

# 3

# RELATIVITAS

## Standar Kompetensi

Melakukan kajian ilmiah sehubungan dengan perkembangan teori atom kuantum dan menerapkan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma fisika modern.

## Kompetensi Dasar

- Memformulasikan teori relativitas khusus mencakup bahasan percobaan Michelson Morley dan kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

## Indikator

- Menginterpretasikan percobaan Michelson-Morley
- Memformulasikan transformasi lorentz dan perbedaannya dari transformasi Galileo
- Memformulasikan penjumlahan kecepatan relativistik
- Memformulasikan peristiwa kontraksi lorentz dan dilatasi waktu
- Memformulasikan hukum kekekalan momentum dan energi relativistic
- Mengaplikasikan hukum kekekalan momentum dan energi relativistic

## Pendalaman Materi

### A. TRANSFORMASI GALILEO

Benda dikatakan bergerak jika kedudukannya berubah terhadap suatu kerangka acuan. Kita yang sedang naik kendaraan dikatakan bergerak jika kerangka acuannya tanah, dan dikatakan diam jika kerangka acuannya kendaraan. Transformasi Galileo terbatas pada kerangka acuan inersial, yaitu kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan terhadap acuan lain dalam garis lurus. Transformasi Galileo mendasarkan diri pada prinsip relativitas Newton yang menyatakan bahwa semua hukum mekanika Newton berlaku sama untuk semua kerangka acuan inersial.

Jika terdapat dua kerangka acuan S dalam sistem koordinat (x,y,z) dan S' dengan sistem koordinat (x',y',z') yang mula-mula (pada t = 0) berimpit, kemudian kerangka acuan S' bergerak pada sumbu x dengan laju tetap terhadap acuan S. setelah t sekon kedua acuan berjarak v.t. Jika titik P berada dalam acuan S' terletak sejauh x dari S dan x' dari S', maka

transformasi Galileo untuk koordinat dan waktu ditulis :

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t'\end{aligned}$$

Transformasi Galileo untuk kecepatan adalah :

$$\begin{aligned}u'_x &= u_x - v \\u'_y &= u_y \\u'_z &= u_z\end{aligned}$$

Transformasi Galileo untuk percepatan benda adalah :

$$\begin{aligned}a'_x &= a_x \\a'_y &= a_y \\a'_z &= a_z\end{aligned}$$

- x = jarak benda P dari kerangka acuan S
- x' = jarak benda P dari kerangka acuan S'
- u<sub>x</sub> = kecepatan benda P menurut acuan S
- u'<sub>x</sub> = kecepatan benda P menurut acuan S'
- a<sub>x</sub> = percepatan benda P menurut acuan S
- a'<sub>x</sub> = percepatan benda P menurut acuan S'

### B. PERCOBAAN MICHELSON-MORLEY

Pada tahun 1887 dua ilmuwan Amerika Albert Abraham Michelson dan E.W. Morley melakukan percobaan untuk menyelidiki tentang eter yang dianggap sebagai medium perambatan gelombang cahaya dengan menggunakan alat interferometer. Kesimpulan dari percobaan tersebut adalah :

1. hipotesis tentang eter tidak benar, ternyata eter tidak ada
2. kecepatan cahaya adalah besaran mutlak, tidak bergantung pada kerangka acuan inersial

### C. TRANSFORMASI LORENTZ

Permasalahan fisika yang melibatkan kecepatan benda yang jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, maka transformasi Galileo masih berlaku. Namun untuk kecepatan benda yang hampir sama dengan kecepatan cahaya, maka transformasi Galileo tidak berlaku. Pada tahun 1905 Einstein, mengenalkan teori relativitas khusus dua postulat dengan mengajukan dua postulat, yaitu :

- Hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial
- Kelajuan cahaya di ruang hampa ke segala arah adalah sama untuk semua pengamat, tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun pengamat.

