

# Bab

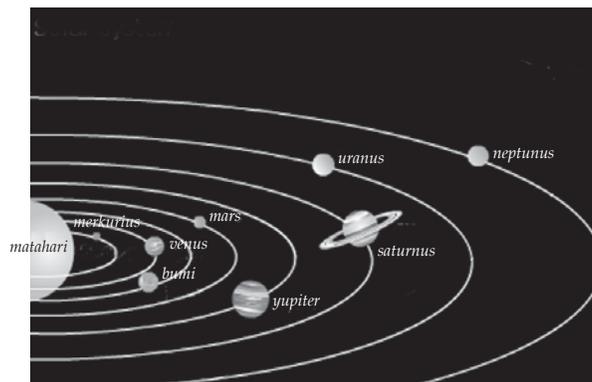
# II

## Gravitasi



### Tujuan Pembelajaran

- Anda dapat menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan hukum-hukum Newton.



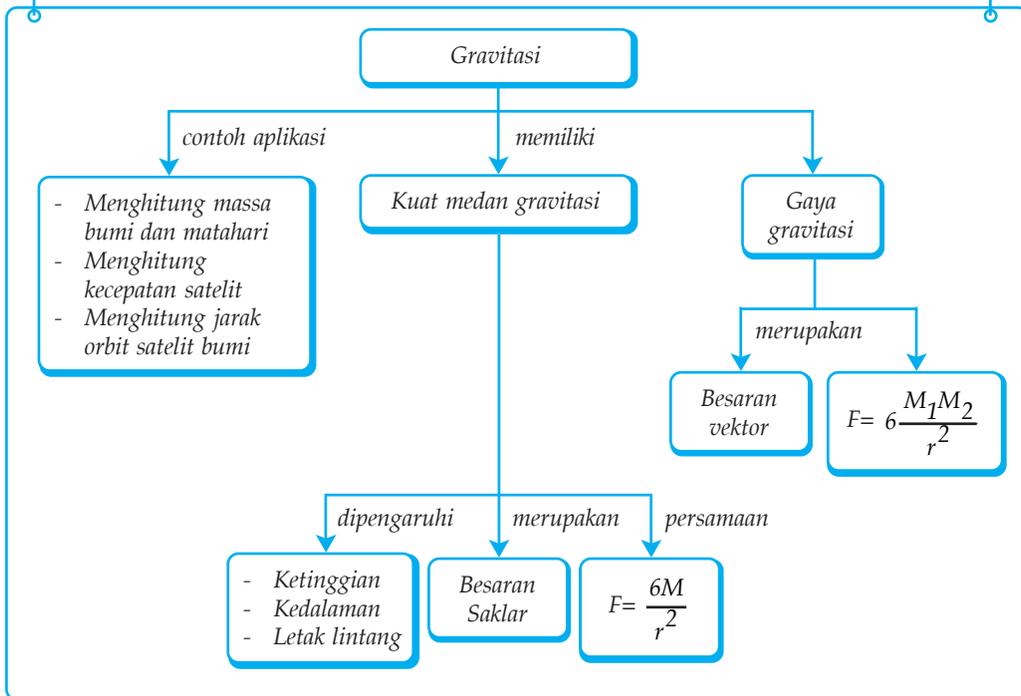
Sumber: Encarta Encyclopedia

Banyak keajaiban alam yang belum terkuak oleh manusia. Dahulu, kebanyakan orang mengira bahwa ada tiang tak terlihat yang menopang planet-planet di jagat raya. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, diketahui bahwa tiang-tiang tersebut bernama gravitasi.

### Kata Kunci

- Gaya Gravitasi
- Medan
- Hukum Kepler
- Medan Gravitasi
- Medan Gravitasi
- Neraca Cavendish
- Kuat Medan Gravitasi
- Hukum Gravitasi Newton
- Percepatan Gravitasi
- Medan
- Garis Medan Gravitasi

## Peta Konsep



Anda pasti sering melihat fenomena gravitasi dalam keseharian. Misalnya buah kelapa jatuh dari tangkainya dan batu yang Anda lempar ke atas akan kembali jatuh ke bumi. Semua itu terjadi karena adanya gravitasi yang dimiliki bumi. Apa itu gravitasi? Secara sederhana gravitasi dapat diartikan sebagai gaya tarik yang dimiliki suatu benda. Gravitasi ada disebabkan adanya massa yang dimiliki benda.

Gravitasi merupakan gaya interaksi fundamental yang ada di alam. Para perencana program ruang angkasa secara terus menerus menyelidiki gaya ini. Sebab, dalam sistem tata surya dan penerbangan ruang angkasa, gaya gravitasi merupakan gaya yang memegang peranan penting. Ilmu yang mendalami dinamika untuk benda-benda dalam ruang angkasa disebut *mekanika celestial*. Sekarang, pengetahuan tentang mekanika celestial memungkinkan untuk menentukan bagaimana menempatkan suatu satelit dalam orbitnya mengelilingi bumi atau untuk memilih lintasan yang tepat dalam pengiriman pesawat ruang angkasa ke planet lain.

Pada bab ini Anda akan mempelajari hukum dasar yang mengatur interaksi gravitasi. Hukum ini bersifat universal, artinya interaksi bekerja dalam cara yang sama di antara bumi dan tubuh Anda, di antara matahari dan planet, dan di antara planet dan satelitnya. Anda juga akan menerapkan hukum gravitasi untuk fenomena seperti variasi berat terhadap ketinggian orbit satelit mengelilingi bumi dan orbit planet mengelilingi matahari.

## A. Perkembangan Teori Gravitasi

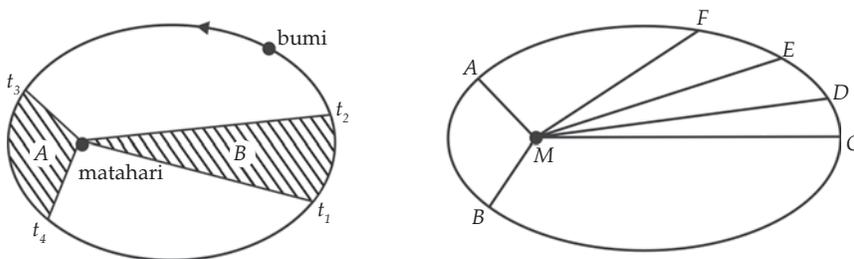
Sejak zaman Yunani Kuno, orang sudah berusaha menjelaskan tentang kinematika sistem tata surya. Oleh karena itu, sebelum membahas hukum gravitasi Newton, ada baiknya apabila Anda juga memahami pemikiran sebelum Newton menemukan hukum gravitasi.

