

MEKANIKA FLUIDA II

Saloom Hilton Siahaan, ST., MT



BAHAN AJAR
MEKANIKA FLUIDA II

BAHAN AJAR MEKANIKA FLUIDA II

Saloom Hilton Siahaan, ST., MT



BAHAN AJAR MEKANIKA FLUIDA II

© Penerbit Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia (PRCI)

Penulis:

Saloom Hilton Siahaan, ST., MT

Editor: Saloom Hilton Siahaan, ST., MT

Cetakan Pertama : Juni 2022

Cover: Rusli

Tata Letak : Tim Kreatif PRCI

Hak Cipta 2022, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia

ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website : www.rcipress.rcipublisher.org

E-mail : rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2022 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I – : Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2022
; 18,2 x 25,7 cm
ISBN : 978-623-448-100-6

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur diucapkan atas berkat kasih karuniaNya, Bahan Ajar Mekanika Fluida II dapat diselesaikan. Tujuan dari pembuatan bahan ajar ini adalah untuk memudahkan mahasiswa dalam hal memahami pelajaran Mekanika Fluida. Bahan Ajar Mekanika Fluida ini telah disesuaikan dengan silabus dari jurusan teknik mesin.

Pada bahan ajar ini ditampilkan teori, contoh-contoh soal dan latihan soal. Dengan demikian diharapkan agar mahasiswa lebih mendalami dari tiap-tiap pokok bahasan pada mata kuliah mekanika fluida ini. Buku ini bisa digunakan juga sebagai pegangan dosen pengampu mata kuliah mekanika fluida, karena selain disertai pembahasan yang mendetail tentang teori dasarnya, diberikan pula contoh-contoh soal setiap materi.

Isi bahan ajar ini dari bab 1 sampai bab 3, materi yang dibahas adalah: **Bab 1. Analisis dimensi dan kesamaan** meliputi (Sifat-sifat dari analisa dimensi, Teori Buckingham Pi, Perlunya kelompok-kelompok tanpa dimensi dalam mekanika fluida). **Bab 2. Aliran Internal kental dan Tak Termampatkan** meliputi (Pendahuluan, Aliran laminar berkembang penuh diantara pelat datar, Aliran laminar berkembang penuh didalam pipa, Distribusi tegangan geser aliran berkembang penuh didalam pipa, Profil kecepatan aliran berkembang penuh di dalam pipa, Persamaan energi pada aliran dalam pipa, Perhitungan mayor losses dan minor losses, Pompa didalam sistem fluida, Pipa-pipa seri dan Paralel, Pipa bercabang, dan jaringan pipa). **Bab 3. Aliran Eksternal Kental dan Tak Termampatkan** meliputi (konsep lapisan batas, Ketebalan lapisan batas, Lapisan batas laminar diatas pelat, Persamaan integral momentum, Persamaan integral momentum untuk gradien tekanan nol, Gradien tekanan didalam aliran lapis batas, gaya seret, Gaya angkat (lift force) dan pengukuran debit aliran internal dan eksternal).

Penyusun menyadari dalam pembuatan bahan ajar ini masih banyak kekurangan dan sangat jauh dari sempurna. Untuk itu saran serta kritik yang bersifat membangun akan kami terima dengan senang hati, untuk penyempurnaan di masa yang akan datang. Semoga bahan ajar ini bermanfaat untuk kemajuan Fakultas Teknik Dan Pengelolaan Sumber Daya Perairan Universitas HKBP Nommensen Pematangsiantar khususnya Prodi Teknik Mesin.

Pematangsiantar, 08 Mei 2022

Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL.....	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
BAB I ANALISA DIMENSI DAN KESAMAAN	1
A. Dimensi dan Satuan.....	1
B. Teori Buckingham Pi (dalil Pi).....	2
C. Perlunya Kelompok Tanpa Dimensi dalam Mekanika Fluida	5
BAB II ALIRAN INTERNAL KENTAL DAN TAK TERMAMPATKAN	9
A. Pendahuluan.....	9
B. Aliran Laminer Berkembang Penuh diantara Dua Plat Datar.....	9
C. Aliran Laminer Berkembang Penuh di dalam Pipa	11
D. Tekanan dan Tegangan Geser Aliran Berkembang Penuh di dalam Pipa....	18
E. Profil Kecepatan Turbulen Aliran Berkembang Penuh di dalam Pipa	19
F. Persamaan Energi pada Aliran dalam Pipa	23
G. Mayor loss dan Minor loss.....	25
H. Pompa di dalam Sistem Fluida.....	30
I. Pipa-Pipa Seri dan Paralel	55
J. Pipa Bercabang.....	65
K. Jaringan Pipa	72
BAB III TEORI LAPISAN BATAS.....	83
A. Konsep Lapis Batas.....	83
B. Ketebalan Lapisan Batas	86
C. Persamaan Momentum untuk Lapisan Batas	87
D. Persamaan untuk Permukaan Lapisan Batas	89
E. Gaya Seret dan Gaya Angkat	92
F. Pengukur Laju Aliran Pipa.....	127
DAFTAR PUSTAKA.....	137

