

MODUL PEMBINAAN ASTRONOMI

PENGANTAR MEKANIKA BENDA LANGIT

Denny Darmawan, M.Sc.

darmawan@uny.ac.id

Disampaikan pada:

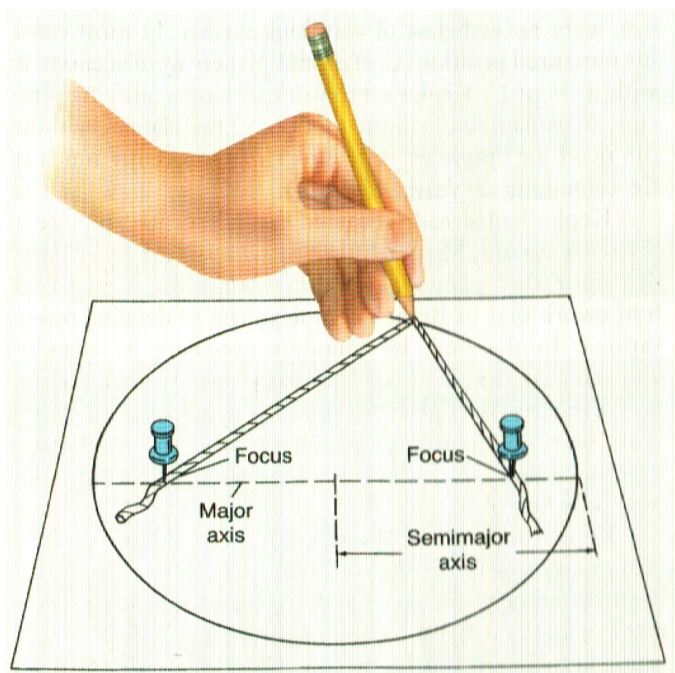
**PEMBINAAN OLIMPIADE SAINS NASIONAL (OSN) SMA/MA
BIDANG ASTRONOMI TINGKAT KOTA/KABUPATEN
DINAS PENDIDIKAN KOTAMADYA YOGYAKARTA**

SMA Muhammadiyah II Yogyakarta, 28 – 30 Mei 2013

RINGKASAN MATERI MEKANIKA BENDA LANGIT

I. HUKUM KEPLER TENTANG GERAK PLANET

- Johannes Kepler (1571 - 1630) merupakan astronom teori dan matematikawan dari Jerman, mendapat tugas dari Tycho Brahe (1546 - 1601) pada tahun 1600 untuk mencari sebuah teori yang dapat menjelaskan data pengamatan planet milik Brahe.
- Kepler menentukan bentuk orbit planet menggunakan metode triangulasi dari beberapa titik yang ada di orbit Bumi, bukan titik yang ada di Bumi itu sendiri, yang diperoleh dari pengamatan pada waktu yang berbeda-beda milik Brahe
- Dengan menggunakan sebagian orbit Bumi sebagai baseline, Kepler dapat menentukan ukuran **relatif** orbit-orbit planet dan kelajuan pergerakan planet (**ingat: saat itu jarak Bumi ke Matahari atau ke planet lainnya tidak bisa diukur langsung, sehingga hanya digunakan jarak relatif. Dari sinilah muncul satuan AU = Astronomical Unit. 1 AU = jarak rerata Bumi ke Matahari*).
- Hukum Kepler pertama: "lintasan orbit planet berbentuk ellips (bukan lingkaran) dengan matahari berada di salah satu titik fokus".
- Ellips tidak lain merupakan lingkaran yang dipipihkan, nilai eksentrisitas menunjukkan seberapa pipih suatu ellips. (**ingat: ellips dapat dilukis dengan mengikat seutas tali pada dua paku yang ditancapkan ke kertas, kemudian tarik tali dengan pensil dan mulai melukis kurva sambil mengitari kedua paku. Posisi paku disebut titik fokus*).



Gambar 1. Cara melukis ellips

- Sumbu panjang dari ellips yang melewati kedua titik fokus ellips disebut sumbu mayor. Separa dari sumbu mayor disebut sumbu semimayor.
- Lingkaran tidak lain adalah kasus khusus ellips yang kedua titik fokusnya berimpit, sehingga sumbu semimayor menjadi jejari lingkaran.