Plato (427 – 347 SM) ilmuwan yunani mengemukakan bahwa bintang dan bulan bergerak mengelilingi bumi membentuk lintasan lingkaran sempurna. Claudius Ptolemaeus pada abad ke-2 M juga memberikan pendapat yang serupa yang disebut *teori geosentris*. Teori ini menyatakan bumi sebagai pusat tata surya, sedangkan planet lain, bulan dan matahari berputar mengelilingi bumi. Namun, pendapat dari kedua tokoh tersebut tidak dapat menjelaskan gerakan yang rumit dari planet-planet.

Nicolaus Copernicus, ilmuwan asal Polandia, mencoba mencari jawaban yang lebih sederhana dari kelemahan pendapat Plato dan Ptolemaeus. Ia mengemukakan bahwa matahari sebagai pusat sistem planet dan planet-planet lain termasuk bumi mengitari matahari. Anggapan Copernicus memberikan dasar yang kuat untuk mengembangkan pandangan mengenai tata surya. Namun, pertentangan pendapat di kalangan ilmuwan masih tetap ada. Hal ini mendorong para ilmuwan untuk mendapatkan data pengamatan yang lebih teliti dan konkret.

Tyco Brahe (1546–1601) berhasil menyusun data mengenai gerak planet secara teliti. Data yang Tyco susun kemudian dipelajari oleh Johannes Kepler (1571–1630). Kepler menemukan keteraturan-keteraturan gerak planet. Ia mengungkapkan tiga kaidah mengenai gerak planet, yang sekarang dikenal sebagai hukum I, II, dan III Kepler. Hukum-hukum Kepler tersebut menyatakan:

1. Semua planet bergerak di dalam lintasan elips yang berpusat di satu titik pusat (matahari).
2. Garis yang menghubungkan sebuah planet ke matahari akan memberikan luas sapuan yang sama dalam waktu yang sama.
3. Kuadrat dari periode tiap planet yang mengelilingi matahari sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet ke matahari.



**Gambar 2.1** Setiap planet bergerak dengan lintasan elips dan garis yang menghubungkan sebuah planet ke matahari akan memberikan luas sapuan yang sama dalam waktu yang sama ( $A = B$ ).

Pendapat Copernicus dan hukum Kepler memiliki kesamaan bahwa gaya sebagai penyebab keteraturan gerak planet dalam tata surya. Pada tahun 1687, Isaac Newton membuktikan dalam bukunya yang berjudul "Principia" bahwa gerakan bulan mengelilingi bumi disebabkan oleh pengaruh suatu gaya. Tanpa gaya ini bulan akan bergerak lurus dengan kecepatan tetap. (Sesuai dengan inersia), gaya ini dinamakan gaya gravitasi. Gaya gravitasi memengaruhi gerakan planet-planet dan benda-benda angkasa lainnya. Selain itu, gaya gravitasi juga penyebab mengapa semua benda jatuh menuju permukaan bumi. Pemikiran Newton merupakan buah karya luar biasa karena dapat menyatukan teori mekanika benda di bumi dan mekanika benda di langit. Hal ini dapat dilihat dari penjelasan mengenai gerak jatuh bebas dan gerak planet dalam tata surya.

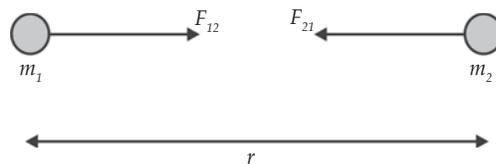
## B. Hukum Gravitasi Newton

Gravitasi bumi merupakan salah satu ciri bumi, yaitu benda-benda ditarik ke arah pusat bumi. Gaya tarik bumi terhadap benda-benda ini dinamakan gaya gravitasi bumi. Berdasarkan pengamatan, Newton membuat kesimpulan bahwa gaya tarik gravitasi yang bekerja antara dua benda sebanding dengan massa masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda. Kesimpulan ini dikenal sebagai *hukum gravitasi Newton*. Hukum ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Keterangan:

- $F$  : gaya tarik gravitasi (N)
- $m_1, m_2$  : massa masing-masing benda (kg)
- $r$  : jarak antara kedua benda (m)
- $G$  : konstanta gravitasi umum ( $6,673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ )



*Gambar 2.2 Dua benda yang terpisah sejauh  $r$  melakukan gaya tarik gravitasi satu sama lain yang besarnya sama meskipun massanya berbeda.*

Gaya gravitasi yang bekerja antara dua benda merupakan gaya aksi reaksi. Benda 1 menarik benda 2 dan sebagai reaksinya benda 2 menarik benda 1. Menurut hukum III Newton, kedua gaya tarik ini sama besar tetapi berlawanan arah ( $F_{\text{aksi}} = -F_{\text{reaksi}}$ ).

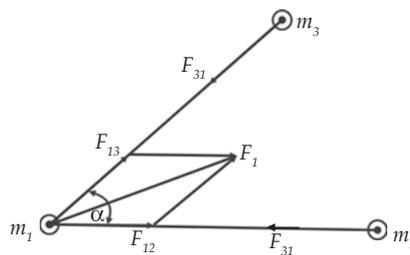
Jika suatu benda dipengaruhi oleh dua buah gaya gravitasi atau lebih, maka resultan gaya gravitasi yang bekerja pada benda tersebut dihitung berdasarkan penjumlahan vektor. Misalnya dua gaya gravitasi  $F_{12}$  dan  $F_{13}$  yang dimiliki benda bermassa  $m_2$  dan  $m_3$  bekerja pada benda bermassa  $m_1$ , maka resultan gaya gravitasi pada  $m_1$ , yaitu  $F_1$  adalah:

$$F_1 = F_{12} + F_{13}$$

Besar resultan gaya gravitasi  $F_1$  adalah

$$F_1 = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2 + 2F_{12}F_{13} \cos \alpha}$$

dengan  $\alpha$  adalah sudut antara  $F_{12}$  dan  $F_{13}$ .



*Gambar 2.3 Resultan dua gaya gravitasi  $F_{12}$  dan  $F_{13}$  akibat benda bermassa  $m_2$  dan  $m_3$  yang bekerja pada benda  $m_1$ .*

### Contoh 2.1

1. Bintang sirius merupakan bintang paling terang yang terlihat di malam hari. Bila massa bintang sirius  $5 \times 10^{31}$  kg dan jari-jarinya  $25 \times 10^9$  m, maka tentukan gaya yang bekerja pada sebuah benda bermassa 5 kg yang terletak di permukaan bintang ini?