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Dimensi besaran fisik yang digunakan dalam mekanika fluida.....	1
Tabel 3.1 Persamaan Empiris untuk Koefisien Drag Pelat datar Persamaan Kondisi aliran	104
Tabel 3.2 Koefisien drag untuk bilangan reynolds kecil ($Re = \rho U D / \mu$, $A = \pi D^2 / 4$)	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran antara dua plat paralel.....	9
Gambar 2.2 Couette flow dan Poiseuille flow	10
Gambar 2.3 Daerah masuk aliran mulai dan sedang berkembang penuh didalam sebuah pipa.....	12
Gambar 2.4 Gerakan elemen fluida silindris di dalam sebuah pipa	13
Gambar 2.5 Diagram benda bebas dari silinder fluida	13
Gambar 2.6 Distribusi tegangan geser pada fluida didalam sebuah pipa (aliran laminer atau turbulen) dan profil-profil kecepatan yang khas.....	14
Gambar 2.7 Diagram benda bebas dari silinder fluida untuk aliran dalam pipa yang tidak horizontal.....	17
Gambar 2.8 Distribusi tekanan sepanjang pipa horizontal.....	19
Gambar 2.9 Struktur aliran turbulen didalam sebuah pipa (a) tegangan geser; (b) Kecepatan rata-rata.....	20
Gambar 2.10 Struktur khas dari profil kecepatan turbulen didalam sebuah pipa .	21
Gambar 2.11 Eksponen, n , untuk profil kecepatan hukum pangkat.....	22
Gambar 2.12 Profil kecepatan aliran laminer dan turbulen yang khas	22
Gambar 2.13 Aliran melalui filamen arus	23
Gambar 2.14 Kontrol volume pada percabangan pipa	28
Gambar 2.15 Diagram skematik elemen dasar sebuah pompa sentrifugal.....	30
Gambar 2.16 (a) Impeler terbuka, (b) impeler tertutup atau terselubung.....	31
Gambar 2.17 Diagram kecepatan pada sisi masuk dan keluar impeler pompa sentrifugal	33
Gambar 2.18 Efek kerugian pada kurva head-laju aliran pompa.....	37
Gambar 2.19 Penyusunan ekperimental yang umum untuk menghitung kenaikan head yang diterima fluida yang mengalir melalui pompa	39
Gambar 2.20 Contoh karakteristik unjuk kerja pompa sentrifugal dengan ukuran tertentu yang beroperasi pada kecepatan impeler konstan	41
Gambar 2.21 Kurva unjuk kerja pompa sentrifugal dua tingkat yang beroperasi pada kecepatan 3500 rpm.	42
Gambar 2.22 Skematik instalasi pompa dimana pompa harus mengangkat/ memindahkan fluida dari satu ketinggian ke ketinggian lain.....	43
Gambar 2.23 Contoh umum sebuah sistem aliran.....	45
Gambar 2.24 Pemanfaatan dari suatu kurva sistem dan kurva unjuk kerja pompa untuk memperoleh titik operasi bagi sistem.....	46
Gambar 2.25 Pengaruh operasi pompa untuk pemasangan secara (a) seri dan (b) paralel	47
Gambar 2.26 Contoh tipikal data unjuk kerja pompa sentrifugal (a) kurva karakteristik pompa sentrifugal dengan diameter impeller 12 in,	

pada putaran operasi 1000 rpm, (b) kurva karakteristik tak berdimensi.....	49
Gambar 2.27 Variasi kecepatan spesifik untuk jenis pompa	54
Gambar 2.28 Pipa dalam hubungan seri	55
Gambar 2.29 Pipa seri	58
Gambar 2.30 Pipa hubungan paralel.....	61
Gambar 2.31 Pipa paralel	62
Gambar 2.32 Pipa menghubungkan tiga kolam	66
Gambar 2.33 Pipa bercabang	68
Gambar 2.34 Interpolasi untuk menentukan pemisalan debit	70
Gambar 2.35 Interpolasi untuk menentukan pemisalan debit	71
Gambar 2.36 Contoh suatu jaringan pipa	73
Gambar 2.37 Jaringan pipa.....	76
Gambar 2.38 Jaringan pipa.....	77
Gambar 2.39 Debit terkoreksi	78
Gambar 2.40 Debit hasil hitungan.....	80
Gambar 3.1 (a) Detil utama dari lapisan batas. (b) Pemilihan dari sumbu koordinat.....	84
Gambar 3.2 (a) Distribusi kecepatan untuk aliran turbulen dalam suatu batas. δ_d dan δ_{99} adalah parameter untuk ketebalan lapisan batas; (b) Distribusi kecepatan dalam lapisan batas laminar dengan distribusi kecepatan “turbulen” yang ditunjukkan dengan titik-titik perbandingan.....	86
Gambar 3.3 (a) Volume kendali untuk pemakaian prinsip momentum; (b) Profil kecepatan pada PQ	87
Gambar 3.4 (a) Aliran melewati sebuah mobil ukuran penuh di dalam terowongan angin laboratorium aerodinamika GM, dengan penampang uji berukuran 18 x 34 ft yang digerakkan oleh fan berdiameter 43 ft dan daya 4000 hp) (b) Aliran permukaan pada sebuah model kendaraan seperti yang diindikasikan oleh tuft yang dipasangkan pada permukaan.....	93
Gambar 3.5 Klasifikasi aliran: (a) dua dimensi (b) simetri sumbu, (c) tiga dimensi	94
Gambar 3.6 Distorsi dari partikel fluida ketika mengalir didalam lapisan batas....	95
Gambar 3.7 Karakter aliran viskos, tunak melewati sebuah plat datar sejajar terhadap kecepatan hulu: (a) aliran dengan bilangan reynolds rendah (b) aliran dengan bilangan reynolds sedang (c) aliran dengan bilangan Reynolds besar	96
Gambar 3.8 Ketebalan lapis batas (a) ketebalan lapis batas standar; (b) Ketebalan perpindahan lapisan batas.....	97

