempat lebih tinggi membutuhkan energi tambahan untuk mengatasi gravitasi. Energi ini biasanya diambil dari energi tekanan, sehingga semakin tinggi letak pipa atau saluran, semakin besar penurunan tekanan yang terjadi. Hal ini terlihat jelas pada

sistem distribusi air minum, di mana pompa digunakan untuk meningkatkan energi tekanan agar fluida mampu mencapai lokasi dengan ketinggian tertentu.

3. Prinsip Konservasi Energi dalam Aliran

Meskipun tekanan, kecepatan, dan ketinggian dapat berubah di sepanjang aliran, jumlah total energi fluida tetap sama selama tidak ada kerugian akibat gesekan atau faktor eksternal lainnya. Dengan kata lain, energi fluida hanya berpindah bentuk dari tekanan menjadi kecepatan, atau dari kecepatan menjadi potensial, tanpa menghilang. Prinsip ini penting dalam perancangan sistem hidrolika, jaringan pipa, maupun peralatan teknik yang memanfaatkan aliran fluida.

C. Aplikasi Persamaan Bernoulli dalam Aliran Fluida

Persamaan Bernoulli sangat bermanfaat dalam menjelaskan fenomena aliran fluida di berbagai bidang teknik. Beberapa penerapan utama:

1. Pipa dengan Penampang Berbeda

Jika fluida mengalir dalam pipa yang memiliki luas penampang berbeda, maka kecepatan dan tekanannya akan berubah.

Rumus kontinuitas:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Jika dikombinasikan dengan persamaan Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Contoh: Pada aliran air di pipa sempit, kecepatan meningkat sehingga tekanannya berkurang.

2. Venturimeter

Alat untuk mengukur kecepatan aliran fluida dengan memanfaatkan perbedaan tekanan di dua penampang berbeda.

Debit fluida:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Dengan tekanan diukur melalui tabung pitot atau manometer.

3. Sayap Pesawat Terbang

Berdasarkan prinsip Bernoulli, udara yang mengalir lebih cepat di bagian atas sayap menimbulkan tekanan lebih rendah dibanding bagian bawah, sehingga menghasilkan gaya angkat.

D. Perhitungan Menggunakan Persamaan Bernoulli

Untuk memahami penerapannya, berikut contoh soal:

Contoh Perhitungan:

Air dengan massa jenis $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ mengalir melalui pipa horizontal dari penampang besar ke kecil. Luas penampang besar $A_1=0,02 \text{ m}^2$, luas penampang kecil $A_2=0,01 \text{ m}^2$, dan kecepatan fluida pada penampang besar $v_1=2 \text{ m/s}$. Tentukan kecepatan fluida pada penampang kecil (v_2) dan selisih tekanannya.

Penyelesaian:

1. Persamaan kontinuitas:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$(0,02)(2) = (0,01)(v_2)$$

$$v_2 = 4 \text{ m/s}$$

2. Persamaan Bernoulli (pipa horizontal, $h_1 = h_2$):

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} (1000)(16 - 4)$$

$$P_1 - P_2 = 6000 \text{ Pa}$$

BAB 9

KAJIAN SIFAT FLUIDA DAN APLIKASINYA DALAM ALIRAN NYATA TEGANGAN PERMUKAAN VISKOSITAS KAPILARITAS DAN TEKANAN HIDROSTATIS

A. Tegangan Permukaan dan Perilaku Permukaan Cairan

Tegangan permukaan merupakan salah satu sifat penting fluida yang muncul akibat gaya kohesi antar molekul pada permukaan cairan. Molekul-molekul di bagian dalam cairan saling tarik-menarik secara seimbang, sedangkan molekul di permukaan mengalami gaya tarik yang tidak seimbang karena hanya berinteraksi dengan molekul di bawah dan sampingnya. Ketidakseimbangan ini menyebabkan permukaan cairan bertindak seperti membran elastis tipis, sehingga cenderung meminimalkan luas permukaannya. Fenomena ini tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga mudah diamati dalam kehidupan sehari-hari.

Contoh yang paling umum adalah terbentuknya tetesan air. Ketika air menetes dari keran atau permukaan, bentuk tetesan hampir selalu bulat, karena tegangan permukaan berusaha meminimalkan energi permukaan dengan membentuk bentuk geometris yang memiliki luas permukaan terkecil, yaitu bola. Selain tetesan, fenomena gelembung sabun juga menunjukkan tegangan permukaan.

Lapisan tipis sabun pada gelembung menahan gaya internal sehingga gelembung dapat terbentuk dan tetap stabil untuk beberapa saat sebelum pecah.

Selain itu, tegangan permukaan juga menjadi dasar fenomena *capillary rise* atau naiknya cairan dalam tabung sempit. Saat ujung tabung dimasukkan ke dalam cairan, interaksi antara molekul cairan dan dinding tabung menghasilkan gaya adhesi, sementara tegangan permukaan menghasilkan gaya kohesi. Kombinasi keduanya menyebabkan cairan naik atau turun di tabung hingga mencapai keseimbangan. Fenomena ini dapat diamati pada akar tanaman yang menarik air dari tanah, tinta dalam pena kapiler, maupun pergerakan cairan dalam microchannels pada teknologi laboratorium miniatur.

Secara matematis, tegangan permukaan (σ) didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja sejajar permukaan:

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

di mana F adalah gaya tegangan permukaan dan L adalah panjang garis kontak. Misalnya, jika sebuah kawat tipis berada di atas permukaan cairan, tegangan permukaan akan menghasilkan gaya horizontal yang menahan kawat dari jatuh ke permukaan cairan. Contoh perhitungan sederhana dapat dilakukan dengan mengetahui gaya yang dibutuhkan untuk menarik kawat melalui permukaan cairan dan panjang kontak kawat tersebut.

Tegangan permukaan memiliki aplikasi luas dalam bidang teknik dan industri. Dalam industri farmasi, distribusi obat dalam larutan sering dipengaruhi oleh sifat permukaan, sehingga pengendalian tegangan permukaan menjadi penting untuk memastikan droplet tidak pecah

dan zat aktif tersebar merata. Dalam teknologi mikrofluida, tegangan permukaan menjadi faktor kunci yang menentukan aliran cairan dalam microchannels, sensor berbasis cairan, dan perangkat lab-on-a-chip. Bahkan dalam biologi, fenomena tegangan permukaan membantu menjelaskan perilaku organisme kecil, seperti serangga yang mampu berjalan di atas air tanpa tenggelam.

B. Viskositas Kinematis dan Dinamika Aliran

Viskositas merupakan salah satu sifat fundamental fluida yang menggambarkan resistensi internal terhadap deformasi atau aliran. Secara sederhana, viskositas dapat dipahami sebagai “kekentalan” fluida, yang menentukan seberapa mudah molekul-molekulnya saling bergeser ketika fluida mengalami gaya luar. Dua bentuk viskositas yang umum digunakan adalah viskositas dinamis (η) dan viskositas kinematis (ν).

Viskositas dinamis (η) adalah ukuran resistensi internal fluida terhadap geseran per satuan luas, biasanya diukur dalam satuan Pascal detik ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) atau poise (P). Viskositas kinematis (ν) diperoleh dari rasio viskositas dinamis terhadap massa jenis fluida (ρ):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

dengan ν dalam m^2/s , η dalam $\text{Pa}\cdot\text{s}$, dan ρ dalam kg/m^3 . Viskositas kinematis memberikan gambaran seberapa cepat suatu fluida dapat mengalir di bawah pengaruh gaya tertentu, memperhitungkan massa jenis fluida. Fluida dengan viskositas rendah, seperti air, mengalir lebih mudah, sedangkan fluida dengan viskositas tinggi, seperti madu atau oli, mengalir lebih lambat meski mengalami gaya sama.

Pengaruh viskositas terhadap aliran fluida sangat signifikan dalam menentukan jenis aliran, yaitu laminar atau turbulen. Aliran laminar ditandai dengan pergerakan lapisan-lapisan fluida yang rapi dan sejajar, biasanya terjadi pada fluida dengan viskositas tinggi atau kecepatan rendah. Sebaliknya, aliran turbulen ditandai dengan gerakan acak dan bercampurnya lapisan-lapisan fluida, umumnya terjadi pada fluida dengan viskositas rendah atau kecepatan tinggi. Pemahaman ini dapat dianalisis menggunakan bilangan Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu}$$

di mana v adalah kecepatan rata-rata aliran (m/s), D diameter pipa (m), ρ massa jenis (kg/m^3), η viskositas dinamis ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), dan ν viskositas kinematis (m^2/s). Aliran laminar biasanya terjadi pada $Re < 2000$, sedangkan aliran turbulen terjadi pada $Re > 4000$. Bilangan Reynolds menjadi parameter penting untuk merancang sistem pipa dan kanal agar aliran tetap stabil dan efisien.

Metode pengukuran viskositas telah dikembangkan untuk berbagai tujuan. Beberapa teknik umum meliputi viskometer kapiler, tabung Ostwald, dan viskometer rotasi. Viskometer kapiler mengukur waktu (t) yang dibutuhkan fluida untuk mengalir melalui tabung sempit, sehingga viskositas kinematis dapat dihitung dengan rumus:

$$\nu = K \cdot t$$

di mana K adalah konstanta viskometer yang ditentukan secara kalibrasi. Tabung Ostwald bekerja berdasarkan prinsip serupa, sedangkan viskometer rotasi mengukur torsi (T) yang diperlukan untuk memutar silinder di dalam

fluida, sehingga viskositas dinamis diperoleh dengan persamaan:

$$\eta = \frac{T}{2\pi R^2 L \omega}$$

di mana R adalah jari-jari silinder, L panjang silinder, dan ω kecepatan sudut putaran silinder.

Viskositas memiliki banyak aplikasi praktis dalam kehidupan sehari-hari maupun industri. Dalam pelumasan mesin, oli dengan viskositas tepat dapat mengurangi gesekan antar komponen, mencegah aus, dan meningkatkan efisiensi energi. Dalam aliran pipa industri, viskositas fluida menentukan kehilangan tekanan, kapasitas pompa, dan desain pipa agar aliran tetap stabil. Di sistem hidrolik, pemilihan fluida dengan viskositas sesuai memastikan transmisi tenaga yang efisien dan responsif. Bahkan dalam bidang kimia dan farmasi, kontrol viskositas sangat penting untuk pengolahan larutan, suspensi, dan produk cair lainnya.

Memahami viskositas tidak hanya penting untuk aplikasi praktis, tetapi juga merupakan dasar untuk memprediksi perilaku fluida dalam berbagai kondisi aliran. Dengan mengintegrasikan konsep viskositas, insinyur dan ilmuwan dapat merancang sistem fluida yang efisien, aman, dan optimal, baik dalam skala industri besar maupun perangkat miniatur, seperti *microfluidic device*.

C. Kapilaritas dan Interaksi Permukaan-Fluida

Kapilaritas merupakan fenomena fisika yang muncul akibat interaksi antara tegangan permukaan cairan dan gaya adhesi dengan dinding benda padat. Secara sederhana, kapilaritas dapat diamati sebagai naik atau turunnya cairan

dalam tabung sempit, yang disebut tabung kapiler, hingga mencapai keadaan keseimbangan. Fenomena ini menjadi salah satu bukti nyata bagaimana sifat molekuler fluida dapat memengaruhi perilaku makroskopisnya.

Tinggi naik atau turunnya cairan dalam tabung kapiler (h) dapat dihitung dengan persamaan klasik:

$$h = 2\sigma \cos \frac{\theta}{\rho g r}$$

di mana:

- σ = tegangan permukaan cairan (N/m)
- θ = sudut kontak antara cairan dan dinding tabung
- ρ = massa jenis cairan (kg/m³)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)
- r = jari-jari tabung kapiler (m)

Persamaan ini menunjukkan bahwa tinggi kapilaritas meningkat jika tegangan permukaan cairan tinggi, jari-jari tabung kecil, atau sudut kontak mendekati nol (cairan membasahi dinding). Sebaliknya, cairan yang tidak membasahi dinding (sudut kontak besar) akan mengalami penurunan permukaan dalam tabung.

Fenomena kapilaritas banyak muncul di kehidupan sehari-hari dan dalam sistem biologis maupun teknologi. Dalam tumbuhan, kapilaritas membantu transportasi air dari akar ke daun melalui xilem. Cairan naik dalam pembuluh tipis tumbuhan tanpa bantuan pompa eksternal, hanya melalui kombinasi tegangan permukaan dan adhesi molekul. Dalam teknologi percetakan, tinta pena kapiler atau printer memanfaatkan kapilaritas untuk menarik tinta melalui ujung pena atau microchannel secara terkontrol.