- Secara matematis, eksentrisitas adalah rasio jarak kedua titik fokus ellips dengan panjang sumbu mayor. Ketika eksentrisitas bernilai nol, berarti kedua titik fokus berimpit, maka diperoleh lingkaran sempurna.
- Hanya perlu data sumbu semimayor dan eksentrisitas untuk dapat menggambarkan ukuran dan bentuk lintasan orbit planet.
- Dari data sumbu mayor (a) dan eksentrisitas (e), dapat ditentukan titik terdekat planet ke Matahari (*perihelion*) dan titik terjauh planet dari Matahari (*aphelion*). Jarak perihelionnya adalah $a(1 - e)$ dan jarak aphelionnya adalah $a(1 + e)$ dari Matahari.
- Bahwa lintasan orbit planet berbentuk elips sangat berbeda dengan kepercayaan Aristoteles, Copernicus hingga Galileo bahwa langit mengambil bentuk geometri 'sempurna' yaitu lingkaran. Namun karena nilai eksentrisitas planet yang sangat kecil, kecuali Merkurius, lintasan orbit planet hampir membentuk lingkaran.
- Hukum Kepler kedua: "garis khayal yang menghubungkan matahari dengan planet menyapu luasan yang sama pada interval waktu yang sama" (*dengan kata lain: planet bergerak lebih cepat di perihelion dan lebih lambat di aphelion*).
- Kedua hukum Kepler dapat menjelaskan fenomena bervariasinya kecerlangan (*brightness*) planet dan gerak unik dari planet pada orbitnya (*prograde-retrograde*).
- Hukum Kepler tidak hanya berlaku untuk planet, tapi untuk semua benda yang mengorbit benda lain.
- Kedua hukum Kepler diterbitkan tahun 1609 dan menyebutkan hanya berlaku untuk planet Mars.
- 10 tahun berikutnya, Kepler meluaskan hukumnya ke semua planet (Merkurius hingga Saturnus, yang teramati saat itu) dan menambah hukum ketiga: "kuadrat periode sideris orbit planet sebanding dengan pangkat tiga sumbu semimayor"
 sederhananya: p^2 (dalam tahun Bumi) = a^3 (dalam satuan AU), semakin jauh planet dari matahari, waktu untuk menyelesaikan satu putaran semakin lama.

Tabel 1. Dimensi Tata Surya

Planet	Sumbu Semimayor (a) dalam AU	Periode Orbit (p) dalam tahun Bumi	Eksentrisitas Orbit (e)	p^2/a^3
Merkurius	0,387	0,241	0,206	1,002
Venus	0,723	0,615	0,007	1,001
Bumi	1,000	1,000	0,017	1,000
Mars	1,524	1,881	0,093	1,000
Jupiter	5,203	11,86	0,048	0,999
Saturnus	9,537	29,42	0,054	0,998
Uranus	19,19	83,75	0,047	0,993
Neptunus	30,07	163,7	0,009	0,986

Perhatikan pada tabel: kecuali Merkurius, orbit planet hampir lingkaran (nilai eksentrisitas mendekati nol); dan semakin jauh dari Matahari, periode planet semakin besar.

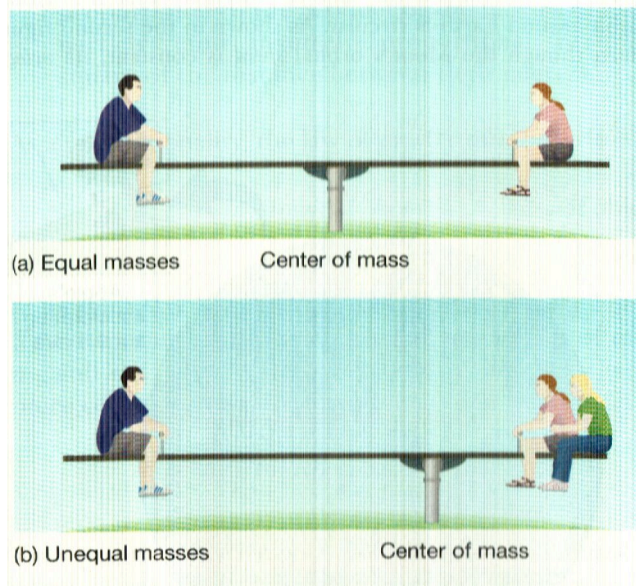
- Hukum Kepler dapat digunakan untuk menggambarkan model tata surya dengan bentuk dan **ukuran relatif** yang tepat dari orbit planet, namun tidak menyatakan ukuran orbit yang sebenarnya (ukuran tidak dalam kilometer, namun dalam jarak