Gambar 3.9 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan, (b) gaya viskos, (c) gaya resultan (lift dan drag)	100
Gambar 3.10 Gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda	101
Gambar 3.11 Koefisien drag gesek untuk sebuah pelat datar yang sejajar dengan aliran hulu	104
Gambar 3.12 Koefisien drag untuk elips dengan luas karakteristik berupa luas frontal $A = bd$ atau luas planform, $A = b\ell$	107
Gambar 3.13 Dua benda yang ukurannya sangat jauh berbeda namun memiliki gaya drag yang sama; (a) silinder bundar $C_D = 1,2$; 9b) strut streamlined, $C_D = 0,12$	107
Gambar 3.14 (a) koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan reynolds untuk silinder bundar licin dan bola licin	110
Gambar 3.15 (b) (lanjutan) Pola aliran yang khas dari aliran yang melewati sebuah silinder bundar pada berbagai bilangan Reynolds seperti yang ditunjukkan pada (a).....	110
Gambar 3.16 Karakter dari koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan reynolds untuk benda-benda dengan berbagai tingkat streamlining, dari sebuah plat datar tegak lurus terhadap aliran hulu sampai pelat datar sejajar dengan aliran (aliran dua dimensi)	111
Gambar 3.17 koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan mach untuk benda dua dimensi dalam aliran subsonik.....	112
Gambar 3.18 koefisien drag sebagai fungsi dari bilangan Mach untuk aliran supersonik.....	113
Gambar 3.19 Efek dari kekasaran permukaan pada koefisien drag pada sebuah bola dalam kisaran bilangan Reynolds di mana lapisan batas laminar menjadi turbulen.....	114
Gambar 3.20 Data koefisien drag yang khas sebagai fungsi dari bilangan Froude dan karakteristik lambung kapal untuk bagian drag yang disebabkan oleh timbulnya gelombang	116
Gambar 3.21 Kecenderungan dari streamlining kendaraan untuk mengurangi drag aerodinamiknya dan meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar mil per galonnya	117
Gambar 3.22 Beberapa koefisien drag untuk benda-benda tiga dimensi beraturan	118
Gambar 3.23 Beberapa koefisien drag untuk benda-benda tiga dimensi beraturan	120
Gambar 3.24 Beberapa koefisien drag untuk benda-benda tiga dimensi beraturan	121
Gambar 3.25 Distribusi tekanan pada permukaan mobil.....	122
Gambar 3.26 Airfoil simetris dan nonsimetris.....	123

Gambar 3.27 Data koefisien lift dan drag yang khas sebagai fungsi dari sudut serang dan rasio aspek airfoil (a) koefisien lift (b) koefisien drag..	124
Gambar 3.28 Dua cara penyajian dari data lift dan drag yang sama untuk suatu jenis airfoil: (a) rasio lift terhadap drag sebagai fungsi dari sudut serang, dengan mulai terjadinya separasi lapisan batas pada permukaan atas yang ditunjukkan oleh terjadinya stall (b) diagram polar lift dan drag dengan berbagai sudut Serang	125
Gambar 3.29 Perubahan lift dan drag yang mungkin dengan menggunakan berbagai jenis desain flap	126
Gambar 3.30 Geometri yang umum dari alat ukur aliran pipa	127
Gambar 3.31 Konstruksi orifis meter yang khas.....	128
Gambar 3.32 Koefisien discharge orifis meter.....	129
Gambar 3.33 Kontruksi nossel meter yang khas	129
Gambar 3.34 Koefisien discharge nossel meter	129
Gambar 3.35 Konstruksi Venturi meter	130
Gambar 3.36 Koefisien discharge Venturi meter.....	131
Gambar 3.37 Alat ukur aliran jenis Rotameter.....	132
Gambar 3.38 Alat ukur aliran jenis turbin.....	132
Gambar 3.39 Nutating disk flow meter.....	134
Gambar 3.40 Alat ukur jenis bellow (a) pengosongan kantong belakang, pengisian diafragma belakang. (b) Pengisian diafragma depan, pengosongan kantong depan. (c) Pengisian kantong belakang, pengosongan diafragma belakang. (d) Pengosongan diafragma depan, pengisian kantong depan.....	134



BAB I

ANALISA DIMENSI DAN KESAMAAN

A. Dimensi dan Satuan

Dimensi-dimensi dalam mekanika adalah gaya, massa, panjang dan waktu. Dimensi-dimensi

$$F = m \times a$$

Bila hukum Newton kedua diatas dibentuk dalam dimensionalnya adalah:

$$F = M L T^{-2}$$

Yang menunjukkan bahwa hanya tiga dari dimensi-dimensi tersebut yang bebas adalah : F ialah dimensi gaya, M dimensi massa, L dimensi panjang dan T dimensi waktu. Suatu sistem yang lazim dipakai dalam analisis dimensional adalah sistem MLT.

Tabel 1.1 Dimensi besaran fisik yang digunakan dalam mekanika fluida

Besaran	Lambang	Dimensi
Panjang	l	L
Waktu	t	T
Massa	m	M
Gaya	F	MLT^{-2}
Kecepatan	v	LT^{-1}
Percepatan	a	LT^{-2}
Luas	A	L^2
Debit	Q	L^3T^{-1}
Tekanan	Δp	$ML^{-1}T^{-2}$
Gravitasi	g	LT^{-2}
Kerapatan	ρ	ML^{-3}
Berat jenis	γ	$ML^{-2}T^{-2}$
Viskositas dinamik	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Viskositas kinematik	ν	L^2T^{-1}
Tegangan permukaan	σ	MT^{-2}
Modulus elastisitas curahan	K	$ML^{-1}T^{-2}$

B. Teori Buckingham Pi (dalil Pi)

Bahwa dalam suatu soal fisik yang menyangkut n besaran dimana terdapat m dimensi, besaran-besaran tersebut dapat diatur dalam $n-m$ parameter tanpa dimensi yang bebas. Dengan $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ di maksudnya besaran-besaran yang bersangkutan itu, seperti tekanan, viskositas, kecepatan dan sebagai berikut. Kita ketahui bahwa semua besaran-besaran tersebut mutlak perlu bagi penyelesaian soal itu, maka harus terdapat suatu hubungan fungsional.

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0$$

Jika $\pi_1, \pi_2, \dots$ menunjukkan kelompok-kelompok tanpa dimensi dari besaran-besaran $A_1, A_2, A_3, \dots$ maka dengan tersangkutnya m dimensi, terdapat persamaan yang berbentuk

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

Metoda untuk menentukan parameter-parameter π tersebut ialah dengan memilih m buah besaran A tersebut, dengan dimensi-dimensi yang berlainan, dengan diantaranya terkandung m dimensi tersebut dan dengan menggunakan besaran-besaran itu sebagai variabel-variabel yang berulang bersama salah satu besaran A lainnya untuk masing-masing π .