Diketahui : a.  $m_1 = 5 \times 10^{31}$  kg  
 b.  $m_2 = 5$  kg  
 c.  $r = 25 \times 10^9$  m

Ditanyakan :  $F = \dots?$

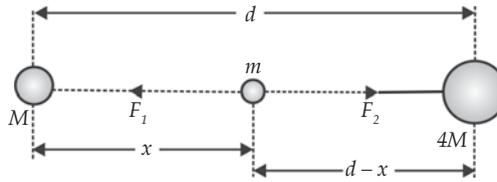
Jawab:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6,67 \times 10^{-11}) \frac{(5 \times 10^{31})(5)}{(2,5 \times 10^9)^2}$$

$$= 2.668 \text{ N}$$

2. Dua bintang masing-masing massanya  $M$  dan  $4M$  terpisah pada jarak  $d$ . Tentukan letak bintang ketiga diukur dari  $M$  jika resultan gaya gravitasi pada bintang tersebut sama dengan nol!

Jawab:

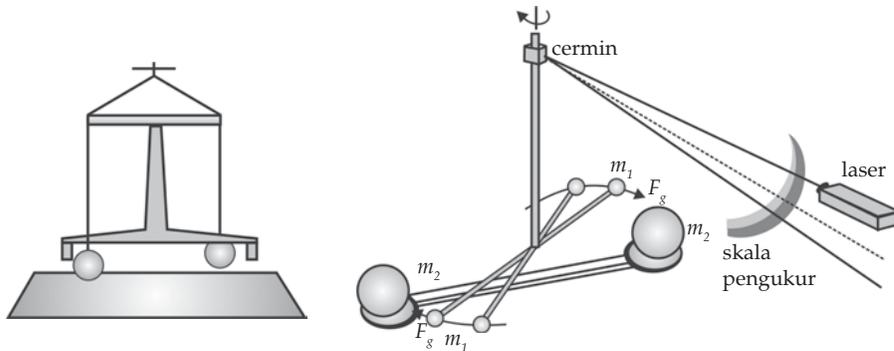


Misalnya massa bintang ketiga adalah  $m$ , dan jaraknya dari bintang yang bermassa  $M$  adalah  $X$ . Bintang ketiga bermassa  $m$  mengalami gaya gravitasi  $F_1$  berarah ke kiri yang dikerjakan oleh bintang  $M$  dan gaya gravitasi  $F_2$  berarah ke kanan yang dikerjakan oleh bintang  $4M$ . Supaya resultan gaya gravitasi pada bintang  $m$  sama dengan nol, maka kedua gaya gravitasi ini harus sama.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_2 \\
 \frac{GMm}{X^2} &= \frac{G4Mm}{(d-X)^2} \\
 \frac{1}{X^2} &= \frac{4}{(d-X)^2} \\
 \frac{d-X}{X} &= \sqrt{4} \\
 d-X &= 2X \quad \Rightarrow \quad X = \frac{1}{3}d
 \end{aligned}$$

## 1. Menentukan Nilai Konstanta Gravitasi Umum

Nilai  $G$  merupakan tetapan umum yang diukur secara eksperimen dan memiliki nilai numerik yang sama untuk semua benda. Nilai  $G$  ini pertama kali diukur oleh Henry Cavendish, pada tahun 1798. Cavendish menggunakan peralatan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut!



(a) Neraca puntir Cavendish.

(b) Neraca puntir Cavendish versi modern.

**Gambar 2.4** Neraca puntir Cavendish untuk menentukan nilai  $G$ .

Cavendish menggunakan alat ini untuk menghitung massa bumi. Dua bola timah hitam digantungkan pada ujung-ujung sebuah tiang yang digantungkan pada kawat sedemikian rupa sehingga tiang dapat berputar dengan bebas. Batangan yang menyangga dua bola besar diputar sedemikian rupa sehingga bola besar dan bola kecil saling mendekati. Gaya tarik gravitasi antara bola besar dan bola kecil menyebabkan tiang tersebut berputar. Dengan mengukur besar putaran, Cavendish dapat menghitung gaya tarik antara bola yang massanya diketahui pada jarak tertentu dengan menggunakan hukum gravitasi. Cavendish tidak hanya memperkuat teori gravitasi Newton, tetapi juga berhasil menentukan nilai  $G$ . Nilai yang diterima sampai sekarang ini adalah  $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

## 2. Pembuktian Hukum Gravitasi Newton

Newton membuktikan hukum gravitasinya dengan mengamati gerakan bulan. Bulan mengelilingi bumi satu kali dalam 27,3 hari. Lintasannya mirip lingkaran berjari-jari  $3,8 \times 10^8 \text{ m}$ . Menurut teori gerak melingkar, benda bergerak melingkar karena dipercepat oleh percepatan sentripetal yang arahnya menuju pusat lingkaran. Besar percepatan yang menyebabkan lintasan bulan berbentuk lingkaran adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{V^2}{r} = \frac{(\omega r)^2}{r} = \omega^2 r = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \\
 &= \frac{4 \times (3,14)^2 \times (3,8 \times 10^8)}{(2,36 \times 10^6)^2} \\
 &= 0,0027 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Sekarang hitunglah besar percepatan sentripetal ini dengan rumus Newton.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{GM_{\text{bumi}}M_{\text{bulan}}}{r^2} \\
 M_{\text{bulan}} a &= \frac{GM_{\text{bumi}}M_{\text{bulan}}}{r^2} \\
 a &= \frac{GM_{\text{bumi}}}{r^2} = \frac{6,67 \times 10^{-11} (5,97 \times 10^{24})}{(38 \times 10^8)^2} \\
 &= 0,0027 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Terlihat bahwa hasil perhitungan ini ternyata sama dengan hasil pengamatan. Ini membuktikan bahwa rumus Newton dapat dipertanggungjawabkan!

## Soal Kompetensi 2.1

1. Buktikan bahwa dimensi konstanta gravitasi  $G$  adalah  $M^1L^3T^{-2}$ !
2. Berapakah gaya gravitasi total pada bulan yang disebabkan adanya gaya gravitasi bumi dan matahari dengan mengandaikan posisi bulan, bumi, matahari membentuk sudut siku-siku?
3. Sebuah satelit penelitian yang memiliki massa 200 kg mengorbit bumi dengan jari-jari 30.000 km diukur dari pusat bumi. Berapa besar gaya gravitasi bumi yang bekerja pada satelit tersebut? Berapa persenkah gaya gravitasi tersebut dibandingkan dengan berat satelit di permukaan bumi? ( $m_b = 5,98 \times 10^{24}$  kg)
4. Buktikan adanya kesesuaian hukum gravitasi Newton dengan hukum Keppler!