Pada *microfluidic device*, kapilaritas menjadi prinsip dasar yang memungkinkan pengaliran cairan di saluran mikroskopis tanpa pompa mekanik, sehingga alat laboratorium miniatur dapat bekerja dengan presisi tinggi.

Selain itu, kapilaritas juga diterapkan dalam sistem irigasi tetes, di mana air naik melalui tabung tipis atau media pori untuk menyiram tanaman secara efisien. Sensor berbasis cairan juga memanfaatkan kapilaritas untuk menunjukkan ketinggian atau keberadaan cairan di dalam saluran sempit. Dalam semua aplikasi ini, pengendalian sifat permukaan, sudut kontak, dan dimensi saluran menjadi faktor kunci untuk memastikan kinerja optimal.

Fenomena kapilaritas menunjukkan hubungan yang erat antara sifat molekuler fluida dan aplikasi makroskopisnya. Dengan memahami prinsip ini, para insinyur, ilmuwan, dan teknolog dapat merancang sistem aliran cairan yang efisien, akurat, dan ramah energi, baik dalam skala industri maupun perangkat miniatur. Kapilaritas juga menjadi contoh nyata bagaimana konsep sederhana dalam mekanika fluida dapat diterapkan pada berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi modern.

D. Integrasi Tekanan Hidrostatik dan Prinsip Bernoulli dalam Aplikasi Nyata

Tekanan hidrostatik dan prinsip Bernoulli merupakan dua konsep fundamental dalam mekanika fluida yang saling terkait dan memiliki aplikasi luas pada aliran nyata. Tekanan hidrostatik berkaitan dengan gaya yang bekerja pada fluida diam akibat berat fluida itu sendiri, sedangkan prinsip Bernoulli menjelaskan hubungan antara tekanan, kecepatan, dan ketinggian dalam aliran fluida ideal. Integrasi kedua konsep ini memungkinkan analisis aliran

fluida yang lebih realistis, terutama ketika sifat fluida seperti viskositas, tegangan permukaan, dan kapilaritas ikut berperan.

Tekanan hidrostatik pada kedalaman tertentu dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = P_0 + \rho gh$$

di mana:

- P = tekanan pada kedalaman h (Pa)
- P_0 = tekanan atmosfer di permukaan fluida (Pa)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = kedalaman dari permukaan fluida (m)

Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa total energi per satuan volume fluida sepanjang garis aliran adalah konstan, sehingga dapat ditulis sebagai:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gz = \text{konstanta}$$

di mana v adalah kecepatan aliran fluida (m/s) dan z adalah ketinggian fluida (m). Integrasi tekanan hidrostatik dengan persamaan Bernoulli memungkinkan kita menghitung tekanan dan kecepatan fluida dalam berbagai kondisi nyata, termasuk pipa yang naik-turun, tangki terbuka, atau aliran melalui saluran sempit.

Sifat fluida seperti viskositas, tegangan permukaan, dan kapilaritas memengaruhi distribusi energi dalam aliran nyata. Viskositas menyebabkan kehilangan energi akibat gesekan internal, sedangkan tegangan permukaan dan kapilaritas menjadi penting dalam aliran fluida

mikroskopis, seperti *microfluidic device*. Dalam saluran mikro, misalnya, kapilaritas dapat menyebabkan fluida naik tanpa pompa eksternal, sedangkan tegangan permukaan menentukan bentuk antarmuka cairan. Dengan demikian, integrasi prinsip Bernoulli dan sifat fluida memungkinkan perancangan sistem yang efisien, baik pada skala makro maupun mikro.

Berbagai aplikasi nyata dapat dijelaskan melalui konsep ini. Dalam pipa ventilasi, prinsip Bernoulli membantu menghitung kecepatan aliran dan distribusi tekanan agar ventilasi berjalan optimal. Pada tangki dan reservoir, tekanan hidrostatik menentukan gaya yang diterima dinding tangki, sedangkan Bernoulli dapat digunakan untuk memperkirakan laju aliran keluar dari lubang atau katup. Pengukuran debit dalam industri sering memanfaatkan orifis, venturi, atau saluran terbuka, di mana perbedaan tekanan dihubungkan dengan kecepatan aliran melalui persamaan Bernoulli. Di bidang teknologi modern, *microfluidic device* menggunakan prinsip serupa untuk mengontrol aliran cairan dalam saluran mikroskopis secara presisi, memadukan efek viskositas, tegangan permukaan, dan kapilaritas.

Untuk perhitungan sederhana, jika fluida mengalir dari tangki terbuka ke pipa horizontal melalui lubang kecil, kecepatan aliran (v) dapat diperoleh dari persamaan Torricelli yang merupakan bentuk khusus dari Bernoulli:

$$v = \sqrt{2gh}$$

di mana h adalah tinggi permukaan fluida di atas lubang. Persamaan ini sudah memperhitungkan tekanan hidrostatik dan memungkinkan estimasi cepat aliran keluar tanpa memerlukan pompa tambahan. Dengan memahami integrasi tekanan hidrostatik dan prinsip Bernoulli, serta

pengaruh sifat-sifat fluida, para insinyur dan ilmuwan dapat merancang sistem aliran yang efisien, aman, dan terukur. Pendekatan ini menghubungkan teori dasar fluida dengan penerapan nyata, baik dalam skala industri besar maupun perangkat mikro modern, sehingga menunjukkan relevansi konsep klasik dalam mekanika fluida dengan teknologi kontemporer.

BAB 10

PENGUKURAN DEBIT ALIRAN FLUIDA MENGGUNAKAN ORIFIS DAN METER VENTURI

A. Konsep Dasar Debit Aliran dan Pengukuran Fluida

Debit aliran atau laju aliran merupakan salah satu parameter utama dalam mekanika fluida yang menunjukkan volume atau massa fluida yang bergerak melalui suatu penampang per satuan waktu. Secara matematis, debit volumetrik (Q) dapat dinyatakan sebagai:

$$Q = \frac{V}{t}$$

di mana V adalah volume fluida yang mengalir (m^3), dan t adalah waktu pengukuran (s). Debit volumetrik memberikan gambaran seberapa banyak fluida melewati suatu penampang tertentu dalam periode waktu tertentu. Sementara itu, debit massa (Q_m) memperhitungkan massa jenis fluida (ρ) dan dapat dituliskan sebagai:

$$Q_m = \rho Q$$

Dengan demikian, debit massa menggambarkan jumlah massa fluida yang melewati penampang per satuan waktu, yang sangat relevan untuk perhitungan energi, perpindahan zat terlarut, dan desain sistem distribusi fluida.

Faktor-faktor yang memengaruhi pengukuran debit cukup beragam. Salah satunya adalah viskositas fluida, yaitu resistensi internal terhadap aliran. Fluida dengan viskositas tinggi, seperti minyak, mengalami gesekan internal lebih besar sehingga dapat menurunkan kecepatan aliran pada penampang tertentu. Faktor berikutnya adalah densitas atau massa jenis fluida, yang memengaruhi debit massa dan respon sistem terhadap perubahan tekanan. Selain itu, profil aliran apakah laminar atau turbulen juga sangat menentukan distribusi kecepatan dalam pipa atau saluran. Pada aliran laminar, kecepatan fluida lebih teratur dengan distribusi profil parabolik, sedangkan pada aliran turbulen, kecepatan lebih acak dengan fluktuasi signifikan yang dapat memengaruhi hasil pengukuran.

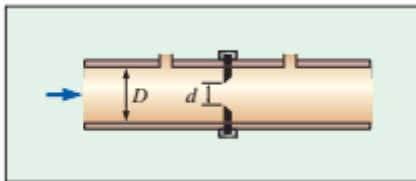
Pentingnya pengukuran debit yang akurat tidak dapat dilebih-lebihkan dalam berbagai aplikasi teknik dan industri. Dalam sistem hidrolika, debit menentukan performa pompa, distribusi energi, dan efisiensi transfer fluida. Di sistem distribusi air bersih, pengukuran debit memungkinkan perencanaan jaringan pipa, kontrol aliran, dan pengelolaan konsumsi. Di bidang industri kimia dan proses, debit fluida menentukan laju reaksi, waktu kontak dalam reaktor, dan keselamatan proses. Oleh karena itu, pemahaman dasar debit aliran dan faktor-faktor yang memengaruhinya menjadi landasan bagi setiap teknik pengukuran fluida, baik menggunakan alat sederhana seperti pipa pengukur atau sistem canggih seperti meter Venturi dan orifis.

Selain itu, pengukuran debit juga harus mempertimbangkan ketepatan dan kalibrasi instrumen. Kesalahan kecil pada pengukuran tekanan atau ketinggian fluida dapat menyebabkan perbedaan signifikan pada debit yang dihitung. Oleh karena itu, prinsip pengukuran debit

menggabungkan konsep dasar fluida, sifat-sifat fluida, dan metode pengukuran yang sesuai, sehingga hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis teknis, perancangan sistem, dan aplikasi praktis secara andal.

B. Pengukuran Debit dengan Orifis

Orifis merupakan salah satu alat sederhana namun efektif untuk mengukur debit aliran fluida. Secara fisik, orifis berupa pelat tipis dengan lubang terbatas yang dipasang pada pipa atau tangki. Lubang ini berfungsi sebagai penahan aliran sehingga fluida yang melewatinya akan mengalami perubahan tekanan dan kecepatan, memungkinkan perhitungan debit secara relatif akurat. Orifis sering digunakan dalam sistem industri dan laboratorium karena desainnya sederhana, biaya rendah, serta mudah dipasang pada saluran fluida.



Gambar 10. 1 Orifice Meter

Prinsip kerja orifis didasarkan pada perubahan tekanan dan energi fluida saat melewati lubang sempit. Ketika fluida mengalir dari daerah bertekanan lebih tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah melalui orifis, kecepatan fluida meningkat dan tekanan menurun sesuai dengan persamaan Bernoulli. Perbedaan tekanan ini dapat diukur menggunakan manometer atau sensor tekanan, sehingga debit aliran dapat dihitung. Persamaan dasar debit melalui orifis diberikan oleh:

$$Q = C_d A \sqrt{2gh}$$

di mana:

- Q = debit aliran (m^3/s)
- C_d = koefisien debit, faktor koreksi yang memperhitungkan efek nyata seperti viskositas dan turbulensi
- A = luas penampang lubang orifis (m^2)
- h = beda ketinggian fluida atau head yang menghasilkan aliran (m)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Koefisien debit (C_d) merupakan parameter penting yang bergantung pada bentuk lubang, rasio diameter lubang terhadap pipa, dan kondisi aliran. Nilai C_d biasanya diperoleh dari kalibrasi eksperimen karena debit nyata biasanya lebih rendah daripada debit teoretis akibat vena contracta, yaitu penyempitan aliran sesaat setelah melewati orifis, dan kehilangan energi akibat gesekan dengan dinding.

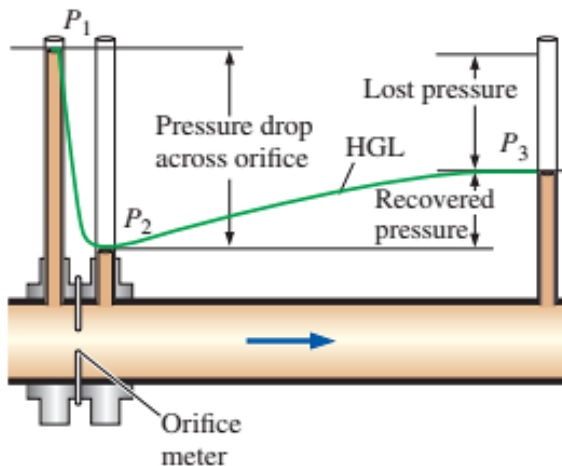
Selain *vena contracta*, beberapa faktor lain juga memengaruhi hasil pengukuran debit dengan orifis:

1. Viskositas fluida: fluida kental akan mengalami gesekan lebih besar sehingga menurunkan debit nyata dibandingkan debit ideal.
2. Tingkat turbulensi: aliran turbulen menyebabkan fluktuasi kecepatan dan tekanan, sehingga koefisien debit harus disesuaikan.
3. Profil aliran upstream: panjang pipa sebelum orifis memengaruhi distribusi kecepatan fluida; panjang pipa

yang terlalu pendek dapat menghasilkan aliran tidak seragam di area orifis.

Aplikasi orifis sangat luas. Dalam industri air bersih, orifis digunakan untuk mengukur debit keluar dari tangki penyimpanan atau *reservoir*. Dalam proses industri, orifis dapat mengontrol aliran bahan cair secara presisi, misalnya dalam pabrik kimia untuk mengatur laju reaktan masuk ke reaktor. Di laboratorium, orifis membantu eksperimen hidrolika, seperti pengukuran debit aliran melalui saluran terbuka atau pipa tertutup, sekaligus memberikan pemahaman praktis tentang prinsip Bernoulli dan tekanan fluida.