Contoh 1.1

Misalkan A_1, A_2, A_3 mengandung M, L dan T , yang tidak usah dalam tiap besaran A , tetapi secara kolektif. Maka parameter π yang pertama tersusun sebagai :

$$\Pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4$$

Yang kedua sebagai

$$\Pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_4$$

Dan seterusnya sampai

$$\Pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_4$$

Dalam persamaan-persamaan ini pangkat-pangkat harus ditentukan sedemikian hingga tiap π tidak berdimensi. Kita masukan dimensi-dimensi besaran-besaran A, kemudian pangkat-pangkat M, L, dan T masing-masing disamakan dengan nol. Hal ini menghasilkan tiga persamaan dalam tiga anu untuk tiap parameter π , sehingga kita dapat menentukan pangkat-pangkat x, y dan z dan kemudian parameter π .

Langkah-langkah dalam analisa dimensional adalah:

1. Pilih variabel-variabel yang berhubungan satu sama lain. Pekerjaan ini memerlukan pengetahuan tentang proses yang bersangkutan.
2. Tuliskan hubungan fungsionalnya misal:

$$F(v, D, \rho, \mu, c, H) = 0$$

3. Pilihlah variabel-variabel yang berulang (besaran yang tidak bebas jangan dijadikan variabel berulang). Hendaknya variabel-variabel ini mengandung segenap m dimensi dalam soal yang bersangkutan.
4. Tuliskan parameter-parameter π sebagai fungsi pangkat-pangkat yang tidak diketahui misalnya:

$$\pi_1 = V x_1^a D y_1^b \rho z_1^c \mu = (L T^{-1}) x_1^a L y_1^b (M L^{-3})^c M L^{-1} T^{-1}$$

5. Untuk semua rumusan π , tuliskan persamaan-persamaan pangkat-pangkatnya sedemikian hingga jumlah pangkat masing-masing dimensi sama dengan nol.
6. Selesaikan persamaan-persamaan tersebut secara serentak
7. Masukan pangkat-pangkat kembali kedalam rumusan-rumusan π dari langkah 4 untuk memperoleh parameter-parameter π tanpa dimensi.
8. Tetapkan hubungan fungsional

$$F_1(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

Atau selesaikan untuk memperoleh salah satu π secara eksplisit: $\pi_2 = f(\pi_1, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$

9. Jika dikehendaki, gabung-gabungkan ulang untuk mengubah bentuk parameter-parameter π , dengan mempertahankan jumlah parameter bebas yang sama.

Contoh 1.2.

Debit melalui sebuah tabung kapiler horisontal diperkirakan bergantung pada jatuh tekan per panjang satuan, garis tengah dan viskositas.

Besaran	Lambang	Dimensi
Debit	Q	$L^3 T^{-1}$
Jatuh tekanan per panjang	$\Delta p/l$	$ML^{-2} T^{-2}$
Garis-tengah	D	L
Viskositas	μ	$ML^{-1} T^{-1}$

Carilah bentuk persamaannya.

Jawab:

Bentuk sebuah fungsi ;

$$F(Q, \Delta p/l, D, \mu) = 0$$

Kita menggunakan tiga dimensi, dan dengan empat besaran akan terdapat sebuah parameter π :

$$\Pi = Q^{x_1} (\Delta p/l)^{y_1} D^{z_1} \mu$$

Kita masukan dimensi-dimensinya

$$\Pi = (L^3 T^{-1})^{x_1} (M L^{-2} T^{-2})^{y_1} L^{z_1} M L^{-1} T^{-1} = M^0 L^0 T^0$$

Pangkat masing-masing dimensi harus sama pada kedua ruas persamaan diatas. Pertama-tama (L)

$$3x_1 - 2y_1 + z_1 - 1 = 0$$

Dan demikian juga untuk M dan T

$$y_1 + 1 = 0$$

$$-x_1 - 2y_1 - 1 = 0$$

Kita selesaikan persamaan diatas didapat :

$$y_1 = -1$$

$$x_1 = 1 \text{ dan } z_1 = -4$$

Maka:

$$\pi = \frac{Q\mu}{D^4\left(\frac{\Delta p}{L}\right)}$$

Penyelesaian untuk Q adalah:

$$Q = c \frac{\Delta p D^4}{l\mu}$$

Dari hasil analisis dimensional tidak memberi keterangan tentang nilai angka π konstanta tanpa dimensi C. Dari hasil eksperimen menunjukkan nilai $c = \frac{\pi}{128}$

C. Perlunya Kelompok Tanpa Dimensi dalam Mekanika Fluida

Kedelapan parameter tanpa dimensi dalam mekanika fluida antara lain:

1. Koefisien tekanan
2. Bilangan reynolds
3. Bilangan Froude
4. Bilangan Euler
5. Bilangan Cauchy
6. Bilangan Mach
7. Bilangan Strouhal
8. Bilangan Weber

Ke delapan bilangan tak berdimensi ini sangat peting dalam mekanika fluida, koefisien tekanan digunakan pada fitting seperti pada bending (belokan), combining (penggabungan aliran), dividing (pembagian aliran) yang masing-masing nilai koefisien kerugiannya berbeda besarnya untuk masing-masing fitting.

1. Koefisien kerugian dirumuskan sebagai berikut :

$$k = \frac{\Delta h}{V^2/2g}$$

Dimana:

Δh = selisih tekanan m

V = kecepatan m/s

g = gaya gravitasi m/s²

2. *Bilangan Reynolds*

Digunakan untuk menganalisa jenis-jenis aliran yaitu aliran laminar, transisi dan turbulen. Bilangan Reynolds dirumuskan sebagai :

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu}$$

Dengan :

ρ = massa jenis (kg/m^3)

V = kecepatan m/s

l = panjang pipa m

μ = viskositas N. s/m^2

3. *Bilangan Frode*

adalah ukuran dari suatu rasio gaya inersia pada suatu elemen fluida terhadap berat elemen. Aplikasi aliran dengan permukaan bebas, dimana gravitasi banyak berpengaruh pada aliran ini.

$$Fr = \frac{V}{\mu \sqrt{gl}}$$

Dengan:

V = kecepatan m/s

g = gaya gravitasi m/s^2

l = panjang m

4. *Bilangan Euler*

sebagai ukuran rasio gaya tekan terhadap gaya inersia. Bilangan Euler akan digunakan dalam persoalan dimana tekanan atau perbedaan tekanan antara dua titik merupakan variabel yang penting. Bilangan Euler dirumuskan sebagai

$$Eu = \frac{p}{\rho V^2}$$

Dengan:

E = Tekanan karakteristik dalam sebuah bidang aliran m

ρ = massa jenis kg/m^3

v = kecepatan m/s

5. *Bilangan Cauchy*

merupakan bilangan yang penting dalam soal dimana kemampumampatan adalah faktor yang penting.

$$Ca = \frac{pV^2}{E_v}$$

Dengan:

E_v = bilangan Cauchy

6. *Bilangan Mach*

Digunakan dalam soal fluida mampu mampat, khususnya dalam bidang gas dinamika dan aerodinamika.

$$M_a = \frac{V}{c}$$

Dengan :

c =kecepatan suara

7. *Bilangan Strouhal*

Adalah parameter tanpa dimensi yang penting digunakan dalam aliran tidak tunak (unsteady), soal aliran yang berosilasi yang frekuensinya ω . Bilangan ini menunjukkan ukuran dari gaya rasio inersia akibat ketidak tunakan aliran (percepatan lokal) terhadap gaya inersia akibat perubahan kecepatan dari satu titik ke titik lain dalam aliran kecepatan konvektif. Dirumuskan sebagai :

$$St = \frac{wl}{v}$$

8. *Bilangan Weber*

penting dalam persoalan dimana terdapat dua fluida yang bersinggungan permukaannya. Bilangan weber dianggap sebagai indek gaya inersia terhadap gaya tegangan permukaan yang bekerja pada permukaan elemen.

$$We = \frac{pV^2l}{\sigma}$$

LATIHAN

1. Yang mana di antara yang berikut ini mempunyai bentuk bilangan Reynolds?

(a) $\frac{ul}{\nu}$ (b) $\frac{VD\mu}{\rho}$ (c) $\frac{uv}{l}$ (d) $\frac{V}{gD}$ (e) $\frac{\Delta p}{\rho V^2}$

2. Bilangan Reynolds dapat didefinisikan sebagai perbandingan (a) gaya viskos terhadap gaya lembam; (b) gaya viskos terhadap gaya berat; (c) gaya berat terhadap gaya lembam; (d) gaya elastik terhadap gaya tekanan; (e) tiada di antara jawaban-jawaban ini.

3. Kerugian $\Delta p/l$ dalam aliran turbulen melalui pipa horisontal yang licin bergantung pada kecepatan V , garis tengah D , viskositas dinamik μ , dan kerapatan ρ . Gunakanlah analisis dimensional untuk menentukan bentuk umum persamaan :

$$F\left(\frac{\Delta p}{l}, V, D, \rho, \mu\right) = 0$$

4. Bilangan Reynolds, $\rho VD/\mu$, merupakan parameter yang penting dalam ilmu mekanika fluida. Dengan memakai sistem FLT dan MLT sebagai dimensi dasar buktikan bahwa bilangan Reynolds tak-berdimensi, dan hitunglah besarnya Re untuk air (pada suhu 70°C) yang mengalir dengan kecepatan 2 m/s melalui pipa berdiameter 2 in .

5. Apa dimensi kerapatan, tekanan, berat spesifik, tegangan permukaan, viskositas dinamik dalam (a) sistem FLT, dan (b) sistem MLT?

BAB II

ALIRAN INTERNAL KENTAL DAN TAK TERMAMPATKAN

A. Pendahuluan

Aliran fluida internal tak mampu mampat adalah aliran di dalam suatu laluan yang penampangnya berupa kurva tertutup dan massa jenis fluida sepanjang medan aliran adalah tetap, tidak berubah. Pembahasan aliran ini dibagi menjadi 2 berdasarkan pengaruh gesekan atau viskositasnya yaitu aliran tanpa gesekan dan yang bergesekan.

B. Aliran Laminer Berkembang Penuh diantara Dua Plat Datar

Untuk menguraikan rumus aliran antara dua plat dimulai dari persamaan Navier-Stokes untuk fluida yang incompressibel, ditulis dalam komponen-komponen kartesian untuk arah sumbu x, y dan z adalah sebagai berikut persamaan 1):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$

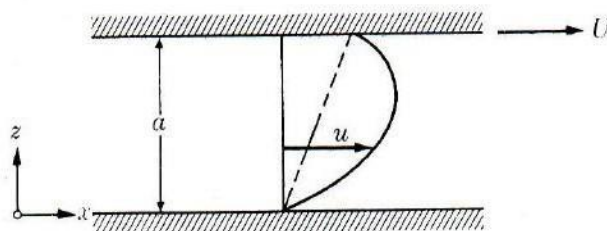
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

Asumsi :

Aliran 2 dimensi, steady, aliran laminer dan fluida incompressibel

Plat bagian atas bergerak dengan kecepatan U pada arah x relatif terhadap plat yang ada dibawahnya seperti ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Aliran antara dua plat paralel

Analisis:

- 1) Untuk 2 dimensi berarti kecepatan v dan semua turunan terhadap y adalah 0 (nol)
- 2) Sumbu (z) dengan arah vertikal h , oleh karena itu $\partial h / \partial x = 0$ dan $\partial h / \partial z = 1$.
- 3) Aliran stedi maka turunan terhadap waktu nol $\partial u / \partial t = 0$ dan $\partial w / \partial t = 0$
- 4) Aliran dalam arah (x), maka arah- w dan semua turunannya adalah nol
- 5) Dari persamaan kontinuitas $\partial u / \partial x = 0$ pada sumbu- x dan oleh karena itu $\partial^2 u / \partial x^2 = 0$