## C. Kuat Medan Gravitasi

Besarnya kuat medan gravitasi ditunjukkan dengan besarnya percepatan gravitasi. Makin besar percepatan gravitasi, makin besar pula kuat medan gravitasinya. Besarnya percepatan gravitasi akibat gaya gravitasi dapat dihitung dengan hukum II Newton dan hukum gravitasi Newton.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

$$M_1 a = \frac{GM_1M_2}{r^2} \Rightarrow a = \frac{GM_2}{r^2}$$

$M_1$  menyatakan massa bumi selanjutnya di tulis  $M$  saja. Percepatan  $a$  sering dinamakan percepatan akibat gravitasi bumi dan diberi simbol  $g$ .

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

Keterangan:

$g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$  atau  $N/kg$ )

$G$  : tetapan umum gravitasi ( $N m^2/kg^2$ )

$M$  : massa bumi (kg)

$r$  : jari-jari bumi (m)

Untuk benda yang terletak dekat permukaan bumi maka  $r \approx R$  (jari-jari benda dapat dianggap sama dengan jari-jari bumi), maka persamaannya menjadi menjadi:

$$g = \frac{GM}{R^2} = g_0$$

Tetapan  $g_0$  disebut percepatan akibat gravitasi bumi di permukaan bumi. Percepatan akibat gravitasi tidak tergantung pada bentuk, ukuran, sifat, dan massa benda yang ditarik, tetapi percepatan ini dipengaruhi oleh ketinggian kedalaman dan letak lintang.

## 1. Ketinggian

Percepatan akibat gravitasi bumi pada ketinggian  $h$  dari permukaan bumi dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2}$$

Tabel 2.1 Hubungan  $g$  dengan Ketinggian ( $h$ )

Ketinggian (km)	$g$ (m/s <sup>2</sup> )
0	9,83
5	9,81
10	9,80
50	9,68
100	9,53
500	8,45
1.000	7,34
5.000	3,09
10.000	1,49

### Contoh 2.2

Suatu benda mengalami percepatan gravitasi bumi sebesar 6,4 m/s<sup>2</sup>. Hitung ketinggian benda tersebut jika jari-jari bumi 6,375 km dan massa bumi  $5,98 \times 10^{24}$  kg.

Diketahui : a.  $M = 5,98 \times 10^{24}$  kg

b.  $R = 6.375$  km =  $6,375 \times 10^6$  m

c.  $g = 6,4$  m/s<sup>2</sup>

Ditanyakan : a.  $h = \dots?$

Jawab:

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2} \Rightarrow R+h = \sqrt{\frac{GM}{g}}$$

$$6,375 \times 10^6 + h = \sqrt{\frac{(6,67 \times 10^{-11}) \times (5,98 \times 10^6)}{6,4}}$$

$$6,375 \times 10^6 + h = 6,23 \times 10^{13}$$

$$\begin{aligned}
 6,375 \times 10^6 + h &= 7,894 \times 10^6 \\
 h &= 7,894 \times 10^6 - 6,375 \times 10^6 \\
 &= 1,519 \times 10^6 \text{ m} \\
 &= 1.519 \text{ km}
 \end{aligned}$$

## 2. Kedalaman

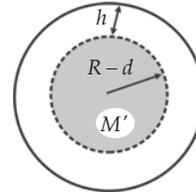
Percepatan akibat gravitasi bumi pada kedalaman  $d$ , dapat dianggap berasal dari tarikan bagian bumi berupa bola yang berjari-jari  $(R - d)$ . Jika massa jenis rata-rata bumi  $\rho$ , maka massa bola dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$M' = \frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh percepatan gravitasi bumi pada kedalaman  $d$  adalah sebagai berikut.

$$g = \frac{Gm'}{(R-d)^2} = \frac{\frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho}{(R-d)^2}$$

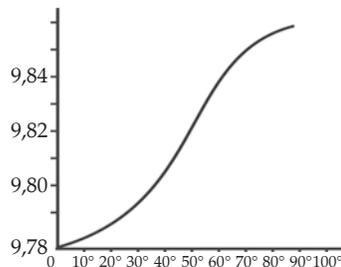
$$g = G\frac{4}{3}\pi(R-d)^3 \rho$$



Gambar 2.5 Percepatan gravitasi pada kedalaman tertentu.

## 3. Letak Lintang

Anda ketahui bahwa jari-jari bumi tidak rata. Makin ke arah kutub, makin kecil. Hal ini menyebabkan percepatan gravitasi bumi ke arah kutub makin besar. Percepatan gravitasi bumi terkecil berada di ekuator. Gambar 2.6 melukiskan kurva  $g$  sebagai fungsi sudut lintang.



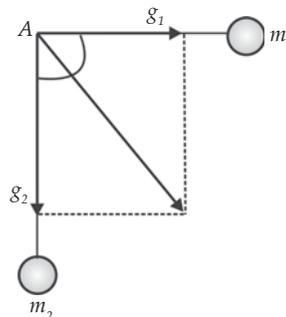
Gambar 2.6 Pengaruh susut lintang terhadap gravitasi.

Tabel 2.2. Percepatan gravitasi di berbagai tempat

Tempat	Lintang	Gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
Kutub utara	90°	9,832
Greenland	70°	9,825
Stockholm	59°	9,818
Brussels	51°	9,811
Banff	51°	9,808
New York	41°	9,803
Chicago	42°	9,803
Denver	40°	9,796
San Fransisco	38°	9,800
Canal Zone	9°	9,782
Jawa	6° Selatan	9,782

Sumber: Physics; Haliday, Resrick, 3 ed.

Seperti halnya dengan gaya gravitasi, percepatan merupakan besaran vektor. Misalnya percepatan gravitasi pada suatu titik A yang diakibatkan oleh dua benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  harus ditentukan dengan cara menjumlahkan vektor-vektor percepatan gravitasinya. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 2.7 berikut!



Gambar 2.7 Percepatan gravitasi yang diakibatkan oleh dua benda.

Percepatan gravitasi di titik A yang disebabkan oleh benda bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  sebagai berikut.

$$g_1 = \frac{Gm_1}{r_1^2} \text{ dan } g_2 = \frac{Gm_2}{r_2^2}$$

Besar percepatan gravitasi di titik A dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$g = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1g_2 \cos \theta}$$

dengan  $\theta$  merupakan sudut antara  $g_1$  dan  $g_2$ .