relatif Bumi-Matahari), karena Kepler mengukur dengan metode triangulasi yang menggunakan orbit Bumi sebagai basis tanpa mengetahui ukuran orbit Bumi.

- Pengukuran jarak Bumi-Matahari dengan metode triangulasi secara langsung dapat dilakukan jika dapat diukur sudut paralaks Matahari, namun karena terlalu besar dan terlalu terang, hal ini sulit dilakukan.
- Sebelum pertengahan abad 20, pengukuran nilai AU dilakukan dengan metode triangulasi pada planet Merkurius dan Venus ketika mengalami transit (**transit = fenomena ketika planet inferior berada di antara Matahari dan Bumi. Dari permukaan Bumi, planet akan nampak sebagai titik hitam yang melintasi lingkaran Matahari*).
- Karena lamanya transit terjadi dapat diukur secara akurat, maka posisi planet dapat ditentukan dengan tepat. Kemudian dengan geometri sederhana dapat ditentukan jarak planet dengan menggabungkan pengamatan dari beberapa lokasi di Bumi.
- Metode modern untuk menentukan nilai AU bukan dengan metode triangulasi, namun menggunakan teknologi radar (yang merupakan gelombang elektromagnetik pada frekuensi radio), di mana sinyal radar yang ditembakkan ke suatu planet akan dipantulkan kembali ke Bumi (tidak dapat ditembakkan ke Matahari karena akan diserap dan tidak dipantulkan).
- Dengan pantulan radar dari Venus ketika berada pada jarak terdekat ke Bumi, diperoleh nilai $1 \text{ AU} = 149.597.870 \text{ km}$ atau dibulatkan sebagai 150 juta km.