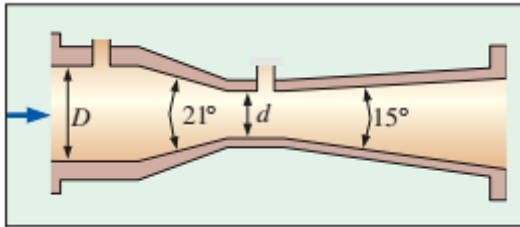
Orifice meter memiliki desain paling sederhana dan membutuhkan ruang minimal karena hanya berupa pelat dengan lubang di tengahnya. Namun, terdapat variasi bentuk, seperti tepi tajam, miring (*beveled*), atau melengkung. Perubahan mendadak luas penampang pada orifice meter menyebabkan aliran berputar (*swirl*) yang mengakibatkan kehilangan energi atau penurunan tekanan permanen cukup besar (Cengel & Cimbala, 2014).



Gambar 10. 2 Variasi Tekanan Sepanjang Penampang Aliran pada Orifice Meter Sebagaimana Diukur dengan Tabung Piezometer, Memperlihatkan Penurunan Tekanan dan Proses Pemulihan Tekanan Setelah Melewati Orifice

C. Pengukuran Debit dengan Venturi Meter

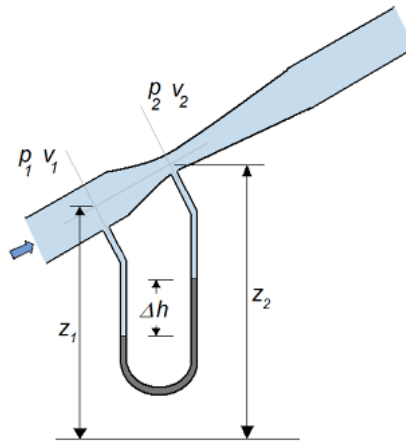
Venturi meter, yang ditemukan oleh insinyur Amerika Clemens Herschel (1842–1930) dan dinamai berdasarkan ilmuwan Italia Giovanni Venturi (1746–1822) atas kontribusinya dalam kajian aliran berbentuk konis, merupakan flowmeter paling akurat di antara ketiganya, meskipun harganya paling mahal. Desain penyempitan dan pelebarannya yang bertahap mencegah terjadinya pemisahan aliran (*flow separation*) dan pusaran, sehingga hanya terjadi kehilangan akibat gesekan pada dinding bagian dalam. Venturi meter menimbulkan kehilangan tekanan yang sangat kecil, sehingga sangat ideal digunakan untuk sistem yang tidak dapat mentoleransi penurunan tekanan besar (Cengel & Cimbala, 2014).



Gambar 10. 3 Venturi Meter

Ketika fluida mengalir melalui suatu penyempitan, sebagaimana dijelaskan oleh persamaan Bernoulli, kecepatan aliran akan meningkat dengan mengorbankan tekanan. Fenomena ini dikenal sebagai efek Venturi (dinamakan menurut fisikawan Italia Giovanni Battista Venturi). Dengan mengukur penurunan tekanan yang terjadi, kecepatan aliran fluida dapat ditentukan. Karena diameter pipa diketahui, maka laju aliran volumetrik dapat dihitung dengan mudah.

Venturi meter dapat dengan mudah diintegrasikan ke dalam sistem perpipaan apa pun. Alat ini memiliki bagian pipa dengan diameter yang sama seperti sistem pipa utama, serta bagian penyempitan (kontraksi) yang lebih pendek dan bagian pelebaran (ekspansi) yang lebih panjang. Sebuah manometer dipasang pada dua titik, yaitu satu sebelum bagian penyempitan dan satu lagi pada titik di mana pipa memiliki diameter terkecil. Misalkan massa jenis fluida dalam manometer dinyatakan sebagai ρ_{man} . Parameter lainnya dapat dilihat pada Gambar 10.4.



Gambar 10. 4 Prinsip Kerja Venturi Meter yang Menunjukkan Hubungan antara Tekanan (p_1 , p_2), Kecepatan Aliran (v_1 , v_2), serta Perbedaan Tinggi Kolom Fluida Manometer (Δh) pada Bagian Penyempitan Pipa

(Sumber: Hewakandamby, 2012)

Venturi Meter merupakan alat pengukur debit aliran fluida yang dirancang untuk memanfaatkan prinsip Bernoulli secara efisien. Secara fisik, alat ini terdiri dari pipa dengan penampang menyempit di tengahnya, yang disebut throat, serta pipa masuk (*upstream*) dan pipa keluar (*downstream*) dengan penampang lebih besar. Perubahan geometri pipa ini menyebabkan perubahan kecepatan dan tekanan fluida saat melewati throat, yang kemudian dapat diukur untuk menghitung debit.

Prinsip kerja Venturi Meter didasarkan pada konversi energi dalam fluida. Ketika fluida bergerak dari penampang besar ke penampang sempit, kecepatannya meningkat akibat hukum kontinuitas, sementara tekanannya menurun sesuai persamaan Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

di mana P_1 dan P_2 adalah tekanan pada penampang besar (*upstream*) dan penampang sempit (*throat*), v_1 dan v_2 adalah kecepatan fluida pada kedua penampang, dan ρ adalah massa jenis fluida. Dari hubungan ini, debit volumetrik (Q) dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}$$

dengan:

- A_1 = luas penampang besar (m^2)
- A_2 = luas penampang throat (m^2)
- P_1, P_2 = tekanan pada penampang besar dan throat (Pa)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

Persamaan ini memperlihatkan hubungan langsung antara perbedaan tekanan dan debit aliran, sehingga pengukuran menjadi lebih presisi dibandingkan orifis. Selain itu, meter Venturi memiliki keuntungan utama berupa kehilangan energi yang relatif lebih kecil, karena bentuk konvergen-divergen pipa mengurangi efek vena contracta yang signifikan pada orifis.

Namun, Venturi Meter juga memiliki keterbatasan. Bentuknya yang lebih besar dan kompleks membuat biaya produksi dan instalasinya lebih tinggi. Selain itu, alat ini membutuhkan ruang pemasangan lebih panjang dibanding orifis, sehingga tidak selalu cocok untuk saluran terbatas atau aplikasi skala kecil.

Dalam praktiknya, Venturi Meter digunakan secara luas dalam sistem irigasi, pengukuran aliran pipa industri, serta penelitian laboratorium fluida. Contoh aplikasinya termasuk:

1. Pengukuran debit pipa industri: memastikan distribusi air, gas, atau bahan cair sesuai kebutuhan proses produksi.
2. Sistem irigasi pertanian: memantau aliran air untuk efisiensi distribusi.
3. Eksperimen laboratorium: mempelajari profil aliran, distribusi tekanan, dan penerapan Bernoulli dalam skala terkendali.

Penggunaan Venturi Meter memerlukan kalibrasi awal dan pemantauan rutin terhadap tekanan dan kondisi pipa, untuk menjaga akurasi pengukuran. Dengan memahami prinsip kerja, persamaan debit, dan karakteristik alat, para insinyur dan ilmuwan dapat memanfaatkan meter Venturi secara optimal dalam berbagai aplikasi teknik dan industri.

D. Perbandingan dan Penerapan Metode Pengukuran Debit Fluida

Setelah memahami prinsip dan rumus pengukuran debit menggunakan orifis dan meter Venturi, penting untuk mengevaluasi perbandingan kedua metode serta memahami cara penerapan yang efektif dalam praktik. Meskipun keduanya didasarkan pada prinsip Bernoulli dan hukum kontinuitas, karakteristik alat, kondisi aliran, dan sifat fluida memengaruhi hasil pengukuran serta akurasi penghitungan debit.

Perbandingan metode dapat dilihat dari beberapa aspek. Pertama, kondisi aliran: pada aliran laminar, kedua alat dapat menghasilkan pengukuran yang cukup akurat, namun meter Venturi lebih stabil karena distribusi tekanan lebih merata dan kehilangan energi lebih kecil. Pada aliran turbulen, orifis lebih sensitif terhadap fluktuasi kecepatan dan turbulensi, sehingga koefisien debit (C_{dC_dCd}) harus diperhitungkan secara cermat. Meter Venturi, dengan profil konvergen-divergen, mampu mengurangi efek vena contracta dan turbulensi, sehingga presisinya lebih tinggi meskipun biaya dan ruang pemasangan lebih besar.

Kedua, pengaruh sifat fluida: viskositas, densitas, dan tegangan permukaan dapat memengaruhi debit nyata. Fluida kental menimbulkan gesekan internal yang lebih besar, sehingga debit melalui orifis cenderung lebih rendah daripada perhitungan ideal. Densitas fluida berperan penting dalam hubungan tekanan dan kecepatan, sedangkan tegangan permukaan dan efek kapilaritas dapat memengaruhi aliran dalam saluran kecil atau sistem mikro. Dalam meter Venturi, efek ini lebih terkendali karena desain alat yang meminimalkan penyempitan aliran ekstrem.

Praktik pengukuran debit memerlukan perhatian pada instalasi, kalibrasi, dan interpretasi data. Orifis harus dipasang dengan permukaan upstream dan downstream cukup panjang agar aliran stabil. Meter Venturi membutuhkan pemasangan yang presisi dan perawatan rutin untuk memastikan tidak ada sedimentasi atau korosi yang memengaruhi pembacaan tekanan. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap metode standar atau aliran referensi. Interpretasi hasil harus memperhitungkan faktor koreksi, kondisi

aliran, dan sifat fluida agar debit yang diperoleh mendekati nilai nyata.

Contoh aplikasi nyata menunjukkan perbedaan penerapan kedua metode. Dalam pengukuran debit air keluar dari tangki reservoir, orifis sering digunakan karena mudah dipasang dan cukup akurat untuk skala kecil hingga menengah. Meter Venturi lebih sering digunakan dalam pipa industri besar atau sistem irigasi di mana kehilangan energi harus diminimalkan dan presisi tinggi diperlukan. Selain itu, pengukuran debit menggunakan Venturi cocok untuk laboratorium dan penelitian, terutama ketika ingin mempelajari distribusi tekanan dan profil kecepatan secara detail.

Rekomendasi penggunaannya tergantung pada skala, presisi, dan efisiensi energi:

- Orifis cocok untuk instalasi sederhana, biaya rendah, dan aliran dengan toleransi fluktuasi lebih tinggi.
- Meter Venturi lebih tepat untuk aliran besar, presisi tinggi, dan aplikasi industri atau penelitian yang memerlukan minimisasi kehilangan energi.

Dengan memahami perbandingan dan penerapan kedua metode, pengguna dapat memilih teknik pengukuran debit yang sesuai dengan kebutuhan praktis maupun teoritis. Integrasi konsep Bernoulli, tekanan hidrostatik, dan faktor properti fluida menjadikan pengukuran debit lebih akurat, efektif, dan relevan untuk berbagai aplikasi teknik dan industri modern.

BAB 11

PENGUKURAN DEBIT ALIRAN FLUIDA MENGGUNAKAN BENDUNG (*WEIR*)

A. Konsep Dasar Bendung dan Aliran Fluida

Bendung atau *weir* merupakan salah satu alat pengukur debit aliran fluida pada saluran terbuka yang banyak digunakan dalam bidang hidrologi, irigasi, pengelolaan sungai, dan rekayasa sipil. Alat ini memanfaatkan prinsip fluida mengalir melewati ambang sehingga tinggi muka air di atas bendung dapat dihubungkan dengan debit aliran yang melintas. Secara sederhana, bendung bekerja dengan menimbulkan hambatan parsial pada aliran, sehingga fluida harus melewati ambang bendung dan kecepatan serta tekanan fluida berubah sesuai hukum energi fluida.

Secara fungsional, bendung memiliki beberapa tujuan utama. Pertama, sebagai pengukur debit aliran, bendung memungkinkan perhitungan aliran melalui saluran terbuka secara relatif akurat dan sederhana. Kedua, bendung digunakan sebagai kontrol aliran, untuk menahan atau menyesuaikan jumlah fluida yang mengalir, misalnya pada sistem irigasi sawah agar distribusi air merata. Ketiga, bendung dapat berfungsi sebagai alat monitoring aliran sungai atau kanal, sehingga perubahan debit akibat hujan, pasang surut, atau variasi inflow dapat dipantau secara kontinu.

Terdapat beberapa jenis bendung yang umum digunakan, masing-masing dengan karakteristik hidraulik berbeda. Bendung segi empat (*rectangular weir*) memiliki ambang lurus dan lebar seragam, sehingga mudah dipasang dan dihitung. Bendung V (*triangular weir*) memiliki puncak berbentuk segitiga, sensitif terhadap debit kecil, dan akurat untuk aliran rendah. Bendung Parshall merupakan desain modern yang mengoptimalkan distribusi tekanan dan energi, sering digunakan dalam sistem industri atau saluran besar. Pemilihan jenis bendung bergantung pada lebar saluran, tinggi aliran, presisi pengukuran yang diinginkan, dan sifat fluida.