## D. Aplikasi Hukum Gravitasi Newton

Sebelum hukum gravitasi ditemukan oleh Newton, data-data tentang gerakan bulan dan planet-planet telah banyak dikumpulkan oleh para ilmuwan. Berdasarkan hukum gravitasi Newton, data-data tersebut digunakan untuk menghitung besaran lain tentang benda ruang angkasa yang tidak mungkin diukur dalam laboratorium.

### 1. Menghitung Massa Bumi

Massa bumi dapat dihitung dengan menggunakan nilai  $G$  yang telah diperoleh dari percobaan Cavendish. Anggap massa bumi  $M$  dan jari-jari bumi  $R = 6,37 \times 10^6$  m (bumi dianggap bulat sempurna). Berdasarkan rumus percepatan gravitasi bumi, Anda bisa menghitung besarnya massa bumi.

$$\begin{aligned}g_o &= \frac{GM}{R^2} \Rightarrow M = \frac{g_o R^2}{G} \\ &= \frac{9,8(6,37 \times 10^6)^2}{6,67 \times 10^{-11}} \\ &= 5,96 \times 10^{24} \text{ kg}\end{aligned}$$

### 2. Menghitung Massa Matahari

Telah Anda ketahui bahwa jari-jari rata-rata orbit bumi  $r_B = 1,5 \times 10^{11}$  m dan periode bumi dalam mengelilingi matahari  $T_B = 1$  tahun  $= 3 \times 10^7$  s. Berdasarkan kedua hal tersebut serta dengan menyamakan gaya matahari dan gaya sentripetal bumi, maka dapat diperkirakan massa matahari.

$$\begin{aligned}F_g &= F_s \\ \frac{GM_M M_B}{r_B^2} &= \frac{M_B v_B^2}{r_B} \quad (M_M = \text{massa matahari}, M_B = \text{massa bumi}) \\ \text{Karena } v_B &= \frac{2\pi r_B}{T_B}, \text{ maka} \\ \frac{GM_M M_B}{r_B^2} &= \frac{M_B 4\pi^2 r^2}{T_B^2 r_B} \\ M_M &= \frac{4\pi^2 r_B^3}{GT_B^2} \\ &= \frac{4(3,14)^2 (1,5 \times 10^{11})^3}{(6,67 \times 10^{-11})(3 \times 10^7)^2} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}\end{aligned}$$

### 3. Menghitung Kecepatan Satelit

Suatu benda yang bergerak mengelilingi benda lain yang bermassa lebih besar dinamakan satelit, misalnya bulan adalah satelit bumi. Sekarang banyak satelit buatan diluncurkan untuk keperluan komunikasi, militer, dan riset teknologi. Untuk menghitung kecepatan satelit dapat digunakan dua cara, yaitu hukum gravitasi dan gaya sentrifugal.

#### a. Menghitung Kecepatan Satelit Menggunakan Hukum Gravitasi

Anggap suatu satelit bermassa  $m$  bergerak melingkar mengelilingi bumi pada ketinggian  $h$  dari permukaan bumi. Massa bumi  $M$  dan jari-jari bumi  $R$ . Anda tinjau gerakan satelit dari pengamat di bumi. Di sini gaya yang

bekerja pada satelit adalah gaya gravitasi,  $F = \frac{GMm}{r^2}$ . Berdasarkan rumus hukum II Newton, Anda dapat mengetahui kecepatan satelit.

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

$$m \cdot a = \frac{GMm}{r^2}$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Karena  $r = R + h$ , maka

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}, \text{ dikalikan dengan } \frac{R^2}{R^2}, \text{ atau dapat dituliskan}$$

$$= \sqrt{\frac{GM}{R^2} \frac{R^2}{R+h}}, \text{ ingat } \frac{GM}{R^2} = g_0, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{g_0 \frac{R^2}{R+h}}$$

$$v = R \sqrt{\frac{g_0}{R+h}}$$

## b. Menghitung Kecepatan Satelit Menggunakan Gaya Sentrifugal

Sebuah satelit memiliki orbit melingkar, sehingga dalam acuan ini, satelit akan merasakan gaya sentrifugal ( $mv^2/r^2$ ). Gaya sentrifugal muncul karena pengamatan dilakukan dalam sistem non inersial (sistem yang dipercepat, yaitu satelit). Gaya sentrifugal besarnya sama dengan gaya gravitasi.

$$F_{\text{sentrifugal}} = F_{\text{gravitasi}}$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Karena  $r = R + h$ , maka

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}, \text{ dikalikan dengan } \frac{R^2}{R^2}, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{\frac{GM}{R^2} \frac{R^2}{R+h}}, \text{ ingat } \frac{GM}{R^2} = g_0, \text{ maka}$$

$$= \sqrt{g_0 \frac{R^2}{R+h}}$$

$$v = R \sqrt{\frac{g_0}{R+h}}$$

## 4. Menghitung Jarak Orbit Satelit Bumi

Apabila satelit berada pada jarak  $r$  dari pusat bumi, maka kelajuan satelit saat mengorbit bumi dapat dihitung dengan menyamakan gaya gravitasi satelit dan gaya sentripetalnya.

$$F_{\text{sentripetal}} = F_{\text{gravitasi}}$$

$$m \frac{v^2}{r} = mg$$

$$m \frac{v^2}{r} = m \left( \frac{R_B}{r} \right)^2 g$$

$$v = R_B \sqrt{\frac{g}{r}}$$

Untuk posisi orbit geosinkron, yaitu bila periode orbit satelit sama dengan periode rotasi bumi, maka jari-jari orbit satelit dapat ditentukan sebagai berikut.

$$v = R_B \sqrt{\frac{g}{r}} \text{ atau } v^2 = \frac{R_B^2 g}{r}$$

karena  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , maka

$$\begin{aligned} \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} &= g \frac{R_B^2}{r} \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{T^2 g R_B^2}{4\pi^2}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{(86400)^2 (9,8) (6,4 \times 10^6)^2}{4(3,14)^2}} \\ &= 4,24 \times 10^7 \text{ m} \end{aligned}$$



### Kegiatan

Misalkan Anda diminta oleh sebuah perusahaan swasta untuk meluncurkan sebuah satelit ke suatu titik di atas permukaan bumi. Satelit tersebut akan digunakan oleh perusahaan untuk siaran televisi, prakiraan cuaca, dan komunikasi. Tentukan posisi satelit diukur dari permukaan bumi dan kecepatan satelit selama mengorbit bumi!

