



FLUIDA

Anda telah familiar dengan tiga buah wujud zat di lingkungan sekitar anda. Anda bernapas menggunakan udara, minum dan berenang menggunakan air, dan mendirikan bangunan menggunakan benda padat. Secara umum, anda telah familiar dengan sifat-sifat benda tersebut. Meskipun demikian, tetap saja masih adanya sebuah kemungkinan sifat-sifat yang mungkin mengejutkan kita karena belum kita kenal sebelumnya.

Zat alir adalah suatu zat yang mampu mengalir dan hambatan kecil yang diberikan padanya (gesekan misalnya), akan merubah bentuknya—ketika fluida berada di dalam tekanan misalnya. Zat alir bisa berwujud cair maupun gas. Keduanya bisa mengalir.

Sebagian besar aktivitas hidup kita bergantung pada dua hal ini. Kita hidup dan bernapas menggunakan atmosfer yang berwujud gas. Dua pertiga bumi yang ditutupi air menjadikan planet kita menjadi unik di alam semesta. Dengan keduanya juga kehidupan manusia disokong. Sifat-sifat zat alir mampu membat pesawat terbang mengudara, kapal mengapung, dan kapal selam menyelam atau mengapung. Sifat-sifat itu juga menyebabkan air terserap handuk dan serangga berjalan di atas air.

Tekanan

Teori kinetik-molekuler yang telah kita diskusikan menjelaskan sifat-sifat zat gas. Teori ini berdasarkan tiga buah asumsi:

- Gas tersusun atas sejumlah besar partikel-partikel yang sangat kecil.
- Partikel-partikel tersebut bergerak dalam keadaan acak. Mereka terpisah dan menumbuk secara lenting sempurna satu dengan lainnya.
- Partikel menumbuk lenting sempurna dengan dinding yang mengurungnya.

Teori kinetik merupakan teori yang berada dalam wilayah mikroskopik. Teori ini menggambarkan sebuah gas dalam wadah yang di dalamnya berisi sejumlah besar partikel kecil yang bergerak. Sesuai teori, tekanan yang dihasilkan pada tembok di dalam kotak merupakan hasil dari tumbukan partikel dengan kotak.

Lalu, apa yang dimaksud tekanan yang dihasilkan oleh gas? **Tekanan** didefinisikan sebagai gaya setiap satuan luas.

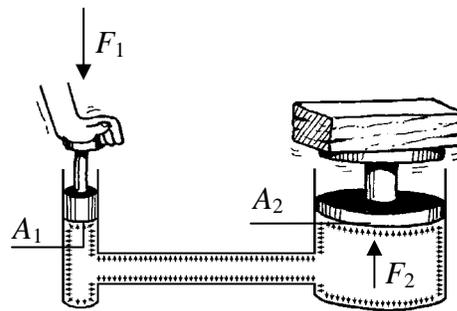
$$p = \frac{F}{A}$$

Hidrostatika

Zat alir yang mungkin sangat akrab dengan anda adalah air. Namun, madu, minyak, oli, dan udara juga merupakan zat alir. Bagaimana mereka dianggap sama? Bagaimana juga dianggap berbeda? Untuk menyederhanakan pembahasan kita, kita hanya akan meninjau perilaku gas ideal saja. Pada gas ideal tidak terdapat gesekan internal antara partikel yang satu dengan partikel yang lainnya.

Jika anda pernah menyelam di sebuah kolam renang, anda akan tahu bahwa fluida memberikan tekanan pada anda. Tubuh anda sangat sensitif terhadap tekanan air. Anda mungkin akan menemukan bahwa tekanan pada telinga anda tidak bergantung apakah anda terlentang ke atas maupun tengkurap.

Blaise Pascal (1623–1662), seorang fisikawan perancis, menyatakan bahwa bentuk wadah tidak mempengaruhi tekanan pada kedalaman tertentu. Kata Pascal, tekanan zat alir dalam keadaan tertutup akan diteruskan secara seragam ke segala arah.