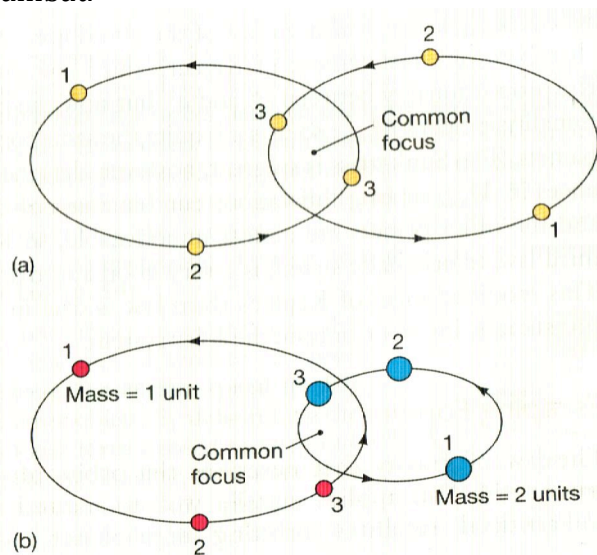
II. MEKANIKA NEWTON

- Ketiga hukum Kepler diperoleh secara empiris, yaitu hanya berdasarkan analisis data pengamatan, tanpa melibatkan teori atau model matematis.
- *Isaac Newton (1642 – 1727) dengan ketiga hukum geraknya dan hukum gravitasi, memberikan landasan teoretis atas gerak planet mengelilingi Matahari, dan menjawab pertanyaan **mengapa** planet bergerak mengikuti Hukum Kepler.
- Hukum pertama Newton tentang gerak menyatakan: “setiap benda yang diam akan tetap diam, dan benda yang bergerak dengan kecepatan konstan akan tetap bergerak dengan kecepatan konstan kecuali jika diubah oleh gaya yang bekerja pada benda tersebut”
- Hukum kedua Newton tentang gerak menyatakan: “Jika resultan gaya F bekerja pada benda bermassa m , maka benda tersebut akan dipercepat sebanding dengan F dan berbanding terbalik dengan m . Atau $a = F/m$ ”.
- Hukum ketiga Newton tentang gerak menyatakan: “Setiap aksi akan memunculkan reaksi yang besarnya sama namun pada arah yang berlawanan”.
- Hukum gravitasi Newton menyatakan: “Setiap benda akan selalu menarik benda lain dengan gaya yang besarnya sebanding dengan perkalian massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda. Atau $F_g = Gm_1m_2/r^2$ dengan $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ adalah *tetapan gravitasi*”.
- *Gaya tarik gravitasi antara Matahari dan planet yang nilainya berbanding terbalik dengan kuadrat jarak menyebabkan planet bergerak dalam orbit elips, dan karena massa Matahari lebih besar dari massa planet, maka Matahari lebih mendominasi dalam interaksi gravitasi.
- Dalam geraknya mengelilingi Matahari, planet bukan mengelilingi pusat Matahari, melainkan bersama-sama Matahari keduanya mengelilingi **pusat massa** sistem Matahari-planet. Namun karena massa Matahari yang jauh lebih besar dari planet, maka pusat massa kedua benda berada dekat dengan pusat Matahari.



Gambar 2. Posisi pusat massa (center of mass) mirip dengan posisi titik tumpu agar jungkat-jungkit setimbang (a) jika massa kedua benda sama; (b) jika massa benda di kanan lebih besar dari yang di kiri

- Hukum Kepler pertama tentang gerak planet terkoreksi sebagai: “planet mengelilingi Matahari dalam orbit berbentuk ellips, di mana pusat massa sistem planet-Matahari berada di salah satu titik fokus”.
- Jika dua benda langit yang saling mengorbit bermassa sama, maka orbit kedua benda berbentuk ellips identik dan pusat massa berada di titik fokus yang terletak di tengah-tengah jarak kedua benda.
- Jika dua benda langit yang saling mengorbit bermassa beda, maka orbit kedua benda tetap berbentuk ellips dengan eksentrisitas sama dan berbagi satu titik fokus yang sama, namun benda bermassa lebih besar memiliki semi mayor yang lebih pendek dan bergerak lebih lambat.



Gambar 3. Bentuk lintasan orbit dua benda yang saling mengorbit dan posisi pusat massa (a) kedua benda bermassa sama; (b) benda di kanan dua kali lebih besar dari benda di kiri

- *Koreksi Newton pada hukum Kepler pertama setara dengan koreksi Kepler pada model Copernicus.

- Dari hukum kedua Newton tentang gerak dan hukum gravitasi, serta menganggap bahwa orbit planet berbentuk lingkaran sempurna (ingat: benda yang bergerak melingkar mengalami percepatan sentripetal $a_s = v^2/r$) maka $F_s = F_g$ sehingga diperoleh:

$$p^2 \text{ (dalam tahun Bumi)} = a^3 \text{ (dalam AU)} / M_{\text{total}} \text{ (dalam massa Matahari)}$$
dengan M_{total} adalah jumlahan massa kedua benda langit.
- Persamaan tersebut merupakan koreksi Newton terhadap hukum Kepler ketiga tentang gerak planet, namun karena massa Matahari jauh lebih besar dari massa planet, maka M_{total} bernilai hampir sama dengan massa Matahari, sehingga bentuk awal hukum Kepler ketiga tetap cocok dengan hasil observasi Tycho Brahe.
- Hukum ketiga Kepler yang dikoreksi Newton ini berlaku untuk sembarang sistem yang berada di tata surya atau di luar tata surya.
- Dari persamaan di atas dapat pula diperoleh nilai kecepatan planet bergerak mengelilingi Matahari $v = \sqrt{GM/r}$, dengan M adalah massa benda yang dikelilingi (Matahari). Untuk Bumi maka diperoleh nilai 30 km/s.
- Jika kecepatan ini membesar $\sqrt{2}$ kalinya (1,414... kalinya), yaitu $v_{\text{min}} = \sqrt{2GM/r}$, maka planet dapat meloloskan diri dari tarikan gravitasi Matahari, sehingga disebut sebagai **kecepatan lolos**, yaitu kecepatan minimum agar benda dapat meloloskan diri dari tarikan gravitasi benda lainnya yang lebih massive. Persamaan ini berlaku juga untuk sistem dua benda lainnya.