Karena asumsi diatas maka persamaan gerak (equations motion) untuk arah (x) dan z menjadi:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \frac{\mu}{\rho} * \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad 2)$$

$$0 = -g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad 3)$$

Kemudian persamaan 3) untuk arah (z)

$$P = -\gamma z + f(x) \quad 4)$$

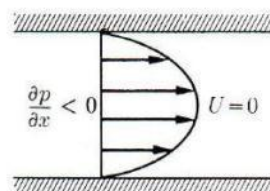
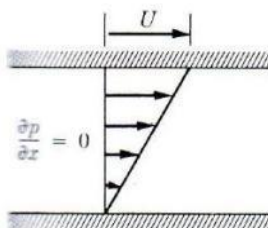
Karena $\partial p / \partial x$ tidak bergantung pada z , maka bisa ditulis dp / dx . Kemudian persamaan 2) di integralkan dua kali menjadi

$$\frac{dp}{dx} \frac{z^2}{2} == \mu u + C_1^z + C_2 \quad 5)$$

Dengan menggunakan kondisi batas,

$Z = 0$, pada $u = 0$

$Z = a$, pada $u = U$



Gambar 2.2 Coutte flow dan Poiseuille flow

Dengan memasukan kondisi batas diatas pada persamaan 5) diperoleh

$$u = \frac{U_z}{a} - \frac{az}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left(1 - \frac{z}{a}\right) \quad 6)$$

Jika $dp/dx = 0$ karena alirannya adalah Couette flow maka distribusi kecepatannya adalah

$$u = \frac{U_z}{a} \quad 7)$$

Jika $U = 0$, aliran paralel diantara dua plat tetap (Poiseuille Flow) sebagai aliran Poiseuille dua dimensi. Distribusi kecepatannya adalah parabolis dengan kecepatan maksimum pada $z = a/2$ maka:

$$u_{max} = \frac{-a^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad 8)$$

Kecepatan rata-ratanya Q/A adalah

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2}{3} u_{max} = \frac{-a^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad 9)$$

C. Aliran Laminer Berkembang Penuh di dalam Pipa

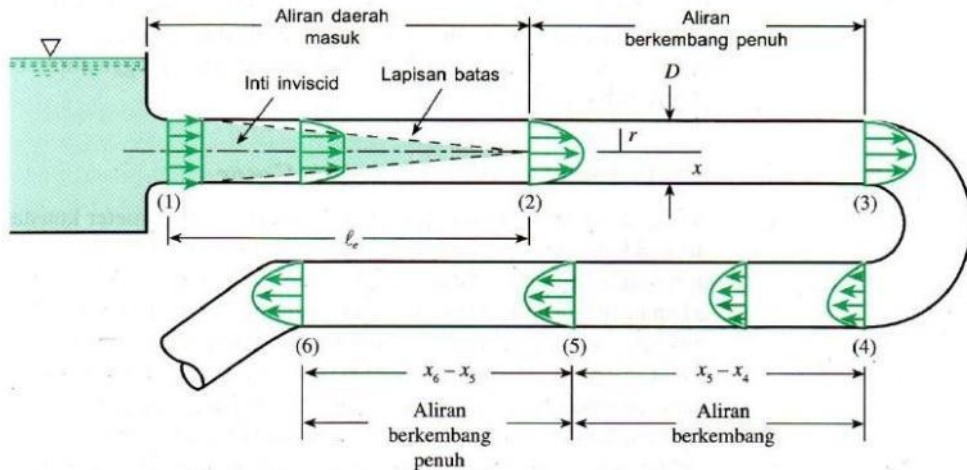
Setiap fluida yang mengalir dalam sebuah pipa harus memasuki pipa pada suatu lokasi. Daerah aliran didekat lokasi fluida memasuki pipa disebut sebagai daerah masuk (entrance region) dan diilustrasikan pada gambar 2.3. Daerah tersebut mungkin sekitar beberapa kaki permulaan dari sebuah pipa yang dihubungkan pada sebuah tangki atau bagian awal dari saluran duct udara panas yang berasal dari sebuah tungku.

Sebagaimana ditunjukan pada gambar 2.3, fluida biasanya memasuki pipa dengan profil kecepatan yang hampir seragam pada bagian (1). Selagi fluida bergerak melewati pipa, efek viskositas menyebabkan tetap menempel pada dinding pipa (kondisi lapisan batas tanpa selip). Hal ini berlaku baik jika fluidanya adalah udara yang relatif inviscid atau minyak yang sangat viskos. Bentuk dari profil kecepatan di dalam pipa bergantung pada apakah aliran laminer atau turbulen, sebagaimana pula panjang daerah masuk, ℓ_e . Panjang masuk pada umumnya diberikan oleh hubungan:

$$\frac{l_e}{D} = 0,06 Re \text{ untuk aliran laminar} \quad 10)$$

dan

$$\frac{l_e}{D} = 4,4 (Re)^{1/6} \text{ untuk aliran turbulen} \quad 11)$$



Gambar 2.3 Daerah masuk aliran mulai dan sedang berkembang penuh didalam sebuah pipa

Untuk aliran-aliran dengan bilangan reynolds sangat rendah panjang masuk dapat sangat pendek ($l_e = 0,6D$ jika $Re = 10$), sementara untuk aliran-aliran dengan bilangan Reynolds besar daerah masuk tersebut dapat sepanjang berkali-kali diameter pipa sebelum ujung akhir dari daerah masuk dicapai ($l_e = 120D$ untuk $Re = 2000$). Untuk banyak masalah-masalah teknik praktis $10^4 < Re < 10^5$ sehingga $20D < l_e < 30D$.