Konsep utama dalam pengukuran debit dengan bendung adalah hubungan antara tinggi muka air (H) di atas ambang bendung dan debit aliran (Q). Semakin tinggi muka air, semakin besar laju aliran yang melewati bendung, dengan hubungan nonlinier yang mengikuti hukum Bernoulli dan kontinuitas fluida. Perhitungan debit ideal biasanya menggunakan rumus:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH^3/2}$$

di mana:

- Q = debit aliran (m^3/s)
- C_d = koefisien debit, yang bergantung pada jenis bendung dan kondisi aliran
- L = lebar bendung (m)
- H = tinggi muka air di atas ambang bendung (m)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Rumus ini menekankan bahwa debit tidak hanya bergantung pada tinggi air, tetapi juga pada karakteristik

geometris bendung dan perilaku fluida saat melewati ambang. Faktor-faktor seperti vena contracta, gesekan dinding saluran, dan turbulensi dapat memengaruhi nilai nyata debit, sehingga diperlukan koefisien koreksi (C_d) agar pengukuran lebih akurat.

Bendung tidak hanya memberikan data debit, tetapi juga memungkinkan analisis hidraulik lebih lanjut, seperti distribusi tekanan, profil kecepatan, dan energi potensial fluida dalam saluran terbuka. Oleh karena itu, pemahaman konsep dasar bendung sangat penting bagi insinyur hidrolika, ahli irigasi, dan peneliti mekanika fluida, agar desain dan pengukuran debit aliran dapat dilakukan dengan presisi dan efisiensi tinggi.

B. Jenis-jenis Bendung dan Karakteristiknya

Bendung atau *weir* hadir dalam berbagai bentuk dan desain, masing-masing dengan karakteristik hidraulik unik yang menentukan akurasi, sensitivitas terhadap aliran, dan aplikasi praktis. Pemahaman tentang jenis bendung sangat penting untuk menentukan alat yang tepat sesuai kebutuhan pengukuran debit pada saluran terbuka, irigasi, atau sistem industri.

1. Bendung Segi Empat (Rectangular Weir)

Bendung ini merupakan tipe paling sederhana, dengan ambang lurus dan lebar konstan. Karakteristiknya memudahkan pemasangan dan perhitungan debit, sehingga sering digunakan pada saluran dengan lebar menengah. Debit aliran melalui bendung segi empat dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH^{3/2}}$$

di mana:

- Q = debit aliran (m^3/s)
- C_d = koefisien debit, yang bergantung pada jenis bendung dan kondisi aliran
- L = lebar bendung (m)
- H = tinggi muka air di atas ambang bendung (m)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Bendung segi empat efektif untuk aliran sedang hingga besar, namun kurang sensitif terhadap debit kecil, karena perubahan tinggi muka air relatif kecil memengaruhi debit secara terbatas.

2. Bendung V (*Triangular Weir/Cipolletti V-Weir*)

Bendung V memiliki puncak berbentuk segitiga, sehingga area aliran menyempit di arah ambang. Tipe ini sangat sensitif terhadap aliran kecil, sehingga akurat untuk pengukuran debit rendah atau variabel. Debit aliran pada bendung V dihitung dengan rumus:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan(\theta/2) \sqrt{2gH^{5/2}}$$

di mana:

- θ = sudut puncak bendung (derajat)
- H = tinggi muka air di atas ambang bendung (m)
- C_d = koefisien debit (biasanya 0,58–0,61)

Karakteristik eksponensial $H^{5/2}$ membuat bendung V lebih responsif terhadap perubahan kecil muka air, sehingga ideal untuk saluran kecil atau monitoring aliran sungai.

3. Bendung Parshall

Bendung Parshall merupakan desain modern yang menggabungkan efisiensi energi dan kontrol aliran. Alat ini memiliki profil konvergen-divergen yang mengurangi turbulensi dan kehilangan energi, sehingga menghasilkan pengukuran debit yang lebih presisi dibanding bendung sederhana. Debit melalui bendung Parshall umumnya dihitung menggunakan rumus empiris:

$$Q = KH^n$$

di mana:

- H = tinggi muka air upstream bendung (m)
- K, n = konstanta empiris yang bergantung pada ukuran bendung dan kategori aliran
- Koefisien K biasanya ditentukan dari tabel atau kalibrasi laboratorium

Bendung Parshall cocok untuk aliran besar, industri, dan sistem irigasi skala luas, karena mampu menstabilkan profil kecepatan dan tekanan serta meminimalkan efek vena contracta.

Faktor-faktor Pemilihan Bendung

Pemilihan jenis bendung harus memperhatikan beberapa parameter:

- Lebar saluran dan tinggi aliran
- Sifat fluida, termasuk viskositas dan densitas
- Akurasi pengukuran yang dibutuhkan
- Efisiensi energi dan kehilangan tekanan di sekitar ambang bendung

Selain itu, distribusi kecepatan fluida dan profil aliran di ambang bendung berbeda-beda pada tiap jenis. Bendung segi empat cenderung menghasilkan profil aliran lebih seragam, sedangkan bendung V menghasilkan profil cepat di pusat dan lambat di pinggir, dan bendung Parshall mendistribusikan kecepatan secara lebih merata di seluruh penampang aliran.

C. Perhitungan Debit Bendung dan Penerapan Koefisien Koreksi

Perhitungan debit aliran melalui bendung merupakan salah satu aspek penting dalam hidrolika terapan. Debit ideal yang dihitung secara teoritis hanya mempertimbangkan tinggi muka air dan geometri bendung, tanpa memperhitungkan kondisi nyata aliran yang dipengaruhi oleh fenomena hidraulik seperti vena contracta, turbulensi, gesekan dinding, dan variasi muka air upstream. Oleh karena itu, agar debit yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi nyata, digunakan koefisien debit (C_d) sebagai faktor koreksi.

1. Debit Ideal dan Debit Nyata

Debit ideal (Q_{ideal}) dihitung berdasarkan rumus-rumus yang sesuai dengan bentuk bendung, misalnya bendung segi empat, bendung V, atau bendung Parshall. Rumus ini memperhitungkan tinggi muka air (H) dan geometri bendung, namun tidak memperhitungkan kehilangan energi akibat efek hidraulik nyata. Untuk memperoleh debit nyata (Q_{nyata}), maka debit ideal dikalikan dengan koefisien debit:

$$Q_{nyata} = C_d \times Q_{ideal}$$

Koefisien debit (C_d) diperoleh melalui kalibrasi eksperimen, literatur hidraulika, atau panduan resmi, dan nilainya bervariasi tergantung pada:

- Jenis bendung (segi empat, V, Parshall)
- Tinggi muka air di atas ambang bendung
- Kondisi aliran dan saluran, termasuk viskositas fluida, turbulensi, dan bentuk penampang saluran *upstream*

2. Faktor Koreksi yang Memengaruhi Debit

Beberapa faktor koreksi utama yang memengaruhi debit nyata adalah sebagai berikut:

a. Vena Contracta

Merupakan penyempitan aliran tepat di bawah ambang bendung. Penyempitan ini menyebabkan kecepatan lokal lebih tinggi, sehingga debit efektif berkurang dibandingkan debit ideal.

b. Turbulensi dan Gelombang

Fluktuasi kecepatan akibat turbulensi atau gelombang di muka bendung dapat menyebabkan variasi debit. Koefisien debit memperhitungkan efek ini agar debit nyata mendekati kondisi sebenarnya.

c. Gesekan Dinding Saluran

Interaksi fluida dengan dinding saluran menimbulkan kehilangan energi yang menurunkan kecepatan aliran dan debit. Faktor koreksi dalam C_d/C_{dC} mencakup pengaruh gesekan ini.

d. Variasi Muka Air *Upstream*

Perubahan muka air akibat pasang surut atau fluktuasi inflow dapat mengubah tinggi efektif muka air di bendung. Koefisien debit yang tepat dapat menyesuaikan debit dengan kondisi ini.

3. Contoh Perhitungan Debit Bendung dengan Koreksi**a. Bendung Segi Empat**

- Lebar bendung: $L = 1,5 \text{ m}$
- Tinggi muka air: $H = 0,6 \text{ m}$
- Koefisien debit: $C_d = 0,61$

Langkah perhitungan:

$$Q_{nyata} = C_d \times Q_{ideal} \approx 0,61 \times Q_{ideal} \approx 0,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

b. Bendung V (*Triangular Weir*)

- Sudut puncak: $\theta = 90^\circ$
- Tinggi muka air: $H = 0,4 \text{ m}$
- Koefisien debit: $C_d = 0,60$

$$Q_{nyata} = 0,60 \times Q_{ideal} \approx 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$$

4. Pentingnya Faktor Koreksi

Faktor koreksi melalui koefisien debit sangat penting agar hasil perhitungan debit mencerminkan kondisi nyata aliran. Dengan mempertimbangkan koreksi ini:

- Perencanaan irigasi dapat dilakukan dengan presisi tinggi, memastikan distribusi air merata.
- Kapasitas saluran drainase dan sungai dapat dievaluasi untuk mencegah banjir.

- Data debit dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya air dan studi hidrolika.

Dengan demikian, pendekatan ini menekankan bahwa perhitungan debit bendung bukan hanya penggunaan rumus, tetapi juga pemahaman terhadap efek hidraulik nyata, sehingga debit yang diperoleh dapat digunakan secara praktis dan akurat.

E. Penerapan Bendung dalam Sistem Irigasi dan Monitoring Aliran

Bendung merupakan salah satu alat ukur debit aliran yang banyak digunakan dalam sistem irigasi, pengelolaan sungai, dan monitoring aliran terbuka. Fungsi bendung tidak hanya terbatas pada pengukuran debit, tetapi juga berperan dalam mengendalikan distribusi air, mengatur pasokan irigasi, serta memantau kondisi hidrolik saluran. Subbab ini membahas secara mendalam penerapan bendung dalam konteks hidrolika praktis.

1. Penggunaan Bendung dalam Sistem Irigasi

Dalam sistem irigasi, bendung digunakan untuk mengukur dan mengontrol aliran air yang masuk ke sawah atau lahan pertanian. Dengan mengetahui debit nyata melalui bendung, pengelola irigasi dapat menyesuaikan distribusi air sehingga setiap petak lahan menerima pasokan sesuai kebutuhan tanaman. Beberapa penerapan spesifik meliputi:

- Pengaturan aliran utama dan cabang pada saluran irigasi terbuka.
- Pengendalian banjir lokal dengan menahan atau melepas air melalui bendung sesuai kapasitas saluran.

- Perhitungan kebutuhan air tanam berdasarkan debit nyata yang diukur, sehingga efisiensi penggunaan air meningkat.

2. Monitoring Debit secara Kontinu

Selain untuk pengaturan irigasi, bendung juga digunakan sebagai instrumen monitoring aliran secara terus-menerus. Dalam hal ini, bendung dikombinasikan dengan pengukuran tinggi muka air upstream menggunakan sensor air digital atau transduser tekanan. Data tinggi air ini kemudian dikonversi menjadi debit nyata melalui koefisien debit (C_d). Monitoring ini memungkinkan:

- Deteksi fluktuasi aliran akibat curah hujan, pasang surut, atau variasi inflow.
- Pemantauan debit secara real-time untuk keperluan manajemen air dan peringatan banjir.
- Evaluasi kinerja bendung dan sistem distribusi irigasi untuk perbaikan desain atau operasional.

3. Integrasi Bendung dengan Sistem Digital

Dengan kemajuan teknologi, bendung modern sering diintegrasikan dengan sistem monitoring digital dan jaringan sensor. Penerapan ini memungkinkan:

- Pengukuran debit secara otomatis dengan frekuensi tinggi, tanpa perlu observasi manual.
- Penyimpanan data secara kontinu untuk analisis hidrolika jangka panjang.
- Integrasi dengan sistem manajemen irigasi pintar, yang dapat mengatur aliran berdasarkan data *real-time*, ramalan curah hujan, atau permintaan air tanaman.

4. Perbandingan Efektivitas Bendung dengan Alat Ukur Lain

Bendung memiliki beberapa keunggulan dibandingkan alat ukur lain seperti orifis atau meter Venturi, terutama pada aliran terbuka:

- Pemasangan relatif sederhana dan murah.
- Tidak membutuhkan energi tambahan atau sistem pompa untuk mengukur debit.
- Memberikan pengukuran stabil pada rentang debit menengah hingga besar.

Namun, bendung juga memiliki keterbatasan, misalnya:

- Sensitivitas terhadap gelombang dan turbulensi, yang memerlukan koefisien debit yang tepat.
- Kurang efektif pada aliran dengan kedalaman sangat rendah atau saluran sempit, di mana orifis atau meter Venturi bisa lebih presisi.