Gb.1. Kempa hidrolis

Prinsip Pascal diaplikasikan di dalam mesin yang menggunakan zat alir untuk melipatkalikan gaya, misalnya kempa hidrolis. Dalam sebuah sistem hidrolis, sebuah zat alir ditempatkan dalam dua wadah yang saling

berhubungan. Masing-masing piston bebas untuk bergerak. Sebuah gaya, F_1 , diberikan pada piston 1 dengan luas A_1 . Tekanan yang diberikan fluida pada wadah 1 adalah,

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1}$$

Menggunakan prinsip Pascal, tekanan ditransmisikan melalui fluida tanpa perubahan.

Tekanan diberikan oleh fluida pada piston 2 yang memiliki luas permukaan A_2 , diberikan oleh,

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2}$$

Karena, p_1 sama dengan p_2 maka,

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

Gaya yang diberikan oleh piston 2 adalah,

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

Anda dapat mengobservasi karakteristik zat alir ketika berenang. Semakin dalam anda menyelam, semakin besar tekanan tekanan yang anda rasakan. Tekanan sebuah zat alir pada permukaan mendatar adalah berat setiap satu satuan luas dari sebuah zat alir di atas permukaan. Berat, W , dari air di atasmu adalah,

$$W = mg$$

Kita telah mengetahui bahwa $\rho = \frac{m}{V}$ dan $m = \rho V$,

jadi karena $W = \rho Vg$ atau $W = \rho(Ah)g$ dan karena $P = \frac{F}{A}$, maka

$$P = \frac{\rho Ahg}{A} \text{ atau}$$

$$P = \rho gh$$

dimana:

P = tekanan hidrostatik zat alir

ρ = berat jenis zat alir

m = massa zat alir

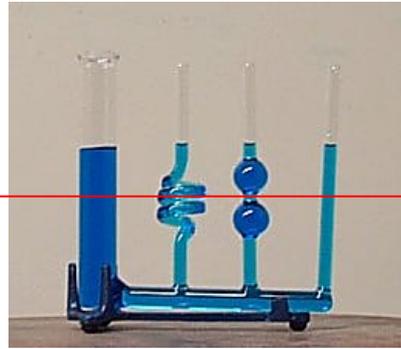
V = volume zat alir

A = luas zat alir

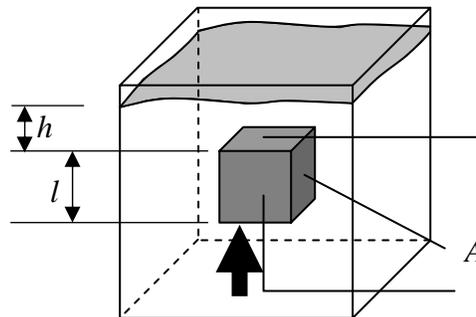
g = percepatan gravitasi bumi

Dengan demikian, tekanan bergantung hanya pada kedalaman fluida dan kerapatan.

Bentuk wadah tidak memberikan pengaruh apapun.



Gb.2. Bentuk wadah tidak memberikan pengaruh tekanan. Tekanan pada titik A dan B sama besar karena ketinggiannya sama.



Gb.3 Balok berdimensi yang dimasukkan ke dalam wadah berisi zat alir.

Jika sebuah benda dengan tinggi l diletakkan dalam cairan, gaya akan dikerjakan oleh cairan pada semua sisi benda. Semua gaya seimbang. Gaya yang bekerja pada permukaan bagian atas dan permukaan bagian bawah diberikan oleh,

$$P_{\text{atas}} = \rho gh$$

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

$$P_{\text{bawah}} = \rho g (h + l)$$

Dari persamaan tersebut kita tahu bahwa gaya yang bekerja pada permukaan di bagian bawah lebih besar. Hal ini dikarenakan permukaan bagian bawah lebih dalam menyelam (ingat rumus tekanan hidrostatik).

Sekarang kita cari gaya netto yang bekerja.