Transformasi lorent mendasarkan diri pada teori Einstein. Transformasi Lorent untuk koordinat dan waktu menjadi :

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{v \cdot x}{c^2}\right)\end{aligned}$$

Transformasi Lorent untuk kecepatan adalah :

$$\begin{aligned}u'_x &= \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x \cdot v}{c^2}} \\ u'_y &= \frac{u_y}{\gamma\left(1 - \frac{u_x \cdot v}{c^2}\right)} \\ u'_z &= \frac{u_z}{\gamma\left(1 - \frac{u_x \cdot v}{c^2}\right)}\end{aligned}$$

Dengan  $\gamma$  = tetapan transformasi yang nilainya :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

### Uji Kompetensi

- Sebuah kereta api bergerak dengan kelajuan 70 km/jam. Seorang penumpang melemparkan benda dengan kelajuan 15 km/jam. Tentukan kelajuan benda terhadap orang yang diam di tepi rel kereta, jika arah lemparan :
  - searah gerak kereta api
  - berlawanan arah gerak kereta
- Partikel A bergerak terhadap B dengan kecepatan 0,8c ke kanan. Partikel C bergerak terhadap A dengan kecepatan 0,6c ke kanan. Tentukan kecepatan partikel C relative terhadap B berdasarkan teori :
  - relativitas Newton
  - relativitas Einstein
- Seorang pengamat di bumi melihat dua pesawat angka luar A dan B. Pesawat A mendekati bumi dengan kecepatan 0,8c, sedangkan pesawat B menjauhi bumi dengan kecepatan 0,6c. Tentukan kecepatan pesawat :
  - A menurut pilot B
  - B menurut pilot A

- Dua pesawat Pada dan Q bergerak berlawanan arah. Pengamat di bumi melihat kelajuan Pada adalah 0,8c dan kelajuan Q 0,6c. Tentukan kelajuan relative pesawat P terhadap Q !
- Sebuah piring terbang bergerak ke arah sumbu x dengan laju 0,8c terhadap bumi. Dari piring terbang ditembakkan peluru ke arah sumbu x dengan laju 0,6c. Tentukan laju peluru menurut pengamat di bumi berdasarkan teori relativitas :
  - Newton
  - Einstein

### D. KONTRAKSI PANJANG

Panjang merupakan besaran relative. Pengukuran panjang benda menurut pengamat yang diam terhadap kerangka acuan (panjang sejati = proper length), akan berbeda dengan panjang benda menurut pengamat yang bergerak terhadap acuan (panjang relativistik). Sebaliknya pengukuran panjang benda yang diam terhadap kerangka acuan, akan berbeda dengan panjang benda yang bergerak terhadap acuan.

Hubungan antara panjang relativistic dan panjang sejati benda adalah :

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$L$  = panjang benda relative terhadap acuan yang bergerak (menurut pengamat yang berada diluar sistem benda)

$L_0$  = panjang benda relative terhadap acuan – yang diam

$v$  = kecepatan benda relative terhadap kerangka acuan diam

Dari persamaan tersebut akan selalu diperoleh bahwa  $L < L_0$ . Efek berkurangnya panjang benda tersebut disebut dengan penyusutan panjang (kontraksi panjang).

Karena panjang bersifat relative, maka luas dan volume benda juga bersifat relative. Sehingga :

$$\begin{aligned}A &= \frac{A_0}{\gamma} = A_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ V &= \frac{V_0}{\gamma} = V_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\end{aligned}$$

$A$  = luas benda relative terhadap acuan yang bergerak (menurut pengamat yang berada diluar sistem benda)

$A_0$  = luas benda relative terhadap acuan – yang diam

### E. DILATASI WAKTU

Selang waktu yang diukur oleh pengamat yang diam tidak sama dengan selang waktu yang diukur oleh pengamat yang bergerak terhadap kejadian. Waktu yang diukur oleh pengamat yang bergerak dengan kecepatan  $v$  terhadap kejadian ( $t$ ) lebih besar dari waktu yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian ( $t_0$ ). Hubungan  $t$  dan  $t_0$  adalah :

$$t = \gamma \cdot t_0 = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$t$  = waktu menurut pengamat yang bergerak dengan kecepatan  $v$  terhadap kejadian (menurut orang di luar sistem kejadian)  
 $t_0$  = waktu menurut pengamat yang diam terhadap kejadian (menurut pengamat di dalam sistem kejadian)