III. SOAL-SOAL LATIHAN

Kerjakan soal-soal berikut!

1. Pengamatan Tycho Brahe terhadap bintang dan planet akurat hingga 1 menit busur (1'). Berapa besar jarak yang dihasilkan sudut ini dibandingkan jarak (a) Bulan (b) Matahari, (c) Saturnus (8,5 AU)?
2. Terhadap pengamat di Bumi, berapa sudut yang dibentuk Mars yang bergerak relatif terhadap bintang 24 jam setelah kedua planet berada pada jarak terdekatnya? Anggap orbit Bumi dan Mars berupa lingkaran dengan jejari 1 AU dan 1,5 AU dan berada pada bidang yang sama. Apakah gerakanya *prograde* atau *retrograde*?
3. Sebuah asteroid memiliki jarak perihelion 2 AU dan jarak aphelion 4 AU. Tentukan sumbu semimayor orbitnya, eksentrisitas dan periodenya!
4. Sebuah wahana ruang-angkasa memiliki orbit yang menyerempet orbit Bumi di aphelion dan menyerempet orbit Venus di perihelion. Misal Bumi dan Venus berada di posisi yang tepat dan saat yang tepat, berapa waktu yang dibutuhkan wahana tersebut untuk bergerak dari Bumi ke Venus?
5. Komet Halley memiliki jarak perihelion 0,6 AU dan periode orbit 76 tahun. Berapa jarak aphelion komet Halley dari matahari?
6. Berapa besar paralaks maksimum yang mungkin dari Merkurius ketika terjadi transit matahari dilihat dari kedua ujung garis dasar (*baseline*) sepanjang 3000 km yang ada di Bumi?
7. Berapa lama sebuah sinyal radar menyelesaikan lintasan bolak-balik antara Bumi dan Mars ketika kedua planet terpisah sejauh 0,7 AU?
8. Callisto mengorbit Jupiter pada jarak 1,88 juta km. Periode orbit mengelilingi Jupiter adalah 16,7 hari. Berapa massa Jupiter? (anggap massa Callisto dapat diabaikan terhadap massa Jupiter)

9. Matahari bergerak mengelilingi pusat galaksi Bimasakti yang berjarak 26 ribu tahun cahaya dalam orbit yang hampir lingkaran. Jika kelajuan orbit sekitar 220 km/s, tentukan periode orbit Matahari dan besarnya percepatan sentripetal dan gunakan hasilnya untuk memperkirakan massa galaksi kita.
10. Pada jarak berapa dari Matahari sebuah planet memiliki periode orbit sebesar 1 juta tahun? Berapa besar periodenya jika jaraknya 1 tahun cahaya?
11. Percepatan gravitasi di permukaan Bumi diketahui sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$. Berapa besar percepatan gravitasi pada ketinggian (a) 100 km (b) 1000 km (c) 10000 km? (Anggap jejari Bumi sebesar 6400 km)
12. Berapa kelajuan wahana ruang-angkasa yang mengorbit dalam lintasan melingkar pada setiap ketinggian yang disebut di soal sebelumnya? Berapa besar percepatan sentripetal dibandingkan percepatan gravitasinya?
13. Jika massa Bulan sebesar $7,4 \times 10^{22} \text{ kg}$ dan jearinya 1700 km, berapa kelajuan wahana ruang-angkasa yang bergerak dalam orbit melingkar tepat di atas permukaan bulan? Berapa besar kelajuan lolos dari Bulan?