Kita tahu bahwa,

$$F_{\text{atas}} = \rho A h g, \text{ dan}$$

$$F_{\text{bawah}} = \rho A (h + l) g$$

$$F_{\text{bawah}} > F_{\text{di atas}}$$

Jadi, gaya netto yang diberikan adalah,

$$F_{\text{bawah}} - F_{\text{atas}} = \rho A (h + l) g - \rho A h g$$

$$= \rho A g [(h + l) - (h)]$$

$$= \rho A g [h + l - h]$$

$$= \rho A g l, \text{ karena } Al \text{ adalah volume, maka}$$

$$F = \rho V g$$

Gaya ini disebut dengan gaya apung. Perhatikan bahwa volume benda yang berada di dalam zat alir sama dengan volume air yang dipindahkan oleh benda tersebut. Dengan demikian, gaya apung, $\rho V g$, besarnya sama dengan berat zat alir yang dipindahkan oleh benda yang ditenggelamkan. Hubungan ini ditemukan oleh ilmuwan Yunani Archimedes dan dinamakan Prinsip Archimedes. *Sebuah benda yang ditenggelamkan akan menerima gaya angkat ke atas sama dengan berat zat alir yang dipindahkan oleh benda.* Perlu diperhatikan bahwa gaya apung *tidak* bergantung pada berat benda yang ditenggelamkan, melainkan bergantung pada berat fluida yang dipindahkan. Sebuah kubus besi pejal, sebuah kubus aluminium pejal, dan sebuah kubus

© Ikhlasul

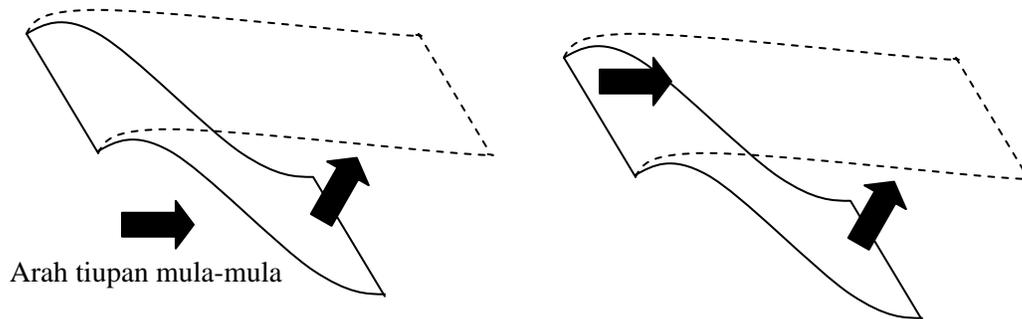
Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

besi berongga, semuanya memiliki volume yang sama, akan mengalami gaya apung yang sama.

Prinsip Archimedes bekerja pada semua benda dengan kerapatan yang berbeda. Jika kerapatan dari benda lebih besar dari kerapatan fluida, gaya apung ke atas akan lebih kecil daripada berat benda, W_{benda} , dan benda akan tenggelam. Jika kerapatan benda sama dengan kerapatan fluida, gaya apung dan berat benda akan sama. Gaya netto nilainya sama dengan nol dan benda tidak mengapung maupun tenggelam. Jika kerapatan benda lebih kecil daripada kerapatan fluida, maka benda akan mengapung. Bagian benda yang tenggelam akan memindahkan sejumlah zat alir sama dengan berat benda yang tenggelam.

Hidrodinamika

Untuk melihat pengaruh fluida yang bergerak, cobalah eksperimen di bawah ini. Dekatkan ujung sebuah kertas ke mulut anda, lalu tiup pada dua sisi. Tiupan pertama di bagian bawah kertas dan tiupan kedua di bagian atas kertas.



Gb. 4. Eksperimen sederhana hukum Bernoulli

Eksperimen sederhana tersebut merupakan salah satu contoh sederhana dari sebuah hukum bernama Hukum Bernoulli.

Saat anda meniup bagian bawah kertas, ujung kertas yang jauh dari mulut anda akan naik. Wajar. Hal itu dikarenakan kertas mendapat gaya yang berasal dari tiupan udara anda. Saat anda meniup kertas di bagian atasnya, kertas akan naik. Inilah yang membuat tidak wajar. Kertas naik juga karena adanya tekanan udara. Pada kasus kedua, anda memberikan angin yang kencang pada bagian atas kertas. Kertas itu lalu naik. Dengan

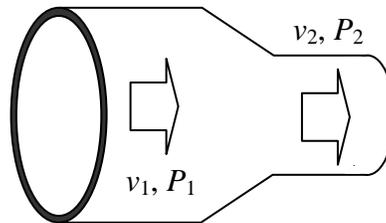
© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

demikian, tekanan di bawah kertas lebih besar daripada tekanan di atas kertas. Simpulannya, tekanan yang tinggi dihasilkan oleh udara yang bergerak lambat dan tekanan kecil dihasilkan oleh udara yang bergerak lebih cepat.