## 5. Kecepatan Lepas

*Kecepatan lepas* adalah kecepatan minimum suatu benda agar saat benda tersebut dilemparkan ke atas tidak dapat kembali lagi. Kecepatan lepas sangat dibutuhkan untuk menempatkan satelit buatan pada orbitnya atau pesawat ruang angkasa. Besarnya kecepatan lepas yang diperlukan oleh suatu benda sangat erat kaitannya dengan energi potensial gravitasi yang dialami oleh benda tersebut. Besar kecepatan lepas dirumuskan sebagai berikut

$$v_l = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}$$

Kecepatan lepas ( $v_l$ ) tidak bergantung pada massa benda. Namun, untuk mempercepat benda sampai mencapai kecepatan lepas diperlukan energi yang sangat besar dan tentunya bergantung pada massa benda yang ditembakkan. Sebuah benda yang ditembakkan dari bumi dengan besar kecepatan  $v_l$ , kecepatannya akan nol pada jarak yang tak terhingga, dan jika lebih kecil dari  $v_l$  benda akan jatuh lagi ke bumi.

### Contoh 2.3

1. Hitung besar kecepatan minimum sebuah benda yang ditembakkan dari permukaan bumi agar benda tersebut mencapai jarak tak terhingga!

Jawab:

$$\begin{aligned}v_i &= \sqrt{2\frac{GM}{R}} \\&= \sqrt{2\frac{(6,67 \times 10^{-11})(5,97 \times 10^{24})}{6,37 \times 10^6}} \\&= 1,2 \times 10^4 \text{ m/s}\end{aligned}$$

2. Diketahui dalam atom hidrogen, elektron dan proton terpisah sejauh  $5,3 \times 10^{-11}$  m.
  - a. Hitunglah gaya gravitasi antara dua partikel tersebut!
  - b. Bila kecepatan orbit elektron  $2,2 \times 10^6$  m/s, maka apakah gaya gravitasi tersebut cukup kuat untuk mempertahankan elektron tetap pada orbitnya?

Diketahui : a.  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

b.  $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

c.  $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

d.  $r = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$

Ditanyakan : a.  $F_g = \dots?$

b.  $F_s = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\text{a. } F_g &= \frac{G m_p m_e}{r^2} \\&= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{1,67 \times 10^{-27} (9,1 \times 10^{-31})}{(5,3 \times 10^{-11})^2} \\&= 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. } F_s &= \frac{m_e v_e^2}{r} \\&= \frac{(9,1 \times 10^{-31})(2,2 \times 10^6)^2}{(5,3 \times 10^{-11})} \\&= 8,31 \times 10^{-8} \text{ N}\end{aligned}$$

Karena  $F_g \ll F_s$ , maka gaya gravitasi tidak mampu untuk mempertahankan elektron pada orbitnya.

## Soal Kompetensi 2.2

1. Jika percepatan gravitasi di permukaan suatu planet sama dengan  $g$ , maka berapakah gravitasi suatu titik yang berjarak  $R$  dari permukaan planet, dengan  $R$  adalah jari-jari planet?
2. Berdasarkan rumus  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , maka buktikan bahwa persamaan periode satelit adalah  $T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{g_0 R^2}}$ !
3. Buktikan dan jelaskan bahwa  $g = g_0(1 - \frac{h}{R})$  dan makna persamaan tersebut!  
( $g_0$  = percepatan gravitasi di permukaan bumi,  $g$  = percepatan gravitasi di ketinggian  $h$ , dan  $h$  = ketinggian di atas permukaan bumi)
4. Buktikan dari salah satu daftar pada tabel di bawah ini!

Tabel 2.3 Percepatan Gravitasi Planet-Planet

Planet	Percepatan Gravitasi (N/kg)
Merkurius	0,38
Venus	0,9
Bumi	1
Mars	0,38
Yupiter	2,87
Saturnus	1,32
Uranus	0,93
Neptunus	1,23

## T o k o h



Sumber: Jendela Iptek, Cahaya

### Johannes Kepler (1571 – 1630)

Johannes Kepler adalah ahli astronomi dan matematika dari Jerman, penemu hukum Kepler, teleskop Kepler, teori cahaya, dan bapak astronomi modern. Kepler dilahirkan di Well der Stadt, Wurttemberg, Jerman, pada tanggal 27 Desember 1571. Masa kecil Kepler penuh dengan penderitaan. Ia lahir sebelum waktunya. Kepler tak terurus,

badannya kurus, lemah, dan sakit-sakitan. Ayahnya tak mau memberinya makan. Untunglah kepala desa Wurttemberg baik hati. Kepler dijadikan anak angkat dan dibiayai sekolahnya.

Pada tahun 1593, Kepler menjadi guru. Dalam usia 25 tahun, Kepler menerbitkan bukunya yang berjudul *The Cosmic Mystery* (1596) dalam bahasa Latin. Dengan karyanya ini, Kepler menjadi ilmuwan terkenal pertama yang secara publik mendukung Copernicus. Karyanya ini juga menarik perhatian Tycho Brahe. Kepler kemudian diangkat menjadi pembantunya di observatorium Benatek, Praha. Tahun berikutnya, Tycho Brahe meninggal. Ia meninggalkan catatan dan data tentang posisi 777 bintang tetap yang masih berantakan dan belum lengkap. Selanjutnya Kepler menyusun dan melengkapinya menjadi 1.005 bintang.

Setelah mempelajari data-data Tycho Brahe selama 8 tahun, Kepler menemukan bentuk orbit planet yang sebenarnya. Kepler merangkum penemuan-penemuannya dalam *The New Astronomy* (1609). Isinya antara lain hukum Kepler I "Orbit planet berbentuk elip dengan Matahari terletak pada salah satu fokusnya," dan hukum Kepler II, "Garis yang menghubungkan sebuah planet dengan matahari itu menyapu luas area yang sama dalam interval waktu yang sama." Sepuluh tahun kemudian Kepler berhasil menemukan hukum Kepler III, "Kuadrat kala revolusi planet berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dengan matahari." Hukum Kepler III ini dimuat dalam bukunya yang berjudul *Harmony of the Worlds* (1619).

Hukum Kepler ini memberi inspirasi kepada Newton dalam menemukan teori gravitasi. Hukum Kepler ditemukan setelah Kepler bekerja keras selama 18 tahun. Kepler meninggal dunia di Regensburg, Bavaria, pada tanggal 15 November 1630, pada umur 59 tahun.

(Dikutip seperlunya dari 100 Ilmuwan, John Hudson Tiner, 2005)

## Kolom Ilmuwan

Anda telah membaca kisah Johannes Kepler pada kolom tokoh. Carilah informasi mengenai tiga hukum yang ditetapkan Kepler di buku, majalah, atau di internet. Berdasarkan data yang Anda peroleh, buatlah sebuah tulisan mengenai ketiga hukum tersebut. Sertakan persamaan matematis, contoh penggunaan, dan kegunaan ketiga hukum Kepler. Kumpulkan tulisan Anda di meja guru!