BAB 12

KESERUPAAN DAN PENERAPAN DIMENSIONAL PADA ALIRAN FLUIDA

A. Konsep Keserupaan pada Sistem Fluida

Keserupaan, atau *similarity*, merupakan prinsip fundamental dalam mekanika fluida yang memungkinkan penerapan hasil percobaan model skala kecil untuk memprediksi perilaku sistem fluida yang lebih besar atau nyata. Konsep ini penting karena dalam praktik hidrolika atau rekayasa fluida, seringkali sulit atau tidak praktis melakukan eksperimen pada skala penuh, sehingga digunakan model skala dengan kondisi yang mencerminkan fenomena sebenarnya.

Prinsip keserupaan dibagi menjadi tiga kategori utama:

1. Keserupaan Geometrik

- Keserupaan geometric menekankan bahwa semua dimensi linear pada model dan sistem nyata harus memiliki perbandingan proporsional.
- Rasio skala linear, luas, dan volumetrik harus konsisten sehingga bentuk saluran, bendung, pipa, atau waduk dalam model merepresentasikan sistem nyata secara akurat.
- Contoh penerapan: dalam percobaan bendung, lebar, tinggi, dan panjang saluran model harus diskalakan secara proporsional terhadap bendung nyata untuk

memastikan aliran model serupa dengan aliran sungai atau saluran sesungguhnya.

2. Keserupaan Kinematis

- Keserupaan kinematis berfokus pada kecepatan, percepatan, dan pola aliran antara model dan sistem nyata.
- Parameter nondimensional seperti bilangan Reynolds (Re) digunakan untuk mengevaluasi apakah aliran pada model mengikuti aliran nyata dalam hal turbulensi dan distribusi kecepatan.
- Contoh praktis: aliran air pada pipa skala kecil harus disesuaikan kecepatannya agar garis arus dan pola vortex sama dengan pipa ukuran nyata.

3. Keserupaan Dinamis

- Keserupaan dinamis memastikan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada fluida (gaya inersia, gravitasi, viskositas, dan tekanan) di model dan sistem nyata memiliki perbandingan yang sama.
- Ini dicapai melalui bilangan nondimensional lain seperti Froude (Fr) dan Euler (Eu), yang memungkinkan prediksi fenomena seperti gelombang permukaan, gaya tekan, dan debit aliran.

4. Pentingnya Keserupaan dalam Percobaan Model

Keserupaan memungkinkan para insinyur dan peneliti:

- Melakukan percobaan skala kecil dengan biaya lebih rendah dan risiko lebih kecil.
- Memprediksi perilaku sistem nyata, termasuk aliran melalui bendung, saluran terbuka, pipa, dan struktur hidrolik lainnya.

- Menyederhanakan perhitungan karena parameter nondimensional dapat digunakan untuk menghubungkan model dan sistem nyata.

5. Contoh Penerapan

- Bendung dan saluran terbuka: Model skala bendung digunakan untuk menentukan debit, tinggi muka air, dan koefisien debit, sehingga hasil dapat diaplikasikan pada bendung nyata.
- Pipa dan saluran tertutup: Model skala pipa dengan rasio diameter dan kecepatan yang tepat dapat memprediksi distribusi tekanan dan kehilangan head pada sistem nyata.
- Waduk dan kolam: Pembuatan model skala memungkinkan evaluasi gelombang, turbulensi, dan pola aliran sebelum konstruksi fisik dilakukan.

Keserupaan menjadi landasan penting dalam rekayasa hidrolika dan eksperimental mekanika fluida, karena tanpa prinsip ini, hasil percobaan model tidak dapat diandalkan untuk merancang atau memprediksi perilaku sistem nyata secara akurat. Dengan memahami dan menerapkan keserupaan geometric, kinematis, dan dinamis, seorang insinyur dapat memastikan bahwa model skala benar-benar mencerminkan fenomena aliran fluida pada sistem sesungguhnya.

B. Keserupaan Geometrik dan Rasio Skala

Keserupaan geometrik merupakan salah satu prinsip utama dalam perancangan model skala pada mekanika fluida. Prinsip ini menekankan bahwa bentuk dan proporsi semua dimensi model harus secara tepat mencerminkan sistem nyata. Tanpa keserupaan geometrik, hasil percobaan model

tidak dapat dijadikan acuan untuk memprediksi perilaku fluida pada sistem yang sesungguhnya.

1. Prinsip Dasar Kekerupaan Geometrik

Kekerupaan geometrik berarti:

- Perbandingan panjang, lebar, dan tinggi pada model sama dengan perbandingan pada sistem nyata.
- Semua bentuk elemen hidrolik, seperti bendung, saluran, kolam, atau pipa, harus proporsional dan serupa dengan aslinya.
- Sudut, radius lengkung, dan rasio dimensi lainnya harus dipertahankan agar alur aliran dan distribusi kecepatan di model sama dengan sistem nyata.

Kekerupaan geometrik memastikan bahwa fenomena visual dan pola aliran dapat diamati pada model skala dan diterapkan pada desain nyata.

2. Rasio Skala Linear, Luas, dan Volumetrik

Rasio skala adalah perbandingan antara dimensi model dengan dimensi sistem nyata:

a. Rasio Linear (L_r)

$$L_r = \frac{L_m}{L_s}$$

Di mana L_m adalah dimensi linear model, dan L_s adalah dimensi sistem nyata. Rasio ini menjadi dasar untuk menurunkan rasio luas dan volumetrik.

b. Rasio Luas (A_r)

$$A_r = L_r^2$$

Digunakan untuk skala permukaan, seperti luas saluran atau luas permukaan bendung.

c. Rasio Volumetrik (V_r)

$$V_r = L_r^3$$

Digunakan untuk menghitung volume air dalam model skala dibandingkan dengan sistem nyata.

3. Penyesuaian Dimensi Model

Dalam praktik, penyesuaian dimensi model tidak hanya mempertimbangkan panjang, lebar, dan tinggi, tetapi juga:

- Radius lengkung bendung atau saluran agar distribusi aliran dan energi fluida serupa dengan sistem nyata.
- Kedalaman aliran pada model yang disesuaikan dengan rasio skala, untuk menjaga keserupaan kinematis dan dinamis.
- Perbandingan tinggi jatuh (*head*), sehingga gaya gravitasi dan gaya inersia tetap proporsional antara model dan sistem nyata.

4. Contoh Perhitungan Rasio Skala

Misalkan sebuah bendung nyata memiliki panjang $L_s = 10 \text{ m}$, lebar $B_s = 2 \text{ m}$, dan tinggi $H_s = 3 \text{ m}$. Jika dibuat model skala dengan rasio linear $L_r = 1 : 10$, maka:

- Panjang model:

$$L_m = L_r \cdot L_s = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ m}$$

- Lebar model:

$$B_m = L_r \cdot B_s = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ m}$$

- Tinggi model:

$$H_m = L_r \cdot H_s = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ m}$$

Selanjutnya, rasio luas:

$$A_r = L_r^2 = (0,1)^2 = 0,01$$

Dan rasio volumetrik:

$$V_r = L_r^3 = (0,1)^3 = 0,001$$

Dengan perhitungan ini, debit model dan energi aliran dapat dihitung menggunakan faktor koreksi skala sehingga eksperimen model tetap relevan dengan sistem nyata.

C. Kecerupaan Kinematis

Kecerupaan kinematis (*kinematic similarity*) adalah kondisi ketika model dan prototipe (objek nyata) memiliki pola gerakan fluida yang serupa. Artinya, lintasan partikel fluida, distribusi kecepatan, dan garis arus yang terbentuk dalam model memiliki bentuk dan sifat yang sama dengan sistem nyata. Dengan kata lain, jika kita membandingkan aliran fluida dalam model berskala dengan prototipe sebenarnya, maka bentuk aliran, arah, serta perbandingan kecepatan akan tetap sama meskipun dimensi dan besarnya berbeda.

Dalam kajian mekanika fluida, kecerupaan kinematis menjadi penting untuk memastikan bahwa data hasil percobaan model laboratorium dapat diandalkan sebagai representasi dari kondisi yang sesungguhnya. Hal ini memungkinkan seorang peneliti atau insinyur untuk melakukan percobaan dalam skala kecil tanpa harus membangun sistem dalam ukuran penuh.

1. Prinsip Dasar Kekerupaan Kinematis

Kekerupaan kinematis dapat dicapai apabila terdapat kesamaan dalam rasio kecepatan, waktu, dan percepatan antara model dan prototipe. Hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{t_p}{t_m}$$

dengan:

- V_m, V_p = kecepatan fluida pada model dan prototipe,
- L_m, L_p = panjang karakteristik pada model dan prototipe,
- t_m, t_p = skala waktu pada model dan prototipe.

Rumus ini menunjukkan bahwa perbandingan kecepatan antara model dan prototipe harus konsisten dengan rasio panjang serta waktu agar pola alir tetap serupa.

2. Bilangan Reynolds sebagai Indikator Kekerupaan Kinematis

Salah satu parameter utama untuk menentukan kekerupaan kinematis adalah bilangan Reynolds (Re), yang mendeskripsikan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos dalam fluida.

Rumus umum bilangan Reynolds adalah:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

atau dalam bentuk lain:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

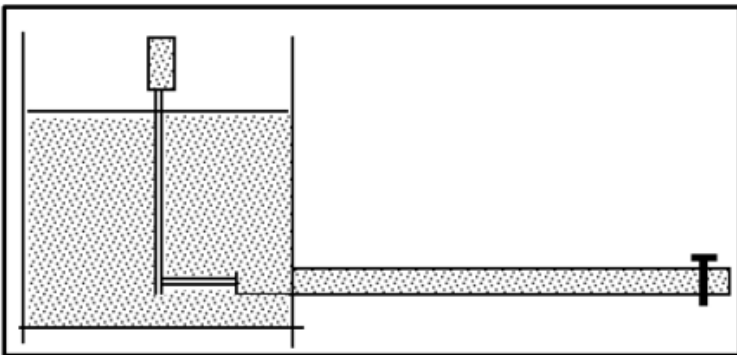
dengan:

- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3),
- V = kecepatan karakteristik aliran (m/s),
- L = panjang karakteristik (m),
- μ = viskositas dinamis fluida (Ns/m^2),
- $\nu = \mu/\rho$ = viskositas kinematis (m^2/s).

Agar suatu aliran pada model serupa secara kinematis dengan prototipe, maka bilangan Reynolds antara keduanya harus sama:

$$Re_m = Re_p$$

Jika syarat ini terpenuhi, maka pola aliran, distribusi kecepatan, dan formasi garis arus pada model akan identik dengan prototipe, meskipun terjadi perbedaan ukuran dan skala.



Gambar 12. 1 Percobaan Osborn Reynold

3. Makna Kesamaan Bilangan Reynolds

- Jika Re rendah (kecil), aliran cenderung laminar, artinya partikel fluida bergerak teratur dan sejajar.
- Jika Re tinggi, aliran cenderung turbulen, ditandai dengan gerakan partikel yang acak, pusaran, dan fluktuasi kecepatan.
- Dengan menyamakan Re , maka kondisi aliran laminar atau turbulen pada model akan sama dengan kondisi aliran pada prototipe.

4. Contoh Penerapan

Misalnya dilakukan pengujian pada model kapal yang berukuran 1:20 dari ukuran prototipe. Jika kapal asli bergerak dengan kecepatan 10 m/s pada air laut ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), maka untuk mencapai keserupaan kinematis, kecepatan kapal model (V_m) harus dihitung agar nilai bilangan Reynolds pada model sama dengan pada prototipe.

Prototipe:

$$Re_p = \frac{V_p \cdot L_p}{\nu}$$

Model:

$$Re_m = \frac{V_m \cdot L_m}{\nu}$$

Dengan syarat:

$$Re_m = Re_p$$

maka kecepatan V_m dapat ditentukan berdasarkan skala panjang L_m/L_p .

D. Penerapan Dimensional dan Faktor Skala pada Aliran Fluida

Penerapan analisis dimensional dalam mekanika fluida memiliki peranan yang sangat penting, terutama dalam menghubungkan antara fenomena aliran pada model berskala kecil dengan kondisi nyata pada prototipe. Dengan prinsip ini, sebuah masalah yang kompleks dapat disederhanakan ke dalam bentuk hubungan antar bilangan tak berdimensi, sehingga berbagai variabel yang memengaruhi aliran dapat dianalisis secara sistematis.