Sekarang, perhatikan sebuah pipa yang dialiri air. Jika sejumlah zat alir masuk ke ujung pipa yang satu dengan sejumlah massa tertentu maka pastilah sejumlah massa tertentu itu akan keluar di ujung lain dengan jumlah massa yang sama.

Sekarang, tinjau sebuah pipa dengan bentuk yang semakin menyempit. Agar massa air yang masuk sama dengan massa air yang keluar, maka kecepatan arus air pada pipa yang sempit harus lebih besar. Jika kecepatannya naik, maka energi kinetiknya naik. Hal ini berarti ada kerja netto yang bekerja di dalam

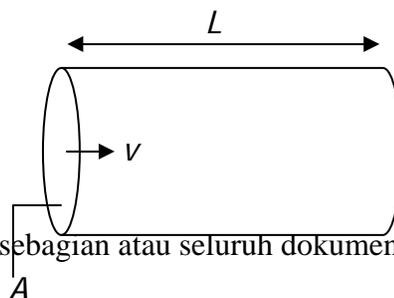


Gb. 5. Pipa dengan penampang semakin menyempit.

sistem pipa dan air tersebut. Kerja netto dihasilkan oleh perbedaan kerja yang dilakukan pada sejumlah massa fluida untuk menggerakkannya ke dalam pipa dan kerja yang dilakukan oleh fluida untuk mendorong fluida keluar dengan jumlah yang sama (dengan jumlah saat masuk). Besar kerja ini sebanding dengan gaya yang diberikan pada fluida, yang akhirnya bergantung juga pada tekanan. Jika kerja netto harganya positif, tekanan pada air yang bergerak lebih lambat akan menjadi besar sedangkan tekanan pada air yang bergerak dengan cepat akan menjadi kecil. Hubungan antara kecepatan dan tekanan yang dihasilkan oleh fluida yang bergerak digambarkan oleh Bernoulli: *Saat kecepatan fluida meningkat, tekanan yang dihasilkan oleh fluida menurun.*

Persamaan kontinuitas

Sebelum kita rumuskan persamaan Bernoulli, akan lebih baik kita kenalkan terlebih dahulu sebuah persamaan yang menjadi dasar hukum Bernoulli, yakni persamaan kontinuitas.



© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

Gb. 6. Elemen air dengan luas penampang A , panjang L , mengalir sejauh L dengan kecepatan v .

Perhatikan sebuah pipa dengan panjang L , luas penampang A , dan kecepatan aliran air v . Dalam suatu ukuran penampang tertentu tersebut, mengalir sejumlah air setiap satu satuan waktu. Besaran yang menyatakan jumlah (volume) fluida yang mengalir melalui sebuah penampang dengan ukuran tertentu disebut dengan Debit.

Secara matematis debit dituliskan,

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

dimana, Q adalah debit, V adalah volume, dan t adalah waktu.

Katakanlah sejumlah fluida mengalir melalui pipa seluas A setelah selang waktu t dan menempuh jarak L . Volume fluidanya adalah $V = AL$, sedangkan jarak yang ditempuh adalah $L = vt$, sehingga debit Q dapat kita nyatakan sebagai,

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{AL}{t} = \frac{A(vt)}{t}$$

$$Q = Av$$

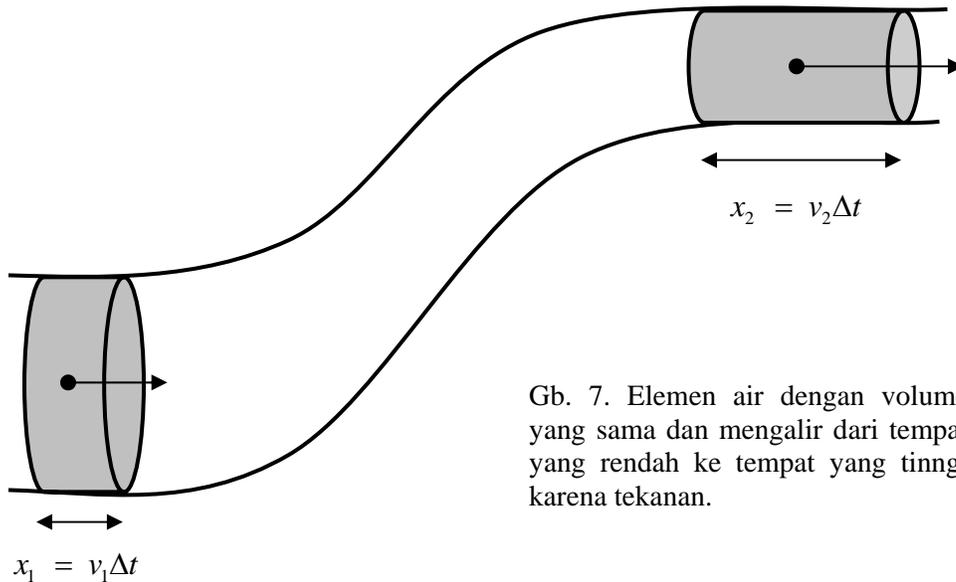
Sekarang, andaikan saja kita menemui sebuah sungai yang memiliki bagian lebar dan sempit. Kita akan menemui aliran yang deras pada bagian sempit dan pelan pada bagian lebar. Mengapa?

Jika suatu fluida mengalir dengan aliran yang konstan, maka masa fluida yang masuk ke salah satu ujung pipa mesti sama dengan massa fluida yang keluar pada ujung pipa yang lainnya dalam selang waktu yang sama. Katakan saja dalam 5 detik ada 7 liter air masuk maka dalam 5 detik itu juga ada 7 liter air keluar.

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

Tinjau suatu fluida yang mengalir dengan aliran konstan pada gambar 7 di bawah.



Gb. 7. Elemen air dengan volume yang sama dan mengalir dari tempat yang rendah ke tempat yang tinggi karena tekanan.

Diandaikan A_1 adalah luas penampang 1, A_2 adalah luas penampang 2, ρ_1 adalah massa jenis fluida pada 1 dan ρ_2 adalah massa jenis fluida pada 2, v_1 adalah kecepatan partikel-partikel pada 1 dan v_2 adalah kecepatan partikel pada 2.

Selama selang waktu Δt , fluida pada 1 bergerak ke arah kanan menempuh jarak $x_1 = v_1 \Delta t$, dan fluida pada 2 bergerak ke kanan menempuh jarak $x_2 = v_2 \Delta t$. Oleh karena itu, volume $V_1 = A_1 x_1$ akan masuk ke pipa bagian 1, dan volume $V_2 = A_2 x_2$ akan keluar pada bagian 2. Massa fluida yang masuk pada bagian 1 selama selang waktu Δt adalah,

$$\begin{aligned} m_1 &= \rho_1 V_1 \\ &= \rho_1 (A_1 x_1) \\ m_1 &= \rho_1 A_1 (v_1 \Delta t) \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, massa fluida yang keluar pada bagian 2 selama selang waktu Δt adalah

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

$$m_2 = \rho_2 A_2 (v_2 \Delta t)$$

Massa fluida yang masuk pada bagian 1 sama dengan massa fluida yang keluar ada bagian 2.

$$\rho_1 A_1 (v_1 \Delta t) = \rho_2 A_2 (v_2 \Delta t)$$

Membagi kedua ruas persamaan dengan Δt diperoleh,

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Persamaan ini dikenal dengan persamaan kontinuitas.