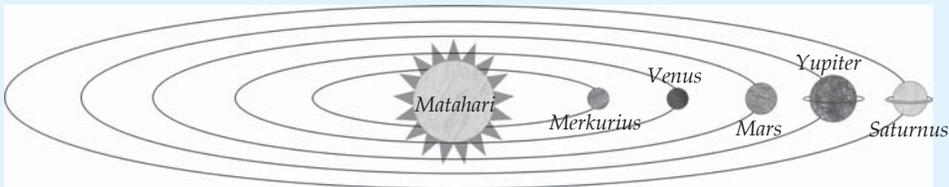


## Rangkuman

1. Gravitasi adalah gaya tarik yang dimiliki suatu benda.
2. Persamaan hukum gravitasi Newton adalah  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .
3. Besar resultan gaya gravitasi adalah  $F = \sqrt{F_{12}^2 + F_{13}^2 + 2F_{12}F_{13}\cos\alpha}$ .
4. Persamaan kuat medan gravitasi adalah  $g = \frac{Gm}{r^2}$ .
5. Bunyi hukum kekekalan energi mekanik adalah bila tidak ada gaya lain yang bekerja pada suatu benda selain gaya gravitasi, maka jumlah energi mekaniknya adalah tetap.
6. Persamaan kecepatan lepas adalah  $v_l = \sqrt{2\frac{GM}{R}}$

### Info Kita

#### Keajaiban Langit



Akhir Maret hingga awal April tahun 2004, terdapat pemandangan langit yang menakjubkan. Lima planet, yaitu Merkurius, Venus, Mars, Yupiter, dan Saturnus muncul bersama di sekitar bulan. Kelima planet tersebut bisa terlihat bersama karena mereka berada pada sisi yang sama terhadap matahari. Jajaran planet tersebut paling jelas terlihat beberapa saat setelah matahari tenggelam. Mereka akan mengiringi terbitnya bulan sabit.

Setiap beberapa tahun sekali, orbit kelima planet memang berada di sisi yang sama terhadap matahari. Kondisi ini membuat planet-planet itu bisa terlihat bersamaan, meskipun Merkurius kadang sulit diamati karena posisinya agak rendah.

Myles Standish, seorang astronom di Laboratorium Propulsi Jet Nasa di Pasadena, California mengatakan bahwa peristiwa unik yang bisa dilihat menggunakan mata telanjang itu akan terulang lagi pada bulan April 2036. Namun, apakah itu benar, hanya waktu yang akan membuktikannya.

Untuk melihat Merkurius, Anda dapat memandang ke arah sisi sebelah kanan bulan. Planet terdekat dengan matahari ini akan tampak terang dengan latar belakang warna merah mawar cahaya matahari. Setelah menemukan Merkurius, dengan menarik garis khayalan lurus ke atas, akan ditemukan Venus yang sangat terang. Kemudian akan nampak Mars dengan sinarnya yang kemerahan. Sejalan berikutnya ada Saturnus yang kelihatan berwarna kuning. Jika Anda menggunakan teleskop, maka Anda bisa melihat cincin Saturnus yang indah. Sementara Yupiter akan terlihat setelah empat planet yang lain agak menurun di horizon langit. Di langit malam itu, Venus menjadi "bintang"nya. Planet yang mempunyai ukuran lebih kecil dari bumi terlihat mendominasi langit malam.

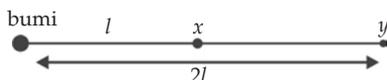
(Dikutip seperlunya dari Suplemen Anak *Suara Merdeka*, "Yunior", edisi 209, April 2004)

## P e l a t i h a n

### A. Pilihlah jawaban yang tepat dengan menuliskan huruf a, b, c, d, atau e di dalam buku tugas Anda!

1. Dimensi dari tetapan gravitasi umum  $G$  adalah ....
  - a.  $ML^2T^{-2}$
  - b.  $M^3L^3T^{-2}$
  - c.  $M^{-1}L^3T^{-2}$
  - d.  $M^2L^3T^{-2}$
  - e.  $M^{-3}L^3T^{-2}$
2. Kuat medan gravitasi pada permukaan bumi setara dengan ....
  - a. gaya gravitasi
  - b. energi potensial gravitasi
  - c. potensial gravitasi
  - d. tetapan gravitasi
  - e. percepatan gravitasi

3. Planet X mempunyai massa  $a$  kali massa bumi dan jari-jari  $b$  kali jari-jari bumi. Berat suatu benda yang berada di planet X dibandingkan berat benda tersebut di bumi menjadi ... kali.
- $a \times b$
  - $a \times b^2$
  - $a/b$
  - $a/b^2$
  - $(ab)^{-1}$
4. Dua buah bulan dari planet Yupiter mempunyai jari-jari yang sama, sedangkan massanya berbanding 3 : 2. Perbandingan percepatan gravitasi pada permukaan kedua bulan tersebut adalah ....
- 9 : 4
  - 2 : 3
  - 3 : 2
  - 6 : 1
  - 4 : 9
5. Percepatan gravitasi di permukaan bumi besarnya  $g$  dan jari-jari bumi  $R$ . Percepatan gravitasi benda yang terletak pada jarak  $R$  dari permukaan bumi adalah ....
- $2g$
  - $4g$
  - $\frac{1}{4}g$
  - $\frac{1}{4}g$
  - $\frac{1}{16}g$
6. Perhatikan gambar di bawah ini!



- Gambar di atas menunjukkan dua titik  $x$  dan  $y$  berada sejauh  $l$  dan  $2l$  dari pusat bumi. Potensial gravitasi di  $x = -8$  kJ/kg. Jika sebuah benda bermassa 1 kg di bawa dari  $x$  ke  $y$ , maka usaha yang dilakukan pada massa tersebut adalah ....
- 4 kJ
  - 2 kJ
  - +2 kJ
  - 4 kJ
  - +8 kJ
7. Planet Mercury memiliki jari-jari  $2,6 \times 10^6$  m dan massa  $3,3 \times 10^{23}$  kg. Tetapan gravitasi umum  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>, maka energi yang dibutuhkan untuk mengangkat sebuah massa 12 kg dari permukaan luar planet adalah ....
- 0,025 J
  - 19,6 J
  - $85 \times 10^6$  J
  - $1.0 \times 10^8$  J
  - $2,3 \times 10^{28}$  J

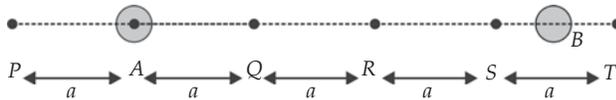
8. Sebuah benda di bumi beratnya  $w_1$  dan berat di suatu planet adalah  $w_2$ . Jika massa planet tiga kali massa bumi dan jari-jari planet dua kali jari-jari bumi, maka perbandingan berat benda di bumi dengan di planet adalah ....