Terdapat banyak cara untuk menurunkan hasil-hasil penting yang berkaitan dengan aliran laminar berkembang penuh. Tiga alternatif meliputi:

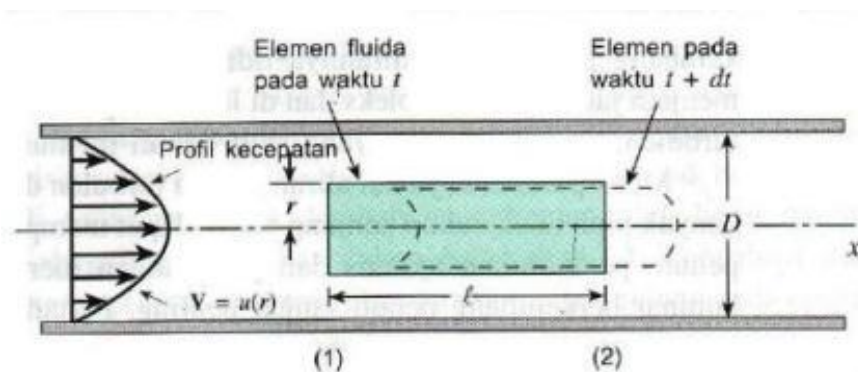
- 1) Dari penerapan langsung $F = ma$ pada elemen fluida
- 2) Dengan persamaan Navier stokes mengenai gerak
- 3) Dari metode analisis dimensional

Disini akan dibahas dengan menggunakan alternatif yang pertama, yaitu dengan penerapan hukum Newton pertama $F = ma$. Kita tinjau elemen fluida pada saat t seperti ditunjuk pada gambar 2.4. Elemen tersebut adalah silinder bundar fluida dengan panjang ℓ dan jari-jari r yang terpusat pada sumbu sebuah pipa horisontal

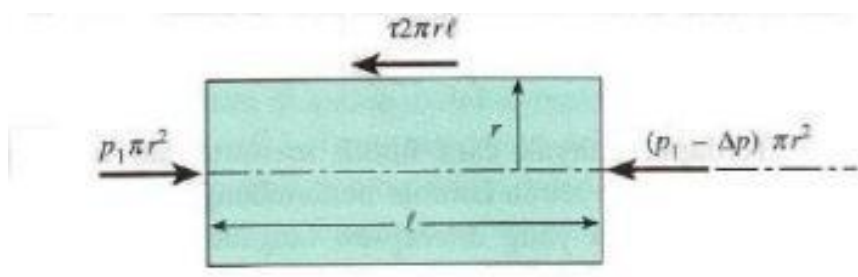
D. Karena kecepatan tidak seragam pada seluruh penampang pipa, silinder fluida yang semula berujung rata pada waktu t menjadi berubah bentuk pada waktu $t + \delta t$ ketika elemen fluida tersebut telah berpindah ke lokasi barunya sepanjang pipa seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Asumsi yang diambil adalah:

- 1) Aliran berkembang penuh (tunak)
- 2) Perubahan bentuk pada setiap ujung elemen fluida tersebut sama
- 3) Tidak ada bagian dari fluida yang mengalami percepatan selagi mengalir
- 4) Efek gravitasi diabaikan
- 5) Tekanan konstan sepanjang penampang vertikal
- 6) Fluida tidak mengalami percepatan ($a_x = 0$)



Gambar 2.4 Gerakan elemen fluida silindris di dalam sebuah pipa



Gambar 2.5 Diagram benda bebas dari silinder fluida

Perbedaan tekanan yang bekerja pada ujung silinder dengan luas πr^2 , dan tegangan geser bekerja pada permukaan selimut silinder dengan luas $2\pi r\ell$. Maka kesetimbangan gaya dapat dituliskan sebagai :

$$(p_1)\pi r^2 - (p_1 - \Delta p)\pi r^2 - (\tau)2\pi r\ell = 0$$

Kemudian disederhanakan menjadi :

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2\tau}{r} \quad 12)$$

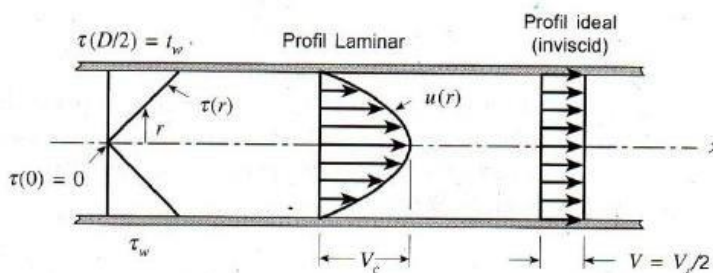
Karena baik Δp maupun l bukanlah fungsi dari koordinat radial (r), maka $2\tau/r$ pasti juga tidak bergantung pada r . Artinya, $\tau = Cr$, dimana C adalah sebuah konstanta. Pada $r = 0$ (sumbu pipa) tidak ada tegangan geser ($\tau = 0$). Pada $r = D/2$ (dinding pipa), tegangan geser maksimum, dinyatakan dengan τ_w , tegangan geser dinding. Jadi, $C = 2\tau_w/D$ dan distribusi tegangan geser di seluruh pipa adalah fungsi linier dari koordinat radial

$$\tau = \frac{2\tau_w r}{D} \quad 13)$$

Jika viskositas nol tidak akan ada tegangan geser dan tekanan akan konstan di seluruh pipa horizontal tersebut ($\Delta p = 0$). Kemudian dari persamaan 12) dan 13) maka penurunan dan tegangan geser dihubungkan oleh:

$$\Delta p = \frac{4l\tau_w}{D} \quad 14)$$

Sebuah tegangan geser yang kecil dapat menghasilkan perbedaan tekanan yang besar jika pipa relatif panjang ($l/D \gg 1$).



Gambar 2.6 Distribusi tegangan geser pada fluida didalam sebuah pipa (aliran laminar atau turbulen) dan profil-profil kecepatan yang khas

Untuk aliran laminar dari fluida Newtonian, tegangan geser secara sederhana sebanding dengan gradien kecepatan " $\tau = \mu du/dy$ ". Dengan notasi yang sesuai untuk aliran pipa, hubungan ini menjadi:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad 15)$$

Tanda negatif disertakan untuk memberikan nilai $\tau > 0$ dengan $du/dr < 0$ (kecepatan berkurang dari sumbu ke arah dinding pipa).