Jika diasumsikan fluida yang kita gunakan adalah fluida ideal (fluida yang tidak termampatkan) maka massa jenisnya sama di semua bagian, sehingga

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Atau secara umum,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3 = \dots = \text{konstan}$$

Hukum Bernoulli

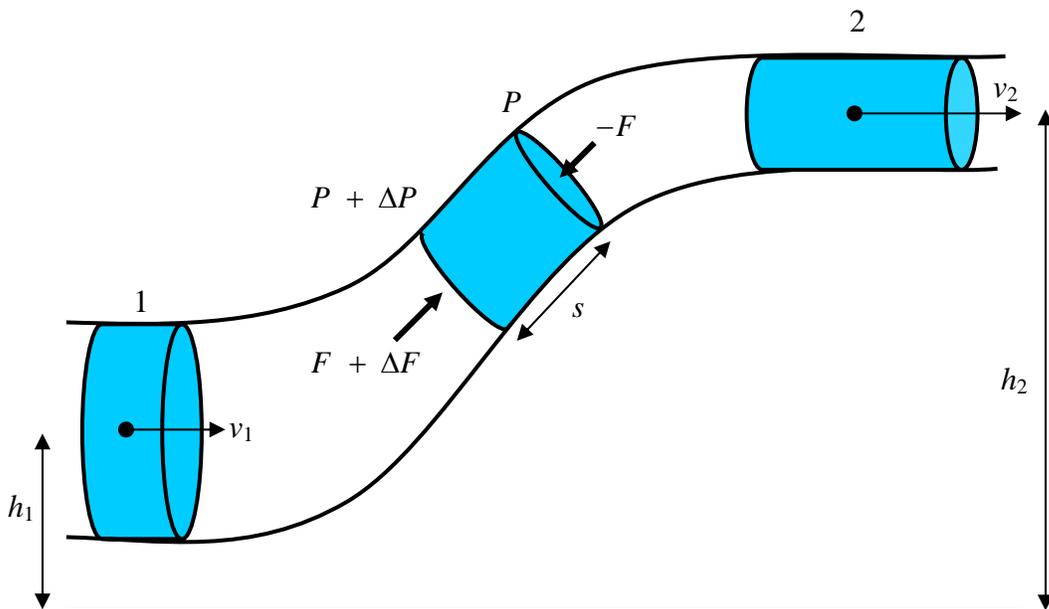
Sejumlah fluida mengalir di dalam pipa dari titik 1 menuju titik 2. Titik 1 lebih rendah daripada titik 2, dan ini berarti energi potensial di titik 1 lebih kecil daripada energi potensial di titik 2. Luas penampang 1 lebih besar daripada luas penampang 2. Menurut persamaan kontinuitas ($Av = \text{konstan}$), kecepatan fluida di 2 lebih besar daripada di 1, dan ini berarti bahwa energi kinetik fluida di 1 *lebih kecil* daripada energi kinetik fluida di 2. Jumlah energi potensial dan energi kinetik adalah energi mekanik. Dengan demikian, energi mekanik fluida di 1 *lebih kecil* daripada energi mekanik fluida di 2.

Jika energi mekanik di 1 lebih kecil daripada energi mekanik di 2, bagaimana mungkin fluida berpindah dari titik 1 ke titik 2? Bernoulli mengetahui tentang teorema usaha-energi mekanik. Menurut teorema ini, fluida dapat berpindah dari 1 ke 2. Usaha adalah gaya kali perpindahan ($W = F \Delta s$). Agar usaha W positif, beda gaya $\Delta F = F_1 - F_2$ haruslah

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

positif. Gaya adalah tekanan kali luas penampang ($F = pA$), sehingga agar beda gaya ΔF positif, $\Delta F = p_1A_1 - p_2A_2$ haruslah positif. Dari sinilah Bernoulli menemukan besaran ketiga yang berhubungan dengan usaha positif yang dilakukan fluida, yaitu tekanan p sehingga fluida dapat berpindah dari 1 ke 2 walaupun energi mekanik di 1 lebih kecil daripada energi mekanik di 2.



Gb. 8. Sejumlah elemen air, mengalir dari titik 1 menuju titik 2 dengan kecepatan v karena mendapatkan tekanan P . Jarak pusat elemen air pada titik 1 adalah h_1 sedangkan jarak pusat elemen air pada titik 2 adalah h_2 .