- a. 3 : 4  
 b. 4 : 3  
 c. 2 : 1  
 d. 1 : 2  
 e. 3 : 2

9. Bumi memiliki radius  $R$  dan percepatan jatuh bebas pada permukaannya  $g$ . Percepatan jatuh bebas pada ketinggian  $h$  di atas permukaan bumi adalah ....

- a.  $\frac{g}{R+h}$   
 b.  $\frac{gR}{R+h}$   
 c.  $\frac{gR}{(R+h)^2}$   
 d.  $\frac{gh^2}{(R+h)^2}$   
 e.  $\frac{gR^2}{(R+h)^2}$

10. Perhatikan gambar di bawah ini!



Lima buah titik  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$ , dan  $T$  terletak segaris lurus dan berada dalam pengaruh medan gravitasi benda  $A$  dan  $B$ . Jika  $m_A = 9 m_B$ , maka titik yang mendapat pengaruh medan gravitasi terbesar adalah titik ....

- a.  $P$   
 b.  $Q$   
 c.  $R$   
 d.  $S$   
 e.  $T$

11. Satelit  $A$  dan  $B$  mempunyai massa yang sama mengelilingi bumi dan orbitnya berbentuk lingkaran. Satelit  $A$  berada pada ketinggian orbit  $R$  dan  $B$  pada  $2R$  di atas permukaan bumi. Perbandingan energi potensial satelit  $A$  dan  $B$  adalah ....

- a. 1 : 2  
 b. 2 : 1  
 c. 3 : 1  
 d. 2 : 3  
 e. 3 : 2

12. Kuat medan gravitasi di suatu titik di luar bumi yang berada sejauh  $x$  dari pusat bumi adalah  $5 \text{ N/kg}$ . Jika kuat medan gravitasi di permukaan bumi adalah  $10 \text{ N/kg}$ , maka besar jari-jari bumi adalah ....

- a.  $\frac{1}{10}$  kali
- b.  $\frac{1}{5}$  kali
- c.  $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$  kali
- d.  $(\sqrt{2})$  kali
- e.  $\frac{1}{2}$  kali

13. Sebuah satelit komunikasi mempunyai berat  $w$  ketika berada di permukaan bumi. Berapa gaya gravitasi bumi yang akan menarik satelit ketika satelit mengorbit di dalam satu orbit lingkaran dengan jari-jari tiga kali jari-jari bumi?

- a.  $9w$
- b.  $\frac{1}{9}ww$
- c.  $w/4$
- d.  $w/3$
- e.  $\frac{1}{2}w$

14. Perhatikan gambar di bawah ini!



$P$  dan  $Q$  adalah pusat-pusat dua bola kecil masing-masing bermassa  $m$  dan  $4m$ . Besar kuat medan gravitasi kedua bola ini di  $R$  bernilai sama. Nilai perbandingan  $x$  dan  $y$  adalah ....

- a.  $1 : 16$
- b.  $1 : 4$
- c.  $1 : 2$
- d.  $2 : 1$
- e.  $4 : 1$

15. Periode bulan mengelilingi bumi  $27,3$  hari. Jika percepatan akibat gravitasi bumi di permukaan bumi adalah  $9,8 \text{ m/s}^2$  dan jari-jari bumi  $6,375 \text{ km}$ , maka jarak bulan ke bumi adalah ....

- a.  $3,83 \times 10^8 \text{ m}$
- b.  $2,24 \times 10^8 \text{ m}$
- c.  $5,73 \times 10^8 \text{ m}$
- d.  $3,33 \times 10^5 \text{ m}$
- e.  $3,84 \times 10^8 \text{ m}$

### B. Kerjakan soal-soal berikut dengan benar!

1. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian  $h$  meter di atas permukaan bumi. Benda mencapai tanah dalam waktu 10 detik. Jika benda yang sama dijatuhkan dari ketinggian  $h$  di atas permukaan bulan, maka hitung waktu yang dibutuhkan benda untuk mencapai permukaan bulan! (massa bulan  $\frac{1}{81}$  massa bumi dan jari-jari bulan 0,27 jari-jari bumi)
2. Dua buah gugus bintang yang berjarak 15 tahun cahaya (1 tahun cahaya sama dengan  $9,46 \times 10^{15}$  m) terdiri atas 3 juta bintang. Jika tiap bintang massanya  $2 \times 10^{30}$  kg, maka hitunglah gaya tarik dua gugus bintang tersebut!
3. Percepatan akibat gravitasi di planet Jupiter  $25,9 \text{ m/s}^2$ . Jika massa jenis planet Jupiter,  $1,33 \text{ gr/cm}^3$ , maka hitunglah jari-jarinya!
4. Massa jenis rata-rata planet Mars  $3,96 \text{ g/cm}^3$ . Jika jari-jari Mars 3.435 km, maka hitunglah percepatan akibat gravitasi di permukaan Mars!
5. Hitunglah gaya tarik gravitasi antara bumi dan bulan, jika jarak bumi-bulan  $3,8 \times 10^8$  m, massa bumi  $5,98 \times 10^{24}$  kg, dan massa bulan  $7,36 \times 10^{22}$  kg!
6. Hitung berat orang di bulan jika beratnya di bumi 600 Newton. Anggap jari-jari bumi 3,7 kali jari-jari bulan dan massa bumi 80 kali massa bulan!
7. Orang yang beratnya 800 N di bumi, diperkirakan akan mempunyai berat sebesar 300 N di Mars. Jika massa Mars 0,11 kali massa bumi dan jari-jari bumi 6.375 km, maka hitunglah jari-jari Mars!
8. Anggap bumi sebagai bola pejal berjari-jari 6.37 km dan massa jenis rata-ratanya  $5,5 \text{ g/cm}^3$ . Hitunglah percepatan akibat gravitasi bumi!
9. Sebuah satelit mengelilingi bumi pada ketinggian 800 km dari permukaan bumi. Hitunglah periode dan kecepatan satelit jika jari-jari bumi = 6.375 km dan  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ !
10. Pada titik sudut  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  sebuah persegi panjang diletakkan masing-masing massa sebesar 100 kg dan 10 kg. Diketahui Panjang  $AB = CD = 6$  m, dan  $AC = BD = 8$  m ( $AD$  diagonal). Hitung gaya gravitasi yang dialami di titik  $D$ !