Dalam praktiknya, penerapan dimensional sering digunakan untuk keperluan eksperimen model. Misalnya, pada perancangan kapal, bendungan, jembatan, maupun saluran air, pengujian langsung pada prototipe berukuran penuh sangat sulit dilakukan karena keterbatasan biaya, waktu, dan risiko teknis. Oleh karena itu, digunakan model berskala yang diuji dalam laboratorium, dengan tujuan memperoleh gambaran perilaku aliran fluida yang sesuai dengan kondisi nyata.

Agar hasil pengujian model dapat mewakili prototipe, diperlukan prinsip similaritas yang terdiri dari keserupaan geometris, kinematis, dan dinamis. Keserupaan ini hanya dapat dicapai bila nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, seperti Reynolds, Froude, Weber, atau Euler, dibuat sama antara model dan prototipe. Dengan demikian, pola aliran, distribusi tekanan, serta interaksi gaya-gaya pada fluida akan tetap konsisten meskipun ukuran fisiknya berbeda.

Faktor Skala dalam Penerapan Dimensional

Faktor skala adalah rasio yang menunjukkan hubungan antara dimensi model dan prototipe. Beberapa faktor skala

yang sering digunakan dalam penerapan aliran fluida antara lain:

1. Skala Panjang (λL)

Merupakan rasio panjang karakteristik model terhadap prototipe. Jika prototipe memiliki panjang 10 m, sementara model hanya 0,5 m, maka skala panjang adalah 1:20.

2. Skala Kecepatan (λV)

Menunjukkan hubungan antara kecepatan aliran dalam model dan prototipe. Skala ini bergantung pada bilangan tak berdimensi yang dijaga sama, misalnya Froude untuk aliran yang dipengaruhi gravitasi atau Reynolds untuk aliran dalam pipa.

3. Skala Waktu (λT)

Berkaitan dengan kecepatan dan panjang, yang menunjukkan waktu yang diperlukan fluida untuk melewati jarak tertentu.

4. Skala Gaya (λF)

Digunakan untuk menghubungkan gaya fluida yang bekerja pada model dengan gaya yang terjadi pada prototipe. Hal ini penting, misalnya dalam mengukur gaya hambat pada kapal atau gaya tekan air pada bangunan hidrolis.

Contoh Penerapan

Sebagai ilustrasi, sebuah model bendung berskala 1:50 diuji di laboratorium untuk mempelajari debit aliran yang melewati mercu. Dari hasil pengujian, diperoleh kecepatan rata-rata pada model sebesar 0,4 m/s. Agar dapat mengetahui kondisi pada prototipe sebenarnya, maka

kecepatan prototipe harus dihitung dengan mempertahankan kesamaan bilangan tak berdimensi yang sesuai (misalnya Froude untuk aliran dengan dominasi gravitasi). Dengan demikian, kecepatan prototipe akan jauh lebih besar dibandingkan kecepatan model, sesuai dengan faktor skala yang berlaku.

Melalui pendekatan ini, analisis dimensional dan faktor skala memungkinkan peneliti atau insinyur untuk menghemat biaya, mempercepat proses uji coba, serta mengurangi risiko kegagalan pada pembangunan struktur hidrolik atau transportasi air.

BAB 13

ALIRAN STEDI DENGAN PERSAMAAN NAVIER-STOKES

A. Konsep Dasar Aliran Stedi dan Asumsi Navier-Stokes

Aliran fluida dalam mekanika fluida dapat diklasifikasikan berdasarkan bagaimana sifat-sifatnya berubah terhadap waktu. Salah satu jenis aliran yang sangat penting untuk dipahami adalah aliran stedi (*steady flow*). Aliran dikatakan stedi apabila variabel-variabel aliran, seperti kecepatan, tekanan, kerapatan, maupun sifat fisik lainnya, tidak mengalami perubahan terhadap waktu pada suatu titik tertentu dalam ruang. Dengan kata lain, meskipun fluida terus bergerak dan mengalir, kondisi pada titik yang diamati akan tampak konstan sepanjang waktu. Hal ini berbeda dengan aliran tak stedi (*unsteady flow*), di mana sifat-sifat aliran berubah seiring berjalannya waktu.

Sebagai ilustrasi, aliran air dalam sebuah pipa dengan debit yang konstan dari waktu ke waktu dapat dianggap sebagai aliran stedi, sebab kecepatan dan tekanan fluida pada titik tertentu di dalam pipa tetap sama setiap saat. Namun, jika debitnya berubah-ubah, maka kondisi ini masuk ke dalam kategori aliran tak stedi. Konsep aliran stedi ini penting karena banyak perhitungan dan pemodelan fluida dalam teknik maupun sains yang lebih mudah dilakukan dengan asumsi bahwa aliran bersifat stedi.

Pemahaman tentang aliran stedi sangat erat kaitannya dengan penggunaan persamaan Navier-Stokes, yaitu persamaan dasar dalam mekanika fluida yang menggambarkan gerakan fluida Newtonian. Persamaan ini pada dasarnya merupakan hasil penerapan hukum kedua Newton pada elemen fluida dengan mempertimbangkan gaya-gaya yang bekerja di dalamnya, termasuk gaya tekanan, gaya gesekan akibat viskositas, serta gaya tubuh (seperti gravitasi).

Untuk dapat menerapkan persamaan Navier-Stokes dalam kondisi aliran stedi, terdapat beberapa asumsi penting yang harus dipahami, yaitu:

1. Fluida Newtonian

Persamaan Navier-Stokes disusun dengan asumsi bahwa fluida yang dianalisis adalah fluida Newtonian. Fluida jenis ini memiliki hubungan linier antara tegangan geser dan laju regangan geser. Artinya, viskositas fluida bernilai konstan dan tidak bergantung pada laju alirannya. Contoh fluida Newtonian antara lain air, udara, dan sebagian besar gas serta cairan biasa. Namun, fluida non-Newtonian seperti darah, pasta gigi, atau lumpur tidak sepenuhnya mengikuti asumsi ini.

2. Inkompresibilitas

Dalam banyak kasus, fluida dianggap tidak dapat dimampatkan (*incompressible*). Artinya, kerapatan fluida dianggap konstan meskipun terjadi perubahan tekanan. Asumsi ini sangat mempermudah analisis, terutama pada aliran cairan (*liquid*) yang pada dasarnya memiliki tingkat kompresibilitas sangat rendah. Untuk gas, asumsi

inkompresibilitas hanya berlaku jika perubahan tekanan dan suhu yang terjadi relatif kecil sehingga kerapatan dapat dianggap tetap.

3. Batasan Viskositas

Persamaan Navier-Stokes juga mengasumsikan bahwa fluida memiliki viskositas tertentu yang bersifat homogen dan isotropik, yaitu sama ke segala arah. Viskositas inilah yang menjadi penyebab timbulnya gaya gesek internal di dalam fluida. Jika viskositas diabaikan, maka persamaan akan menyederhana menjadi persamaan Euler, yang sering digunakan untuk menganalisis aliran ideal (*inviscid flow*).

4. Kondisi Aliran Stedi

Dalam aliran stedi, turunan waktu dari setiap variabel aliran sama dengan nol. Misalnya, $\partial V / \partial t = 0$ untuk kecepatan aliran pada titik tertentu. Hal ini menandakan bahwa meskipun fluida terus bergerak, sifat-sifat alirannya tetap tidak berubah terhadap waktu. Asumsi ini menjadi penyederhanaan yang sangat signifikan dalam menyelesaikan persamaan Navier-Stokes karena mengurangi kompleksitas perhitungan.

Penerapan asumsi-asumsi tersebut bukanlah sekadar penyederhanaan tanpa dasar, melainkan strategi analitis agar sistem fluida yang kompleks dapat dipelajari dan dimodelkan secara matematis. Dengan adanya asumsi aliran stedi, persamaan Navier-Stokes dapat diselesaikan lebih mudah dan memberikan hasil yang cukup akurat dalam berbagai kasus nyata, seperti aliran dalam pipa,

aliran di sekitar sayap pesawat, atau distribusi tekanan pada sistem hidrolik.

B. Persamaan Navier-Stokes dalam Aliran Stedi

Persamaan Navier-Stokes merupakan salah satu fondasi utama dalam mekanika fluida yang berfungsi untuk menggambarkan perilaku gerak fluida dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Persamaan ini pada dasarnya berakar dari hukum kekekalan momentum Newton, yang menyatakan bahwa laju perubahan momentum sebuah partikel fluida sama dengan jumlah gaya yang bekerja pada partikel tersebut. Dengan menerapkan prinsip ini pada elemen fluida yang sangat kecil, diperoleh bentuk matematis yang dapat digunakan untuk menganalisis berbagai kondisi aliran.

Pada kondisi aliran stedi (*steady flow*), bentuk persamaan Navier-Stokes mengalami penyederhanaan tertentu karena tidak ada perubahan sifat fluida terhadap waktu di titik yang diamati. Dengan demikian, turunan waktu dari variabel aliran dianggap nol, sehingga hanya tersisa pengaruh spasial, yaitu bagaimana kecepatan, tekanan, dan gaya-gaya lainnya berubah terhadap posisi dalam ruang. Hal ini menjadikan persamaan Navier-Stokes pada kondisi stedi lebih mudah digunakan dalam analisis dibandingkan kasus aliran tak stedi.

Secara umum, persamaan Navier-Stokes dalam koordinat kartesian dapat dituliskan untuk masing-masing arah sumbu, yakni arah x , y , dan z . Pada tiap arah, persamaan ini terdiri atas beberapa komponen penting yang masing-masing memiliki makna fisik tersendiri, yaitu:

1. Suku Inersia (*Inertia Term*)

Suku ini merepresentasikan efek perubahan momentum akibat kecepatan fluida. Dalam bentuk matematis, suku inersia muncul sebagai turunan konvektif yang melibatkan kecepatan fluida di setiap arah. Secara fisik, suku inersia menggambarkan kecenderungan fluida untuk mempertahankan geraknya, sesuai dengan hukum kelembaman Newton.

2. Suku Tekanan (*Pressure Term*)

Suku tekanan muncul dari distribusi tekanan dalam fluida. Tekanan ini bekerja pada permukaan elemen fluida dan menjadi salah satu gaya utama yang memengaruhi pergerakan aliran. Gradien tekanan, yaitu perubahan tekanan antar titik dalam fluida, akan mendorong fluida bergerak dari daerah bertekanan tinggi menuju daerah bertekanan rendah.

3. Suku Viskositas (*Viscous Term*)

Suku ini mewakili pengaruh gaya gesekan internal akibat viskositas fluida. Viskositas merupakan sifat yang menggambarkan resistensi fluida terhadap aliran atau deformasi. Dalam persamaan, suku viskositas hadir sebagai turunan kedua kecepatan terhadap ruang, yang secara matematis mirip dengan hukum difusi pada perpindahan panas. Kehadiran suku ini penting dalam menjelaskan fenomena seperti lapisan batas (*boundary layer*) atau kehilangan energi akibat gesekan dalam pipa.

4. Suku Gaya Luar (*External Body Force Term*)

Selain tekanan dan viskositas, elemen fluida juga dapat mengalami gaya dari luar sistem, seperti gaya gravitasi, gaya elektromagnetik, atau gaya sentrifugal pada sistem

berputar. Dalam banyak aplikasi rekayasa, gaya gravitasi adalah yang paling dominan, terutama pada aliran terbuka, aliran atmosfer, atau sistem hidrolik.

Apabila semua komponen ini dikombinasikan, persamaan Navier-Stokes mampu memberikan gambaran yang sangat detail tentang dinamika aliran fluida. Namun, persamaan ini memiliki sifat nonlinier karena adanya suku inersia yang berbentuk perkalian antar variabel kecepatan. Sifat nonlinier inilah yang membuat persamaan Navier-Stokes sering kali sulit untuk diselesaikan secara analitik, kecuali pada kondisi-kondisi khusus yang sederhana. Dalam praktiknya, penyelesaian dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan metode komputasi, yang berkembang menjadi bidang *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Dalam bentuk aliran stedi, persamaan Navier-Stokes memberikan keuntungan analitis karena tidak lagi melibatkan turunan waktu, sehingga fokus hanya pada distribusi spasial dari variabel-variabel aliran. Misalnya, dalam perhitungan aliran pipa berdiameter konstan dengan debit tetap, gradien tekanan dan distribusi kecepatan sepanjang pipa dapat dianalisis dengan lebih sederhana. Hal ini menjadi dasar bagi banyak aplikasi teknik, seperti perhitungan kehilangan tekanan, perancangan sistem perpipaan, atau analisis aliran udara di sekitar permukaan benda.

C. Penyederhanaan Persamaan untuk Kondisi Khusus

Persamaan Navier-Stokes dalam bentuk umumnya sangat kompleks karena mencakup banyak variabel dan komponen diferensial. Oleh karena itu, dalam praktik

teknik, persamaan ini jarang digunakan secara langsung dalam bentuk lengkap. Sebaliknya, para insinyur dan peneliti biasanya melakukan penyederhanaan dengan mempertimbangkan geometri aliran, kondisi batas, serta dominasi gaya tertentu. Penyederhanaan ini tidak hanya mempermudah perhitungan, tetapi juga memungkinkan diperolehnya solusi analitis yang dapat dipakai untuk menjelaskan fenomena aliran dalam kasus nyata.