#### F. MASSA, MOMENTUM DAN ENERGI RELATIF

Massa benda yang diam  $m_0$ , jika bergerak dengan kecepatan  $v$  relative terhadap pengamat, maka massanya akan bertambah menjadi  $m$ . Hubungan  $m_0$  dan  $m$  adalah :

$$m = \gamma \cdot m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Karena momentum adalah perkalian massa dengan kecepatan benda (pada =  $m \cdot v$ ), maka momentum relativistic adalah :

$$p = \gamma \cdot p_0 = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Demikian juga energi juga bersifat relativistic. Benda yang massa diamnya  $m_0$  dan bergerak dengan kecepatan  $v$  akan memiliki energi kinetic sebesar :

$$EK = E - E_0 = mc^2 - m_0 \cdot c^2$$

$$EK = (\gamma - 1)E_0$$

EK = energi kinetic (J)  
 $E = m \cdot c^2$  = energi benda total (J)  
 $E_0 = m_0 \cdot c^2$  = energi benda diam (J)  
 $m$  = massa benda bergerak (kg)  
 $m_0$  = massa benda diam (kg)

Hubungan antara energi dengan momentum relativistic benda adalah :

$$E^2 = E_0^2 + (pc)^2$$

#### Uji Kompetensi

- Sebuah pesawat antariksa bergerak dengan laju  $\frac{5}{13}c$ . Sebuah tongkat panjangnya 2,6 m berada di dalam pesawat. Tentukan panjang tongkat menurut pengamat yang berada di :
  - dalam pesawat
  - bumi

- Panjang jembatan yang berada di bumi adalah 100 m. Tentukan panjang jembatan menurut pilot pesawat yang bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  !
- Sebuah pesawat panjangnya ketika diam di bumi 50 m. Tentukan panjang pesawat ketika bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  menurut pengamat di bumi !
- Sebuah kubus volume sesungguhnya  $125 \text{ cm}^3$ . Tentukan volume kubus menurut pengamat yang bergerak dengan kecepatan  $0,6c$  relative terhadap kubus dalam arah sejajar dengan salah satu rusuknya !
- Periode ayunan diukur terhadap kerangka acuan ayunan adalah 4 sekon. Berapa periode ayunan jika diukur oleh pengamat yang bergerak dengan laju  $0,95c$  terhadap ayunan ?
- Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan  $0,6c$  relative terhadap pengamat di bumi memancarkan sinyal cahaya ke bumi dalam waktu 1 s. Hitung selang waktu tersebut menurut pengamat yang diam di bumi !
- Resa dan Yudha adalah kakak beradik. Tepat pada saat Resa berumur 30 tahun dan Yudha berumur 25 tahun, Resa berangkat ke suatu planet yang jaraknya 6 tahun cahaya dari bumi dengan naik pesawat berkecepatan  $0,6c$ . Setelah sampai pada planet Resa langsung kembali dengan kecepatan sama. Tentukan umur Resa dan Yudha ketika bertemu kembali di bumi !
- Seseorang bermassa 100 kg di bumi. Berapa massa pria tersebut ketika dalam roket yang meluncur dengan kelajuan  $0,6c$  ?
- Tentukan perbandingan massa relativistic partikel terhadap massa diamnya jika laju partikel  $0,6c$  !
- Berapa kelajuan sebuah electron yang memiliki massa 4 kali massa diamnya ?
- Hitung momentum sebuah electron yang kelajuannya  $\frac{1}{2}c\sqrt{3}$  ! (massa diam electron  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ).
- Sebuah electron memiliki energi 2 MeV. Tentukan :
  - energi totalnya
  - momentum liniernya
- Tentukan massa dan kelajuan electron yang memiliki energi kinetic 100keV, jika massa diam electron  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  !
- Berapa besar energi kinetic yang harus diberikan untuk mempercepat sebuah electron yang bermassa diam  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  agar kelajuannya  $0,6c$  ?

#### Evaluasi

- Periode suatu pendulum di muka bumi besarnya 3 s. Jika pendulum diamati seseorang yang bergerak relative terhadap bumi dengan kecepatan  $0,95c$ , maka periodenya menjadi ...s
  - 0,5
  - 1,5
  - 9,6
  - 15
  - 300

2. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan  $\frac{1}{2}c\sqrt{3}$  dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan  $\frac{1}{2}c$  adalah ...
- 1:2
  - $1:\sqrt{3}$
  - $\sqrt{3}:1$
  - 2:3
  - 3:2
3. Dua anak kembar A dan B. A berkelana diantarksa naik pesawat dengan kelajuan  $0,8c$ . Setelah 12 tahun berkelana, A pulang ke bumi. Menurut B di bumi, perjalanan A telah berlangsung selama ... tahun
- 20
  - 15
  - 12
  - 10
  - 8
4. Menurut pengamat di sebuah planet ada dua pesawat antariksa A dan B yang mendekatinya dari arah berlawanan dengan kecepatan  $0,5c$  dan  $0,4c$ . Menurut pilot pesawat A besarnya kecepatan pesawat B adalah ...
- $0,1c$
  - $0,25c$
  - $0,4c$
  - $0,75c$
  - $0,9c$
5. Seorang astronot mengamati pesawat angkasa yang bentuknya lingkaran berjari-jari  $R$ . Jika pesawat tersebut bergerak mendekatinya dengan kelajuan  $0,8c$ , maka penampang pesawat akan tampak berbentuk ...
- lingkaran dengan jari-jari  $< R$
  - lingkaran dengan jari-jari  $= R$
  - lingkaran dengan jari-jari  $> R$
  - oval dengan jari-jari kecil  $< R$ , dan jari-jari besar  $= R$
  - oval dengan jari-jari kecil  $> R$ , dan jari-jari besar  $= 2R$
6. Besarnya kecepatan gerak sepotong mistar yang panjangnya 2 m, agar termampati menjadi 1 m adalah ...
- $0,5c$
  - $0,5c\sqrt{3}$
  - $1,33c$
  - $0,67c$
  - $1,33c\sqrt{2}$
7. Sebuah tangki berbentuk kubus volumenya  $1 \text{ m}^3$  bila diamati oleh pengamat yang diam terhadap kubus. Jika pengamat bergerak relative terhadap kubus dengan kecepatan  $0,8c$ , panjang rusuk kubus yang termati adalah ... m
- 0,2
  - 0,4
  - 0,5
  - 0,6
  - 0,8
8. Sebuah benda berkecepatan  $0,6c$  memiliki energi total  $(1,5 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$ . Pada saat benda bergerak dengan kecepatan  $0,8c$ , energi totalnya menjadi  $(\dots \text{ gram})c^2$
- $2 \times 10^{-3}$
  - $1,5 \times 10^{-3}$
  - $1,2 \times 10^{-3}$
  - $1,13 \times 10^{-3}$
  - $0,9 \times 10^{-3}$
9. Agar massa benda menjadi menjadi 125%-nya massa diam, benda harus digerakkan dengan kecepatannya ...
- $1,25c$
  - $1c$
  - $0,8c$
  - $0,6c$
  - $0,5c$
10. Jika kelajuan benda  $0,6c$ , maka perbandingan massa relativistic dengan massa diamnya adalah ...
- 5:3
  - 25:9
  - 5:4
  - 25:4
  - 8:5
11. Sebuah electron massa diamnya  $m_0$  bergerak dengan kecepatan  $0,6c$ , maka energi kinetiknya adalah  $\dots m_0 c^2$
- 0,25
  - 0,36
  - 1
  - 1,8
  - 2,8
12. Agar energi kinetic benda bernilai 25% energi diamnya, maka benda harus bergerak dengan kelajuan ...
- $0,25c$
  - $0,5c$
  - $0,6c$
  - $0,75c$
  - $0,8c$
13. Sebuah pesawat antariksa bergerak secara relativistic dan pada suatu saat energi kintiknya adalah  $\frac{1}{12}$  kali energi diamnya. Kelajuan pesawat saat itu adalah ...
- $\frac{5}{13}c$
  - $\frac{5}{12}c$
  - $\frac{7}{12}c$
  - $\frac{7}{13}c$
14. Jari-jari lintasan proton dalam sebuah sinklotron 120 m. Jika energi total proton  $1,6 \times 10^{-9} \text{ J}$ , maka induksi magnetic yang diperlukan adalah ... T
- 0,02
  - 0,28
  - 1,20
  - 1,60
  - 2,50
15. Setiap detik di matahari terjadi perubahan  $4 \times 10^9 \text{ kg}$  materi menjadi energi radiasi. Besarnya daya yang dipancarkan oleh matahari adalah  $\dots \times 10^{26} \text{ watt}$
- 1,2
  - 2,4
  - 3,6
  - 4,8
  - 7,2