Untuk menurunkan persamaan Bernoulli, perhatikan gambar 8. Gambar tersebut menunjukkan sejumlah fluida dengan massa m , menaiki sebuah pipa. Sebagaimana kita © Ikhlasul
Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

ketahui, sebuah benda yang bergerak di bawah pengaruh gravitasi memiliki energi mekanik yang merupakan jumlah dari energi potensial dan energi kinetik, $E = EK + EP = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$. Ketika kerja W dikerjakan pada fluida oleh gaya eksternal nonkonservatif, energi mekanik total berubah. Sesuai dengan teorema kerja-energi, kerja sama dengan perubahan energi mekanik,

$$W = E_2 - E_1 = \left(\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \right) - \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \right)$$

Gambar 8., (elemen air tengah) dapat membantu kita memahami bagaimana kerja W meningkat. Pada bagian atas permukaan elemen fluida, fluida di sekitarnya memberikan gaya P . Tekanan tersebut menghasilkan gaya sebesar $F = PA$, dengan A luas permukaan. Pada permukaan bagian bawah elemen fluida, fluida di sekitarnya memberikan tekanan yang sedikit lebih besar, $P + \Delta P$, dengan ΔP adalah perbedaan tekanan antara ujung elemen fluida. Hasilnya, gaya pada permukaan atas elemen memiliki besar $F + \Delta F = (P + \Delta P)A$. Besar gaya netto yang mendorong elemen fluida ke atas pipa adalah $\Delta F = \Delta PA$. Ketika elemen fluida bergerak sejauh panjangnya sendiri, yakni sejauh s , kerja yang dilakukan adalah hasil kali antara besar gaya netto dengan jaraknya: Kerja = $W = (\Delta P)As$. Besaran As adalah volume dari elemen fluida, sehingga kerjanya sama dengan $(\Delta P)V$. Kerja total yang dilakukan pada fluida agar elemen fluida bergerak dari bagian 1 ke bagian 2 adalah $W = (P_2 - P_1)V$, dengan $P_2 - P_1$ adalah perbedaan tekanan antara dua daerah. Dari sini kita peroleh,

$$P_1 + \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \right) = P_2 + \left(\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \right)$$

$$W = (P_1 - P_2)V = \left(\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \right) - \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \right)$$

Membagi kedua ruas dengan V , dan menghasilkan m/V sebagai massa jenis fluida, dan menyusunnya ulang kita peroleh,

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis

$$\frac{(P_1 - P_2)V}{V} = \frac{\left(\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2\right)}{V} - \frac{\left(\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1\right)}{V}$$

$$(P_1 - P_2) = \left(\frac{1}{2}\frac{m}{V}v_2^2 + \frac{m}{V}gh_2\right) - \left(\frac{1}{2}\frac{m}{V}v_1^2 + \frac{m}{V}gh_1\right)$$

$$(P_1 - P_2) = \left(\frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2\right) - \left(\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1\right)$$

$$P_1 + \left(\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1\right) = P_2 + \left(\frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2\right) \text{ (Hukum Bernoulli)}$$

Dua kasus hukum Bernoulli

- Fluida statis

Jika fluida tidak bergerak, maka $v = 0$, sehingga

$$P_1 + (0 + \rho gh_1) = P_2 + (0 + \rho gh_2)$$

$$P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho gh_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho gh_2 - \rho gh_1 \text{ (Persamaan hidrostatis)}$$

- Fluida dinamis dalam pipa mendatar

Jika pipa mendatar maka tidak ada perbedaan ketinggian, sehingga $h_1 = h_2$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

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

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

(Perhatikan bahwa agar ada gaya angkat maka nilai $P_1 - P_2$ haruslah positif sehingga $P_1 > P_2$. Jika P_1 lebih besar dari P_2 maka v_2 pastilah lebih besar daripada

v_1 . Dengan demikian rumus ini menjadi bukti matematis percobaan sederhana hukum Bernoulli dengan menggunakan kertas yang ditiup)

Sumber:

Dauids, Mark., Neff, Robert., Wedding, Kelly., Zitzewitz, Paul. (1995). *Merril Physical Science Teacher Wraparound Edition*. New York: GLENCOE McGraw-Hill.

© Ikhlasul

Dilarang menggandakan sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa izin dari penulis