Beberapa kondisi khusus yang sering dibahas dalam mekanika fluida antara lain:

1. Aliran Satu Dimensi dalam Pipa

Pada aliran di dalam pipa, kecepatan fluida diasumsikan hanya memiliki komponen utama sepanjang sumbu pipa. Dengan asumsi tersebut, gradien kecepatan arah radial dan azimuthal dapat diabaikan, sehingga persamaan Navier-Stokes dapat direduksi menjadi persamaan sederhana yang menggambarkan hubungan antara gradien tekanan, viskositas, dan kecepatan rata-rata fluida. Hasil penyederhanaan ini melahirkan persamaan Hagen-Poiseuille, yang sangat berguna untuk menghitung debit aliran laminar di dalam pipa silinder.

2. Aliran Antara Dua Pelat Sejajar

Pada kondisi ini, fluida mengalir di antara dua bidang sejajar dengan jarak tertentu. Apabila kedua pelat tersebut diam, maka aliran yang terbentuk disebut aliran Poiseuille planar. Sebaliknya, bila salah satu pelat bergerak relatif terhadap pelat lainnya, aliran yang dihasilkan dikenal sebagai aliran Couette. Dalam kedua kasus ini, persamaan Navier-Stokes dapat dipangkas menjadi bentuk dua dimensi karena hanya ada variasi kecepatan dalam satu arah tegak lurus terhadap bidang aliran. Penyederhanaan

ini penting untuk memahami distribusi kecepatan dalam sistem mikrofluida, pelumasan, serta proses industri lainnya.

3. Aliran dengan Dominasi Gaya Tertentu

Dalam beberapa situasi, terdapat gaya yang lebih dominan dibandingkan gaya lainnya. Misalnya, pada aliran viskositas tinggi dengan kecepatan rendah, gaya viskos lebih dominan daripada gaya inersia, sehingga suku inersia pada persamaan Navier–Stokes dapat diabaikan. Sebaliknya, pada aliran kecepatan tinggi dengan viskositas rendah, gaya inersia mendominasi sehingga gaya viskos sering diabaikan. Prinsip ini memungkinkan diperolehnya model aliran sederhana, seperti aliran potensial yang digunakan pada aerodinamika.

4. Asumsi Simetri Geometri

Banyak sistem aliran memiliki sifat simetri, baik simetri silindris (seperti aliran di dalam pipa) maupun simetri sferis (seperti aliran di sekitar bola). Dengan memanfaatkan simetri ini, komponen persamaan yang tidak relevan dapat dieliminasi, sehingga sistem persamaan Navier–Stokes menjadi lebih ringkas.

Dengan penyederhanaan tersebut, persamaan Navier–Stokes dapat digunakan secara efektif untuk menyelesaikan persoalan nyata. Walaupun bentuk aslinya mencakup komponen tiga dimensi dan bersifat nonlinier, pendekatan melalui kondisi khusus ini menjadikan persamaan lebih praktis dan dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, seperti transportasi fluida dalam pipa, perancangan mesin fluida, hingga pemodelan aliran udara di sekitar bangunan dan kendaraan.

D. Penerapan Persamaan Navier–Stokes pada Aliran Teknik

Persamaan Navier–Stokes tidak hanya berperan sebagai dasar teori dalam mekanika fluida, tetapi juga memiliki peran yang sangat penting dalam berbagai aplikasi teknik. Hampir semua bidang yang berkaitan dengan fluida, baik gas maupun cairan, secara langsung maupun tidak langsung menggunakan persamaan ini untuk menjelaskan fenomena aliran, menghitung distribusi kecepatan, hingga memperkirakan kehilangan energi dalam sistem. Oleh karena itu, pemahaman mengenai penerapannya sangat krusial bagi para insinyur, terutama dalam merancang dan menganalisis sistem yang melibatkan transportasi fluida.

Salah satu penerapan yang paling mendasar adalah dalam aliran fluida di dalam pipa. Dengan menggunakan bentuk sederhana dari persamaan Navier–Stokes, dapat diperoleh profil kecepatan fluida pada kondisi aliran laminar. Hasil turunan ini dikenal sebagai persamaan Hagen–Poiseuille, yang memungkinkan insinyur menghitung debit aliran berdasarkan gradien tekanan, dimensi pipa, dan sifat viskositas fluida. Penerapan ini sangat penting dalam sistem perpipaan industri, distribusi air, hingga sistem medis seperti aliran darah dalam pembuluh.

Selain dalam pipa, persamaan Navier–Stokes juga diaplikasikan pada aliran di saluran terbuka, misalnya pada sungai, kanal, atau saluran irigasi. Dalam kasus ini, persamaan digunakan untuk menentukan distribusi kecepatan sepanjang kedalaman aliran serta memperkirakan kehilangan energi akibat gaya gesekan dengan dasar dan dinding saluran. Aplikasi ini penting

dalam perencanaan bendungan, saluran irigasi, serta pengendalian banjir.

Di bidang aerodinamika, persamaan Navier–Stokes menjadi dasar untuk memahami perilaku aliran udara di sekitar permukaan benda, seperti sayap pesawat, kendaraan, maupun turbin angin. Dengan bantuan metode komputasi (*Computational Fluid Dynamics* atau CFD), persamaan ini diselesaikan secara numerik untuk memperoleh gambaran rinci tentang distribusi tekanan, pola pusaran, serta gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). Informasi ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi energi, stabilitas, dan keamanan dalam desain transportasi modern.

Pada hidrodinamika laut, persamaan ini digunakan untuk memodelkan aliran air di sekitar lambung kapal, pergerakan arus laut, serta interaksi gelombang dengan struktur lepas pantai. Pemahaman ini membantu insinyur dalam merancang kapal dengan hambatan minimum, serta memastikan kestabilan dan daya tahan bangunan laut seperti platform minyak, jembatan, dan turbin lepas pantai.

Tidak hanya itu, persamaan Navier–Stokes juga memiliki peran besar dalam rekayasa sistem transportasi fluida modern, misalnya pada sistem pendingin mesin, jaringan distribusi bahan bakar, dan instalasi HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*). Dengan memodelkan aliran fluida secara akurat, sistem dapat dirancang untuk bekerja lebih efisien, hemat energi, dan aman.

Pada perkembangan mutakhir, penerapan persamaan ini semakin luas berkat dukungan teknologi komputasi. Bidang *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memungkinkan penyelesaian persamaan Navier–Stokes

secara numerik untuk kondisi kompleks yang sulit atau bahkan mustahil diselesaikan dengan metode analitis. CFD digunakan dalam berbagai industri, mulai dari otomotif, penerbangan, energi terbarukan, hingga biomedis, seperti memodelkan aliran udara dalam paru-paru atau peredaran darah dalam jantung.

Persamaan Navier–Stokes telah berkembang menjadi fondasi utama dalam rekayasa fluida modern. Keberadaannya memungkinkan perhitungan yang akurat terhadap aliran nyata yang kompleks, sekaligus membuka peluang inovasi dalam teknologi yang berbasis fluida. Dengan memahami dan menerapkan persamaan ini, para insinyur dapat merancang sistem yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan, sekaligus menjawab tantangan global dalam bidang energi, transportasi, dan teknologi kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Shemmeri, T. (2012). *Engineering fluid mechanics*. Ventus Publishing ApS.
- Arsana, I. G. N. K., Yekti, M. I., & Parwita, I. G. L. M. (2022). *Buku ajar mekanika fluida dan hidraulika*. Bandung: Kaizen Media Publishing.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Transport phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2013). *Hydraulics in civil and environmental engineering* (5th ed.). CRC Press.
- Dayana, I., & Marbun, J. (2023). *Mekanika fluida*. Guepedia.
- Evett, J. B., & Liu, C. (1989). *2500 solved problems in fluid mechanics and hydraulics*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Finnemore, E. J., & Johnson, J. C. (2011). *Fluid mechanics with civil engineering applications* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fox, J. A., & McDonald. (1985). *Introduction to fluid mechanics*. John Wiley.
- Giles, R. V., Evett, J. B., & Liu, C. (1994). *Theory and problems of fluid mechanics and hydraulics* (3rd ed.). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hendratta, L. A., & Tangkudung, H. (2019). *Mekanika fluida*. Unsrat Press, Manado.
- Hewakandamby, B. N. (2012). *A first course in fluid mechanics for engineers*. Ventus Publishing ApS.

- Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. C. (2010). *Fundamentals of hydraulic engineering systems* (4th ed.). Pearson.
- International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). (1978). *Discharge measurement structures*. ILRI.
- Kironoto, B. A. (2016). *Statika fluida*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Kothandaraman, C. P., & Rudramoorthy, R. (2007). *Fluid mechanics and machinery* (2nd ed.). New Age International (P) Ltd.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Hardani, H. W. (Penerj.). (2004). *Mekanika fluida* (Jilid 1). Erlangga.
- Musa, L. O., & Mulyadi, M. (2004). *Buku ajar mekanika fluida*. Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Nugroho, B. S., Nurrahman, A., Dianpalupidewi, T., Suryaningsih, N., & Jajuli, M. I. (n.d.). *Mekanika fluida laboratorium hilir*. Penerbit Adab.
- Sarjito, S., & Siswanto, W. A. (2021). *Mekanika dan dinamika fluida*. Muhammadiyah University Press.
- Soedrajat. (1983). *Mekanika fluida & hidrolika*. Bandung: Nova.
- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (Priyono, A., Penerj.). (1999). *Mekanika fluida* (Edisi ke-8, Jilid 1). Erlangga.
- Suhendra. (2019). *Konsep dasar dan aplikasi mekanika fluida bidang teknik mesin*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Van Dyke, M. (1982). *An album of fluid motion*. The Parabolic Press.
- Webber, N. B. (1971). *Fluid mechanics for civil engineers*. Taylor & Francis.
- White, F. M. (2001). *Mekanika fluida* (Edisi ke-2, Jilid 1; alih bahasa oleh M. Hariandja). Erlangga.

- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Widiasmadi, N. (n.d.). *Mekanika fluida 1 & 2*. Penerbit Adab.
- Yulianto, E., & Krisbudiman, A. (2024). *Mekanika fluida*. Deepublish.
- Yunianta, A., & Wijaya, F. (2025). *Hidraulika Lanjut*. TOHAR MEDIA.

GLOSARIUM

Simbol-simbol Huruf

a	Percepatan	i	Gradien hidrolik
A	Luas	k	Pangkat isentropik
c	Kecepatan suara	K	Modulus elastisitas (bulk)
c_p	Kapasitas panas jenis isobarik	l	Panjang
c_v	Kapasitas panas jenis volumeterik	m	Massa
C	Kompresibilitas	$\dot{m}$	Laju aliran massa/flux massa
$^{\circ}\text{C}$	Derajat celcius	M	Bilangan mach
C_c	Koefisien kontraksi	M_m	Massa molekul suatu gas
D_D	Koefisien seret	P	Tekanan
C_d	Koefisien pengaliran	P_{atm} atau p_{atm}	Tekanan atmosfer
C_L	Koefisien angkat	P_{abs}	Tekanan absolut
C_v	Koefisien kecepatan	P_{ukur}	Tekanan ukur
d	Diameter	P	Daya (power)
D	Diameter	Q	Debit/laju aliran volume
E_k	Energi kinetik	r	Jari-jari

E_p	Energi potensial	R	Konstanta gas
E_{tek}	Energi tekanan	R_u	Konstanta gas universal
f	Faktor gesekan	Re	Angka Reynold
f	Gaya	s	Jarak
f	Fungsi	SG	Kerapatan relatif/spesific gravity
F	Gaya	t	waktu
F_D	Gaya seret	T	Temperatur mutlak
F_L	Gaya angkat	T_0	Temperatur stagnasi
F_x	Gaya pada sumbu-x	v	Kecepatan relatif
F_y	Gaya pada sumbu-y	v	Kecepatan
F_R	Gaya resultan	v	Volume spesifik
G	Percepatan grafitasi	V	Volume
h	Head/tinggi tekan	V	Kecepatan absolut
h	Tinggi	W	Kerja (energy/work)
h	Enthalpi	W	Gaya berat
h_0	Enthalpi stagnasi	y	Jari-jari dalam
H_g	Air raksa	y	Jarak
H	Head/tinggi tekan	z	Beda tinggi/elevasi
h_f	Mayor losses	h_l	Minor losses

Notasi Yunani

α	Sudut kemiringan, sudut mach
Δ	Perubahan
δ	Tebal lapisan batas
γ	Berat jenis (specific weight)
η	Efisiensi sistem
θ	Sudut antara tegangan permukaan terhadap dinding pipa vertikal
μ	Kekentalan dinamik
ν	Kekentalan kinematis
τ	Tegangan geser
ω	Kecepatan angular

BIODATA PENULIS



Dr. Diharyo, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Anjir Pulang Pisau pada tanggal 12 Maret 1978. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara dari pasangan Dihel Sumbin Raba dan Melly Barthel Telok. Penulis bertempat tinggal di Jalan Darung Bawan RT. 02 No. 175 Kel. Pulang Pisau Kec. Kahayan Hilir, Kab. Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah, Suku Dayak dan beragama Kristen Protestan. Penulis mulai belajar pada bangku Sekolah Dasar Pulang Pisau 2 lulus tahun 1990. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Kahayan Hilir lulus tahun 1993. Selanjutnya, penulis sekolah di SMT. Pertanian Kuala Kapuas lulus pada tahun 1996. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan

studi S1 di Universitas Palangka Raya, Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil dan berhasil menyelesaikan studinya pada tahun 2002, dan melanjutkan Program Magister Teknik di Universitas Lambung Mangkurat dan lulus pada tahun 2010, Pada tahun 2016 penulis melanjutkan studi S3 pada Program Doktor Ilmu Lingkungan, Pascasarjana Universitas Palangka Raya dan lulus dengan predikat Cumlaude pada Tahun 2020 dengan menghasilkan Disertasi yang berjudul Pemanfaat Cangkang Kelapa Sawit untuk Perbaikan Mutu Air Gambut, Penulis juga telah menghasilkan banyak karya ilmiah yang dipublikasikan melalui Jurnal Nasional dan Jurnal Internasional yang terindek Sinta dan Scopus.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Rida Respati, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Palangka Raya tanggal 15 Januari 1975. Penulis adalah dosen tetap yayasan pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada prodi Teknik Sipil Universitas Palangka Raya pada Tahun 1999 dan melanjutkan S2 pada prodi Teknik Sipil di Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin Lulus pada Tahun 2012. Saat ini sedang melanjutkan S3 pada prodi Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Palangka Raya. Penulis telah banyak menghasilkan banyak karya ilmiah yang dipublikasikan melalui jurnal nasional dan Jurnal internasional yang terindek Sinta dan Scopus.

BIODATA PENULIS



Ir. Norseta Ajie Saputra, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Palangka Raya tanggal 10 Desember 1982. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Palangka Raya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Sipil bidang Geoteknik di Universitas Lambung Mangkurat. Penulis aktif dalam kegiatan penelitian di bidang geoteknik yang berhubungan dengan rekayasa perkuatan tanah lunak. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat terutama yang berhubungan dengan pengelolaan dan membuatkan filtrasi air.

Sebagai akademisi dan praktisi, penulis telah berkontribusi dalam berbagai penelitian dan publikasi ilmiah, khususnya dalam bidang stabilitas tanah, pemanfaatan geosintetik, serta inovasi metode perkuatan tanah dasar pada kawasan rawa dan lahan gambut. Beberapa karya ilmiah penulis telah dipublikasikan di jurnal nasional terakreditasi maupun jurnal internasional bereputasi dan dipresentasikan dalam seminar teknik sipil tingkat regional, nasional dan Internasional.

Di samping aktivitas mengajar dan meneliti, penulis juga aktif sebagai tenaga konsultan untuk proyek-proyek infrastruktur yang melibatkan mahasiswa dan masyarakat, seperti pembangunan sistem saluran drainase perbaikan jalan desa, dan pengolahan air bersih berbasis media lokal (pasir, kerikil, dan arang).

Buku ini merupakan bagian dari kontribusi penulis dalam mendokumentasikan pengetahuan dan pengalaman di bidang teknik sipil, khususnya pada tema fondasi dan rekayasa tanah lunak, dengan harapan dapat menjadi referensi tambahan bagi mahasiswa, dosen, maupun praktisi teknik sipil di Indonesia.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Rudy Yoga Lesmana, S.T., M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Sampit pada tanggal 14 November 1988. Penulis merupakan anak Pertama dari dua bersaudara dari pasangan Suwardi dan Rusimah. Penulis bertempat tinggal di Jalan Delima 7, No.3 Sampit. beragama Islam. Penulis menempuh pendidikan S1 di Universitas Pembangunan “Veteran” Yogyakarta, Fakultas Teknologi Mineral, Program Studi Teknik Lingkungan dan berhasil menyelesaikan studinya pada tahun 2011, dan melanjutkan Program Magister Ilmu Lingkungan di Universitas Sebelas Maret Solo dan lulus pada tahun 2014, selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan Profesi Insinyur di Universitas Mulawarman pada tahun 2024. Penulis memulai karir

sebagai dosen dari tahun 2015 hingga saat ini masih aktif tercatat sebagai dosen di program studi teknik lingkungan Universitas Muhammadiyah Palangka Raya.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Reza Zulfikar Akbar, S.T., M.Sc.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Muara Teweh pada tanggal 18 Oktober 1994. Pendidikan Sarjana (S1) ditempuh pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan diselesaikan pada tahun 2016. Selanjutnya, penulis melanjutkan studi Magister (S2) pada Program Magister Sistem dan Teknik Transportasi di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, dan berhasil meraih gelar Magister Sains (M.Sc.) pada tahun 2019. Pada tahun 2025, penulis memperoleh gelar Profesi Insinyur dari Universitas Mulawarman sebagai pengakuan atas kompetensi profesional di bidang teknik sipil.

Saat ini penulis mengabdikan diri sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Dalam perannya sebagai akademisi, penulis aktif melaksanakan kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Sejumlah karya ilmiah telah dipublikasikan melalui jurnal nasional terakreditasi maupun prosiding seminar, serta terlibat dalam berbagai kegiatan akademik dan kolaborasi penelitian di tingkat lokal maupun nasional.

Dengan komitmen pada dunia pendidikan tinggi, penulis terus berupaya mengembangkan ilmu pengetahuan dan berkontribusi dalam mencetak generasi muda yang unggul serta berdaya saing di bidang teknik sipil.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Achmad Imam S., M.Ling.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis bernama Achmad Imam Santoso, lahir di Palangka Raya pada tanggal 28 Juni 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 11 Langkai Palangka Raya, melanjutkan ke SMP Negeri 1 Palangka Raya, kemudian ke SMA Negeri 4 Palangka Raya. Pendidikan tinggi ditempuh di Sekolah Tinggi Teknik Lingkungan (STTL) Yogyakarta pada Program Studi Teknik Lingkungan, dan dilanjutkan pada jenjang pascasarjana di Institut Teknologi Yogyakarta pada Program Studi Ilmu

Lingkungan. Penulis menekuni bidang penelitian kualitas air, teknik lingkungan, serta pengelolaan limbah.

---000---

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Sari Marlina, S.Hut., M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Dr. Ir. Sari Marlina, S.Hut., M.Si. lahir di Kuala Kapuas pada tanggal 13 Februari 1981. Penulis adalah dosen tetap di Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kehutanan di Universitas Palangka Raya (UPR) pada tahun 2003, dan melanjutkan S2 pada Program Studi Ilmu Lingkungan di universitas yang sama pada tahun 2013, serta menamatkan pendidikan S3 di Program Studi Ilmu Lingkungan di Universitas Palangka Raya pada tahun 2021.

---000---

BIODATA PENULIS



Dr. Ise Afifah, S.Hut., M.P.

Dosen Yayasan (DTY) Fakultas Pertanian dan Kehutanan
Universitas Muhammadiyah Palangka Raya

Penulis Bernama lengkap Dr. Ise Afifah, S.Hut., M.P. tempat lahir Kuala Kapuas 29 Juni 1978, anak pertama dari lima bersaudara. Alumnus S1 Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Palangka Raya tahun 1996 dan selesai tahun 2000. Tahun 2001 melanjutkan S2 di Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman dan selesai tahun 2004. S3 Ilmu Pertanian Universitas Lambung Mangkurat 2022-2025.

Pengalaman kerja sebagai Dosen Tetap Yayasan (DTY) staf pengajar Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Muhammadiyah Palangka Raya dari tahun 2001 sampai sekarang. Dipercaya sebagai Kepala Biro Keuangan Universitas Muhammadiyah Palangka Raya dari tahun 2014 sampai sekarang.

BIODATA PENULIS



Ir. Amelia Faradila, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Ampah, 21 Mei 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Riwayat pendidikan penulis yaitu menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Lambung Mangkurat. Kemudian bekerja di PT Kalimantan Soil Engineering selama 1 tahun sebelum melanjutkan pendidikan magister pada tahun 2013 pada Bidang Keahlian Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung dengan konsentrasi Bidang Keahlian Geoteknik.

Setelah lulus dari jenjang S2, penulis bekerja di konsultan PT LAPI ITB sebagai geotechnical engineer hingga tahun 2016 dan menjadi Dosen Tetap Yayasan di Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Selanjutnya pada tahun 2024 penulis mengambil Pendidikan Profesi Insinyur di Universitas Hasanudin Makasar dan mendapatkan gelar Insinyur.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Noviyanthi Handayani, S.T., M.T., IPM.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Pangkalan Bun, 24 November 1984. Penulis adalah dosen tetap pada program studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Palangka Raya pada tahun 2007 dan melanjutkan jenjang S2 pada program magister Teknik Sipil bidang konsentrasi Struktur Universitas Lambung Mangkurat pada tahun 2011. Penulis juga menempuh Pendidikan profesi insinyur di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tahun 2024.

---000---

BIODATA PENULIS



Gusti Iqbal Tawaqal, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Palangka Raya tanggal 11 Februari 1989. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada jurusan Teknik Pertambangan pada tahun 2011 kemudian menyelesaikan S2 pada Jurusan Teknik Pertambangan Lingkungan tahun 2016 di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta. Penelitian skripsi dan tesis penulis berkaitan dengan Kajian Hidrogeologi. Penulis memulai karir sebagai dosen pada tahun 2020 hingga saat ini masih aktif melaksanakan tridharma perguruan tinggi di Universitas Muhammadiyah Palangka Raya.

BIODATA PENULIS



Ir. Rizkan Maulidi Ansyari, S.T., M.T., IPM

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Kandangan pada tanggal 29 September 1990. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari menempuh pendidikan di Ma'had Al Zaytun, Indramayu, kemudian melanjutkan studi Strata 1 (S1) di Program Studi Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat (ULM) Banjarmasin. Pendidikan pascasarjana Strata 2 (S2) ditempuh pada Magister Teknik Sipil ULM Banjarmasin dengan konsentrasi Bidang Rekayasa Geoteknik. Selanjutnya, penulis juga mengambil Pendidikan Profesi Insinyur di Universitas Mulawarman (Unmul) Samarinda dan pada tahun yang sama berhasil memperoleh Surat Tanda Registrasi Insinyur (STRI).

Dalam perjalanan karier, sejak tahun 2014 hingga sekarang, penulis menjabat sebagai Komisaris CV T-Consultant. Pada periode 2014 hingga 2021, beliau bekerja di PT. Kalindra Utama dengan berbagai posisi, antara lain sebagai Material Manager, General Affair, serta Penanggung Jawab Subklasifikasi Badan Usaha (PJSKBU). Sejak tahun 2021 hingga saat ini, penulis juga mengabdikan diri sebagai Dosen Tetap Yayasan Universitas Muhammadiyah Palangka Raya (UMPR) pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik.

---000---

BIODATA PENULIS



Ir. Nirwana Puspasari, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangka
Raya

Penulis lahir di Kandungan Hulu Sungai Selatan 1978. P pada tanggal 02 Mei 1973. Penulis merupakan anak pertama dari tujuh bersaudara dari pasangan DRS.Suhartoyo dan Siti Rochana Laila. Penulis bertempat tinggal di Jalan Jati No. 29 RT.001 RW.003 kel. Panarung Kec. Pahandut Kota Palangka Raya, Provinsi Kalimantan Tengah. Penulis beragama Islam. Penulis mulai belajar pada bangku Sekolah Dasar Negeri Lambung Mangkurat Banjarmasin pada tahun 1980 dan lulus tahun 1986. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Banjarmasin dan lulus tahun 1989. Selanjutnya, penulis sekolah di SMAN 1 Banjarmasin dan lulus pada tahun 1992.

Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan studi S1 di Universitas Lambung Mangkurat, Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil dan berhasil menyelesaikan studinya pada tahun 1998, dan melanjutkan Program Magister Teknik di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2001 dan lulus pada tahun 2003. Penulis juga telah menghasilkan banyak karya ilmiah yang dipublikasikan melalui Jurnal Nasional dan Jurnal Internasional yang terindek Sinta dan Scopus.

---000---