Kombinasi antara persamaan 12) hukum kedua Newton mengenai gerak dengan 15) definisi dari sebuah fluida Newtonian menghasilkan:

$$\frac{du}{dr} = - \left(\frac{\Delta p}{2\mu l} \right) r \quad 16)$$

Kemudian di integralkan sehingga menjadi :

$$\int du = - \frac{\Delta p}{2\mu l} \int r dr \quad 17)$$

Hasil dari integral menjadi

$$u = - \left(\frac{\Delta p}{4\mu l} \right) r^2 + C_1 \quad 18)$$

Note: C_1 adalah konstanta

Karena fluida viskos, maka fluida tersebut menempel pada dinding pipa sehingga $u = 0$ pada $r = D/2$, maka $C_1 = (\Delta p / 16\mu l) D^2$. Jadi profil kecepatan dapat ditulis sebagai :

$$u(r) = \left(\frac{\Delta p D^2}{16\mu l} \right) \left[1 - \left(\frac{2r}{D} \right)^2 \right] = V_c \left[1 - \left(\frac{2r}{D} \right)^2 \right] \quad 18)$$

note: $V_c = \Delta p D^2 / (16\mu l)$ adalah kecepatan disumbu tengah

Persamaan alternatif dapat dituliskan dengan menggunakan hubungan antara tegangan geser dinding dengan gradien tekanan persamaan (14) dengan (18) sehingga memberikan :

$$u(r) = \frac{\tau_w D}{4\mu} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

note: $R = D/2$ adalah jari-jari pipa

Laju aliran volume melalui pipa dapat diperoleh dengan mengintegrasikan profil kecepatan diseluruh penampang pipa. Karena alirannya simetris terhadap sumbu tengah, kecepatan akan konstan pada luas daerah kecil yang membentuk cincin dengan jari-jari r dan ketebalan dr . Jadi,

$$Q = \int u \, dA = \int_{r=0}^{r=R} u(r) 2\pi r \, dr = 2\pi V_c \int_0^R \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] r \, dr$$

Atau

$$Q = \frac{\pi R^2 V_c}{2}$$

Menurut definisi kecepatan rata-rata adalah laju aliran dibagi dengan luas penampang $V = Q/A = Q/\pi r^2$, sehingga untuk aliran ini

$$V = \frac{\pi R^2 V_c}{2\pi R^2} = \frac{V_c}{2} = \frac{\Delta p D^2}{32\mu l} \quad 19)$$

Dan

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128\mu l} \quad 20)$$

Dari hasil diatas dapat disimpulkan untuk aliran pipa laminar pada sebuah pipa horisontal adalah :

- ✓ Berbanding langsung dengan penurunan tekanan (Δp)
- ✓ Berbanding terbalik dengan viskositas
- ✓ Berbanding terbalik dengan panjang pipa
- ✓ Berbanding langsung dengan pangkat empat diameter pipa.

Kesetimbangan gaya pada sebuah pipa miring dengan sudut θ pada gambar 2.7 adalah:

$$(p + \Delta p)\pi r^2 - p\pi r^2 - \tau 2\pi r \ell - \gamma \pi r^2 \ell \sin\theta = 0 \quad 21)$$

Kemudian disederhanakan menjadi:

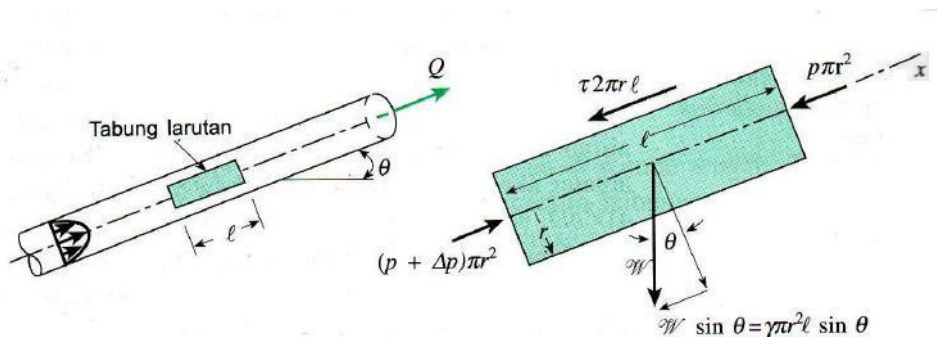
$$\frac{\Delta p - \gamma \ell \sin\theta}{l} = \frac{2\tau}{r} \quad 22)$$

Jadi seluruh hasil dari pipa horizontal berlaku apabila gradien tekanan disesuaikan terhadap suku elevasi, artinya Δp digantikan oleh $\Delta p - \gamma \ell \sin \theta$ sehingga:

$$V = \frac{(\Delta p - \gamma \ell \sin \theta) D^2}{32 \mu \ell} \quad 23)$$

Dan

$$Q = \frac{(\Delta p - \gamma \ell \sin \theta) D^4}{128 \mu \ell} \quad 24)$$



Gambar 2.7 Diagram benda bebas dari silinder fluida untuk aliran dalam pipa yang tidak horizontal

Contoh soal dan penyelesaiannya

Minyak dengan viskositas $\mu = 0,40 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ dan kerapatan $\rho = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$ mengalir dalam sebuah pipa berdiameter $D = 0,020 \text{ m}$. (a) Berapakah penurunan tekanan, $p_1 - p_2$ yang diperlukan untuk menghasilkan suatu laju aliran sebesar, $Q = 2,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ jika pipa horizontal dengan $x_1 = 0$ dan $x_2 = 10 \text{ m}$? (b) Berapa sudut kecuraman bukit, θ , dari minyak akan mengalir melalui pipa dengan laju aliran yang sama seperti (a), tetapi dengan $p_1 = p_2$?

Penyelesaian

(a) Jika bilangan Reynolds kurang dari 2100 aliran bersifat laminar dan persamaan-persamaan yang diturunkan pada subbab ini dapat berlaku. Karena kecepatan rata-rata adalah $V = Q/A = (2,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}) / [\pi (0,020)^2 \text{ m}^2/4] = 0,0637 \text{ m/s}$, maka bilangan Reynoldsnya adalah, $Re = \rho V D / \mu = 2,87 < 2100$. Jadi alirannya adalah laminar dan dari Persamaan 20) dengan $\ell = x_2 - x_1$, 10 m , penurunan tekanan adalah: