



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN ANAK USIA DINI,  
PENDIDIKAN DASAR DAN PENDIDIKAN MENENGAH  
DIREKTORAT SEKOLAH MENENGAH ATAS  
2020



Modul Pembelajaran SMA

# FISIKA



KELAS  
**XII**



**RELATIVITAS  
FISIKA XII**

**PENYUSUN**

**Minardi  
SMAN 7 Kota Bekasi**

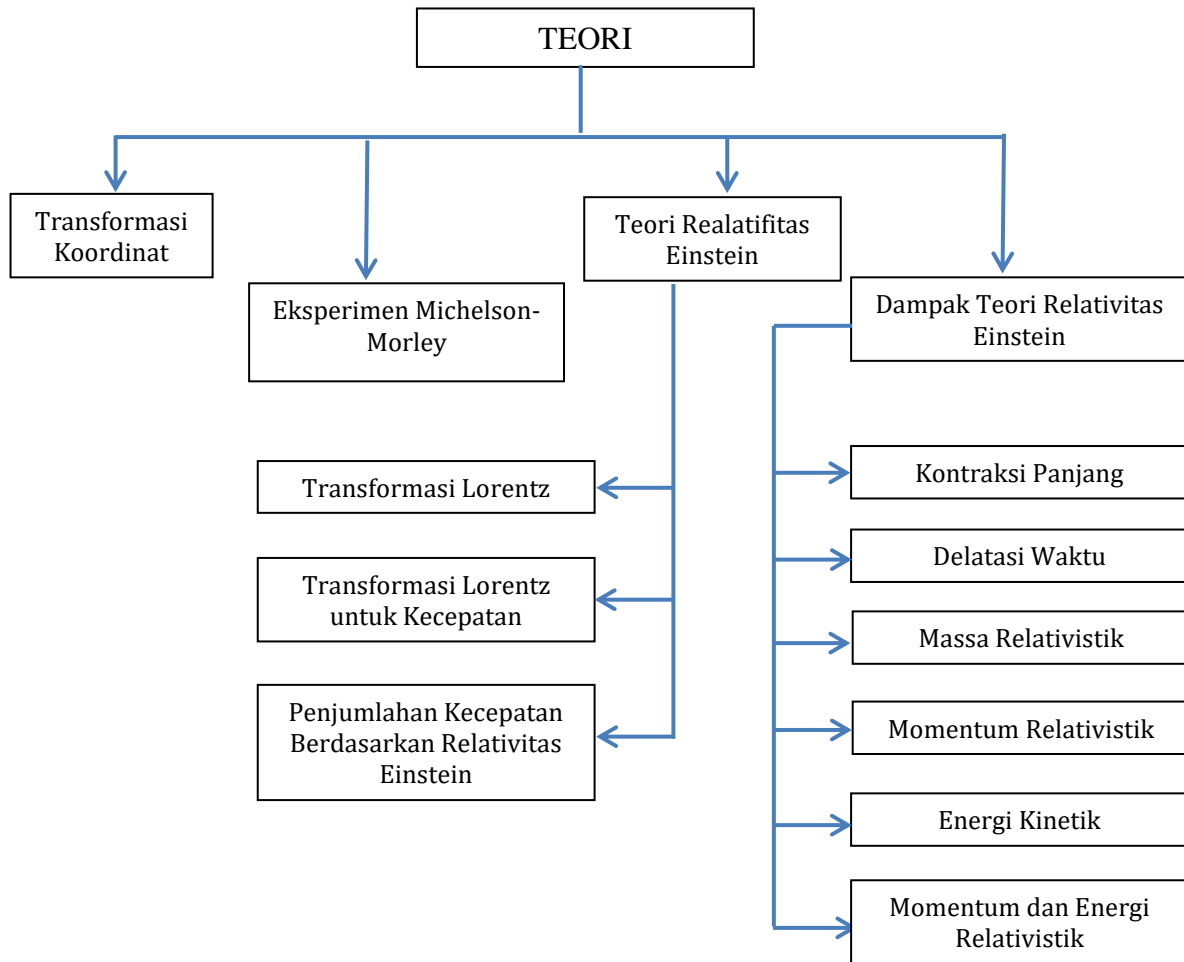
## DAFTAR ISI

PENYUSUN .....	2
DAFTAR ISI .....	3
GLOSARIUM .....	4
PETA KONSEP .....	5
PENDAHULUAN .....	6
A. Identitas Modul .....	6
B. Kompetensi Dasar .....	6
C. Deskripsi Singkat Materi .....	6
D. Petunjuk Penggunaan Modul .....	6
E. Materi Pembelajaran .....	7
KEGIATAN PEMBELAJARAN 1 .....	8
TEORI RELATIVITAS EINSTEIN .....	8
A. Tujuan Pembelajaran .....	8
B. Uraian Materi .....	8
C. Rangkuman .....	13
D. Latihan Soal .....	14
E. Penilaian Diri .....	16
KEGIATAN PEMBELAJARAN 2 .....	17
DAMPAK TEORI RELATIVITAS EINSTEIN .....	17
A. Tujuan Pembelajaran .....	17
B. Uraian Materi .....	17
C. Rangkuman .....	21
D. Penugasan Mandiri .....	21
E. Latihan Soal .....	22
F. Penilaian Diri .....	25
EVALUASI .....	26
DAFTAR PUSTAKA .....	30

## GLOSARIUM

- Teori Relativitas** : Teori relativitas umum dan relativitas khusus yang diciptakan Albert Einstein. Kedua teori ini diciptakan untuk menjelaskan bahwa gelombang tidak sesuai dengan teori gerak Newton
- Kontraksi Lorentz** : Fenomena memendeknya sebuah objek yang diukur oleh pengamat yang sedang bergerak pada kecepatan bukan nol relatif terhadap objek tersebut
- Dilatasi waktu** : Konsekuensi dari teori relativitas khusus di mana dua pengamat yang bergerak relatif terhadap satu sama lain akan mengamati bahwa jam pengamat lain berdetak lebih lambat dari jamnya.
- Momentum** : Besaran vektor yang merupakan perkalian dari massa dan kecepatan dari suatu benda atau partikel.
- Energi** : Kemampuan melakukan kerja

## PETA KONSEP



**Gambar 1**  
Peta Konsep Teori Relativitas

## PENDAHULUAN

### A. Identitas Modul

Mata Pelajaran	: Fisika
Kelas	: XII
Alokasi Waktu	: 8 JP (2 x 4 JP)
Judul Modul	: Relativitas

### B. Kompetensi Dasar

- 3.7 Menjelaskan fenomena perubahan panjang, waktu, dan massa dikaitkan dengan kerangka acuan dan kesetaraan massa dengan energi dalam teori relativitas khusus.
- 4.7 Mempresentasikan konsep relativitas tentang panjang, waktu, massa, dan kesetaraan massa dengan energi.

### C. Deskripsi Singkat Materi

Dalam modul ini akan dibahas mengenai teori relativitas khusus yang dikemukakan oleh Albert Einstein. Salah satu yang dijelaskan dalam teori ini adalah bahwa waktu, massa, dan panjang adalah relatif, tergantung dari kecepatan pengamat terhadap suatu kerangka acuan.

Teori inilah yang mendasari pemanfaatan energi nuklir untuk berbagai keperluan. Diharapkan peserta didik dapat memahami teori ini dengan baik untuk dapat menganalisa berbagai fenomena alam dan meningkatkan ketakwaan terhadap Tuhan Y.M.E.

### D. Petunjuk Penggunaan Modul

Agar kalian berhasil mencapai kompetensi dalam mempelajari modul ini maka ikuti petunjuk-petunjuk berikut:

1. Petunjuk Umum:
  - a. Bacalah modul ini secara berurutan dan pahami isinya
  - b. Pelajari contoh-contoh penyelesaian permasalahan dengan seksama melalui pemahaman atau bukan dihafalkan
  - c. Laksanakan semua tugas-tugas yang ada dalam modul ini agar kompetensi kalian berkembang sesuai kompetensi yang diharapkan
  - d. Setiap mempelajari materi, kalian harus mulai dari penguasaan materi dalam setiap kegiatan pembelajaran dan melaksanakan tugas-tugas atau tes formatif yang diberikan.
  - e. Dalam melaksanakan tugas-tugas atau mengerjakan tes formatif yang diberikan, kalian jangan melihat kunci jawaban terlebih dahulu sebelum kalian menyelesaikan tugas atau tes formatif tersebut
  - f. Konsultasikan dengan guru mata pelajaran apabila kalian mengalami kesulitan dalam mempelajari modul ini.

2. Petunjuk Khusus:

- a. Dalam kegiatan Pembelajaran 1 kalian akan mempelajari mengenai konsep-konsep transformasi dan postulat relativitas khusus dan dilatasi waktu. Pada kegiatan Pembelajaran 2 kalian akan mempelajari bagaimana menentukan massa, momentum, dan energi relativistik. Dan pada kegiatan 3 kalian akan mempelajari tentang kesetaraan massa dengan energi dalam teori relativitas khusus.
- b. Pahamiilah contoh-contoh soal yang ada dan kerjakanlah semua soal latihan yang disediakan pada bagian tes formatif 1, 2 dan 3.

**E. Materi Pembelajaran**

Modul ini terbagi menjadi dua kegiatan pembelajaran dan di dalamnya terdapat uraian materi, contoh soal, soal latihan dan soal evaluasi.

Pertama : konsep-konsep transformasi dan postulat relativitas khusus, kontraksi panjang dan dilatasi waktu

Kedua : massa, momentum, energi relativistik, kesetaraan massa dengan energi

# KEGIATAN PEMBELAJARAN 1

## TEORI RELATIVITAS EINSTEIN

### A. Tujuan Pembelajaran

Setelah kegiatan pembelajaran 1 ini diharapkan kalian mampu menjelaskan konsep-konsep transformasi dan postulat relativitas khusus, dan dilatasi waktu.

### B. Uraian Materi

#### 1. Relativitas Newton

Teori Relativitas Newton menjelaskan gerak-gerak benda jauh di bawah kecepatan cahaya. Teori relativitas mempelajari bagaimana pengukuran besaran fisika yang bergantung pada pengamat seperti halnya dengan peristiwa yang diamati. Relativitas merupakan salah satu dari beberapa teori mengenai gerak, yang dirancang untuk menjelaskan penyimpangan dari mekanika Newton yang timbul akibat gerak relative yang sangat cepat. Teori ini telah mengubah pandangan kita mengenai ruang, waktu, massa, energi, gerak, dan gravitasi. Teori relativitas Newton terdiri atas teori khusus dan teori umum, yang keduanya bertumpu pada dasar matematika yang kuat dan keduanya telah diuji dengan percobaan-percobaan dan pengamatan.

Newton mengatakan bahwa semua gerak itu relatif. Benda akan dikatakan bergerak apabila kedudukan benda tersebut berubah terhadap kerangka acuannya. Kerangka acuan di mana Hukum Newton berlaku disebut kerangka acuan inersia. Jika kita memiliki dua kerangka acuan inersia yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap yang lainnya, maka tidak dapat ditentukan bagian mana yang diam dan bagian mana yang bergerak atau keduanya bergerak. Galileo dan Newton mengemukakan tentang apa yang sekarang kita sebut sebagai prinsip relativitas Newton, yaitu hukum – hukum mekanika berlaku sama pada semua kerangka acuan inersial.

#### 2. Postulat Relativitas Khusus

Pada tahun 1888 Hertz berhasil membuktikan hipotesis Maxwell bahwa cahaya termasuk gelombang elektromagnetik, yang merambat melalui udara dengan kecepatan  $c = 3 \times 10^8$  m/s. Sesuai dengan pendapat umum pada saat itu bahwa gelombang memerlukan medium untuk merambat, para ilmuwan kemudian mengemukakan hipotesis eter: "Jagat raya dipenuhi oleh eter stasioner yang tidak mempunyai wujud tetapi dapat menghantarkan perambatan gelombang".

Namun keberadaan eter akhirnya terbantahkan melalui percobaan Michelson-Morley dimana pada saat itu mereka ingin mengukur kelajuan Bumi relatif terhadap eter. Keinginan untuk membukikan bahwa eter itu ada berakhir dengan kesimpulan eter sebenarnya tidak ada. Melalui percobaan yang berulang-ulang di lakukan hasilnya tetap bahwa eter tidak ada.

Teori relativitas Einstein merujuk pada kerangka acuan inersial yaitu kerangka acuan yang bergerak relatif pada kecepatan konstan (tetap) terhadap kerangka acuan lainnya. Dari hasil kajiannya, Einstein mengemukakan dua postulat, yaitu:



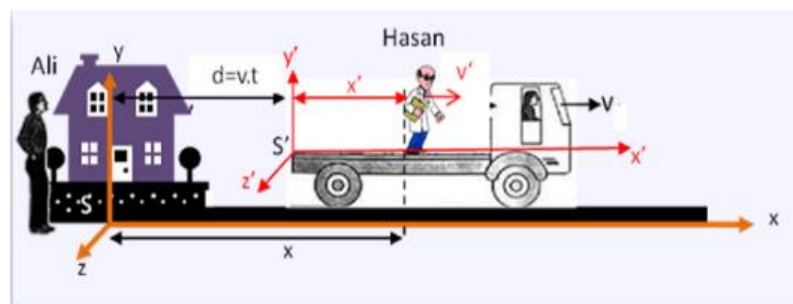
1. Hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.
2. Cahaya yang merambat di ruang hampa dengan kecepatan  $c = 3 \times 10^8$  m/s adalah sama untuk semua pengamat dan tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun kecepatan pengamat.

Postulat pertama didasarkan pada tidak adanya kerangka acuan umum yang diam mutlak, sehingga tidak dapat ditentukan mana yang dalam keadaan diam dan mana yang dalam keadaan bergerak. Misalnya, seseorang berinisial A berada di dalam pesawat dan seseorang berinisial B berada di permukaan bumi. Dari sudut pandang A, pesawat diam pada suatu tempat dan permukaan bumi-lah yang bergerak. Sedangkan dari sudut pandang B, permukaan bumi tempat dia berpijak yang tetap diam dan pesawat dengan berisi si A didalamnya yang bergerak.

Postulat kedua menyatakan bahwa kecepatan cahaya  $c$  konstan, tidak bergantung pengamat yang mengukur dari kerangka acuan inersia. Segala pengukuran harus dibandingkan dengan kecepatan cahaya dan tidak ada kecepatan yang lebih besar dari kecepatan cahaya.

### 3. Tranformasi Lorentz

Pada transformasi Galileo telah dikemukakan bahwa selang waktu pengamatan terhadap suatu peristiwa yang diamati oleh pengamat yang diam dengan pengamat yang relatif bergerak terhadap peristiwa adalah sama ( $t = t'$ ). Hal inilah yang menurut Einstein tidak benar, selang waktu pengamatan antara pengamat yang diam dan pengamat yang bergerak relatif adalah tidak sama ( $t \neq t'$ ). Transformasi Lorentz pertama kali dikemukakan oleh Hendrik A. Lorentz, seorang fisikawan dari Belanda pada tahun 1895. Sebagai gambaran coba kalian perhatikan gambar berikut!



**Gambar 2**  
Ilustrasi transformasi Lorentz (sumber: golengku.blogspot)

Karena waktu pengamatan oleh pengamat yang diam (Ali) pada kerangka acuan  $S$  dan pengamat yang bergerak (Hasan) pada kerangka acuan  $S'$  hubungan transformasi pada Galileo haruslah mengandung suatu tetapan pengali yang disebut tetapan transformasi.

Dari hasil perhitungan turunan dapatkan persamaan transformasi Lorentz yaitu:

$$x' = \frac{x - v.t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Kebalikan transformasi Lorentz dapat dituliskan menjadi:

$$x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t = \frac{t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Maka transformasi Lorentz untuk kecepatan benda yang bergerak dapat dinyatakan:

$$v_{x'} = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v \cdot v_x}{c^2}}$$

Secara analog persamaan transformasi Lorentz balik untuk kecepatan dapat dituliskan:

$$v_x = \frac{v_{x'} + v}{1 + \frac{v \cdot v_{x'}}{c^2}}$$

Persamaan-persamaan di atas merupakan penjumlahan kecepatan transformasi Lorentz yang kemudian dikenal dengan penjumlahan kecepatan menurut teori relativitas Einstein. Persamaan tersebut di atas merupakan rumus kecepatan benda yang diamati oleh pengamat yang diam yang disebut rumus penambahan kecepatan relativistik yang sesuai dengan teori relativitas Einstein.

#### Contoh

Seorang pengamat di bumi melihat dua pesawat antariksa A dan B yang bergerak berlawanan arah mendekati bumi dengan kelajuan masing-masing  $0,5c$  dan  $0,6c$ . Maka berapakah kelajuan:

- 1) pesawat A menurut pilot di pesawat B?
- 2) pesawat B menurut pilot di pesawat A?

#### Penyelesaian

$$v_A = 0,5c$$

$$v_B = 0,6c$$

- 1) Kelajuan pesawat A menurut pilot pesawat B dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$v_{AB} = \frac{v_A + v_B}{1 + \frac{v_A \cdot v_B}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,5c + 0,6c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,6c}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1 + \frac{0,30c^2}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1 + 0,3}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1,3}$$

$$v_{AB} = 0,85c$$

- 2) Kelajuan pesawat B menurut pilot pesawat A dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$v_{BA} = \frac{v_B + v_A}{1 + \frac{v_B \cdot v_A}{c^2}}$$

$$v_{BA} = \frac{0,6c + 0,5c}{1 + \frac{0,6c \cdot 0,5c}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1 + \frac{0,30c^2}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1 + 0,3}$$

$$v_{AB} = \frac{1,1c}{1,3}$$

$$v_{AB} = 0,85c$$

#### 4. Dilatasi Waktu

Menurut Einstein bahwa waktu adalah sesuatu yang relatif. Di dalam suatu kerangka acuan yang bergerak terhadap seorang pengamat yang diam terdapat lonceng yang menunjukkan selang waktu  $\Delta t_0$ . Selang waktu yang diamati oleh pengamat tersebut adalah  $\Delta t$  lebih lama dari pada  $\Delta t_0$ . Beda waktu yang merupakan perpanjangan waktu pengamatan bagi pengamat diam disebut dilatasi waktu. Menurut Einstein hubungan antara kedua selang waktu itu dirumuskan dengan:

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

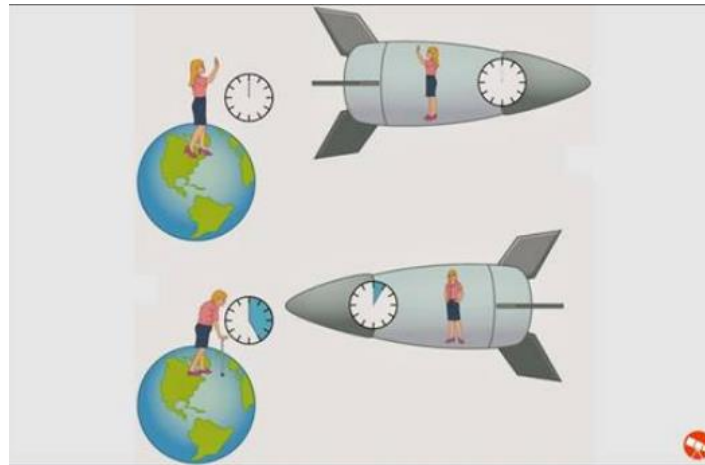
Keterangan :

$\Delta t$  = Selang waktu yang di ukur oleh pengamat yang relatif bergerak (s)

$\Delta t_0$  = Selang waktu yang di ukur oleh pengamat yang relatif diam (s)

$v$  = Kecepatan relative pengamat yang bergerak terhadap pengamat yang diam (m/s)

$c$  = Kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)



**Gambar 3**

Ilustrasi dilatasi waktu (sumber: infoastronomy.org)

Dalam teori relativitas Einstein, dilatasi waktu dalam dua keadaan ini dapat diringkas yaitu: Dalam relativitas khusus (atau, hipotetis jauh dari semua massa gravitasi), jam yang bergerak terhadap sistem inersia pengamatan diukur akan berjalan lebih lambat. Efek ini dijelaskan dengan tepat oleh transformasi Lorentz. Dalam relativitas umum, jam pada posisi dengan potensial gravitasi yang lebih rendah seperti dalam jarak dekat ke planet yang ditemukan akan berjalan lebih lambat.

**Contoh**

Dua orang Anton dan Bernad, Anton berada di bumi sedangkan Bernard naik pesawat antariksa yang bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  pergi pulang terhadap bumi. Bila Anton mencatat kepergian Bernard selama 20 tahun, maka berapa lamakan Bernard mencatat kepergiannya mengendarai pesawat tersebut?

**Penyelesaian:**

20 tahun waktu perjalanan di bumi dan menurut Anton adalah waktu yang dia lihat dari keadaan bergerak ( $\Delta t$ ), maka waktu yang berjalan di dalam pesawat ( $\Delta t_0$ ):

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

$$20 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$$

$$20 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{0,64c^2}{c^2}}}$$

$$20 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$20 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{0,36}}$$

$$20 = \frac{\Delta t_0}{0,6}$$

$$20 \times 0,6 = \Delta t$$

$$\Delta t = 12 \text{ tahun}$$

### C. Rangkuman

1. Relativitas Newton: Newton mengatakan bahwa benda akan dikatakan bergerak apabila kedudukan benda tersebut berubah terhadap kerangka acuannya.
2. Teori relativitas Einstein, Einstein mengemukakan dua postulat, yaitu:
  - 1) Hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.
  - 2) Cahaya yang merambat di ruang hampa dengan kecepatan  $c = 3 \times 10^8$  m/s adalah sama untuk semua pengamat dan tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun kecepatan pengamat.

3. Transformasi Lorentz

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

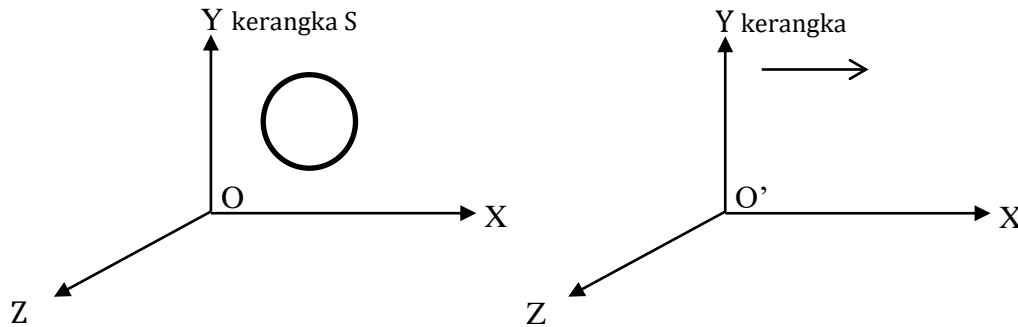
$$z' = z$$

4. Dilatasi waktu: adalah jeda waktu yang merupakan perpanjangan waktu pengamatan bagi pengamat. Dilatasi waktu dapat dihitung menggunakan persamaan:

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

**D. Latihan Soal**

1. Jelaskan postulat Einstein terkait teori relativitas !
2. Sebuah cincin berbentuk lingkaran diam terhadap kerangka S seperti ditunjukkan dalam gambar. S' bergerak dengan kecepatan  $v$  mendekati  $c$  ( $c =$  laju cahaya) searah sumbu X.



Jelaskan bagaimana bentuk cincin tersebut menurut pengamat O'!

3. Sebuah partikel yang bergerak dengan kelajuan  $0,3c$  terhadap kerangka acuan laboratorium memancarkan sebuah elektron searah dengan kecepatan  $0,3c$  relatif terhadap partikel. Tentukan laju elektron tadi menurut kerangka acuan laboratorium
4. Sumber cahaya A berada di bumi dan mengirimkan isyarat-isyarat setiap 12 menit. Pengamat B berada dalam pesawat antariksa yang meninggalkan bumi dengan kecepatan  $0,6c$  terhadap bumi. Berapa selang waktu Pengamat B akan menerima isyarat-isyarat cahaya dari A?

**Pembahasan Latihan Soal**

1. Relativitas khusus dibangun oleh dua postulat Einstein yang secara singkat:
  - a. Hukum-hukum fisika berlaku sama dalam semua kerangka acuan inersial.
  - b. Kelajuan cahaya dalam vakum adalah sama untuk semua pengamat, tidak tergantung pada pengamatnya
2. Pengamat O berada pada kerangka S. Ketika S' bergerak ke arah sumbu X maka pengamat O' juga bergerak ke arah sumbu X sehingga cincin tersebut tidak bergerak relatif terhadap pengamat, dengan demikian bentuk cincin tersebut teramati tidak mengalami perubahan bentuk

3. Diketahui

$$v_A = 0,3c$$

$$v_B = 0,3c$$

Ditanyakan

$$v_{AB} = \dots$$

$$v_{AB} = \frac{v_A + v_B}{1 + \frac{v_A \cdot v_B}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,3c + 0,3c}{1 + \frac{0,3c \cdot 0,3c}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,6c}{1 + \frac{0,9c^2}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,6c}{0,9c}$$

$$v_{AB} = 0,51c$$

$$4. \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{1 - 0,36}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{0,8}$$

$$\Delta t = 15 \text{ menit}$$

**E. Penilaian Diri**

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut secara jujur dan bertanggung jawab dengan cara membubuhkan tanda centang (√)!

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1	Saya mampu menjelaskan konsep transformasi pada postulat relativitas khusus		
2	Saya mampu menjelaskan konsep transformasi Lorentz		
3	Sayamampu menjelaskan peristiwa delatasi waktu		

Bila ada jawaban "Tidak", maka segera lakukan review pembelajaran, terutama pada bagian yang masih "Tidak".

Bila semua jawaban "Ya", maka Anda dapat melanjutkan ke pembelajaran berikutnya.



## KEGIATAN PEMBELAJARAN 2

### DAMPAK TEORI RELATIVITAS EINSTEIN

#### A. Tujuan Pembelajaran

Setelah kegiatan pembelajaran dua ini diharapkan kalian memahami tentang konsep kontraksi panjang, massa, momentum, energi relativistik, kesetaraan massa dengan energi

#### B. Uraian Materi

##### 1. Konstraksi Panjang

Sebuah benda diam tampak lebih panjang jika diukur oleh pengamat yang diam terhadap benda, sedangkan untuk pengamat yang bergerak relatif terhadap benda, maka panjang benda tampak lebih pendek.

Konstraksi panjang adalah fenomena memendeknya sebuah objek yang diukur oleh pengamat yang sedang bergerak pada kecepatan bukan nol relatif terhadap objek tersebut. Konstraksi ini biasanya hanya dapat dilihat ketika mendekati kecepatan cahaya. Konstraksi panjang hanya terlihat pada arah paralel dengan arah dimana benda yang diamati bergerak. Efek ini hampir tidak terlihat pada kecepatan sehari-hari dan diabaikan untuk semua kegiatan umum. Hanya pada kecepatan sangat tinggi dapat terlihat. Pada kecepatan 13.400.000 m/s (30 juta mph, 0.0447c) kontraksi panjangnya adalah 99.9% dari panjang saat diam; pada kecepatan 42.300.000 m/s (95 juta mph, 0.141c), panjangnya masih 99%. Ketika semakin mendekati kecepatan cahaya, maka efeknya semakin kelihatan, seperti pada rumus:

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

Dimana:

$L_0$  = Panjang diam (m)

$L$  = Panjang yang dilihat pengamat pada gerak relative terhadap objek (m)

$v$  = Kecepatan relatif (m/s)

$c$  = Kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

Konstraksi panjang atau penyusutan panjang hanya terjadi pada pada komponen panjang benda yang sejajar dengan arah gerak. Semua komponen panjang lainnya yang tegak lurus terhadap arah gerak (arah kecepatan  $v$ ) tidak mengalami penyusutan panjang.

Contoh

1. Jarak dua kota di bumi adalah 800 km. Berapakah jarak kedua kota tersebut bila diukur dari sebuah pesawat antariksa yang terbang dengan kecepatan  $0,6c$  searah kedua kota ?

##### Penyelesaian

$$L_0 = 800 \text{ km}$$

$$v = 0,6c$$

Ditanyakan:  $L = \dots?$

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

$$L = 800 \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}$$

$$L = 800 \cdot 0,8$$

$$L = 640 \text{ km}$$

2. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan sebesar  $0,8c$  ( $c$  = cepat rambat cahaya =  $3 \cdot 10^8$  m/s) sehingga panjang roket tersebut selama bergerak 6m. Berapakah panjang diam roket tersebut?

Penyelesaian

$$v = 0,8c$$

$$L = 6 \text{ m}$$

Ditanyakan:  $L_0 = ?$

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

$$6 = L_0 \sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}$$

$$6 = L_0 \cdot 0,6$$

$$L_0 = \frac{6}{0,6}$$

$$L_0 = 10 \text{ m}$$

## 2. Massa Relativistik

Untuk gerakan - gerakan benda dengan kecepatan relative kecil tidak terjadi perubahan massa. Perubahan itu baru tampak jika kecepatannya mendekati kecepatan cahaya. Oleh Einstein hubungan massa diam dan massa bergerak yang ditinjau oleh pengamat dirumuskan sebagai berikut :

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

Dimana:

$m_0$  = Massa diam (m)

$m$  = Massa yang dilihat pengamat pada gerak relative terhadap objek (m)

$v$  = Kecepatan relatif antara pengamat dan benda bergerak (m/s)

$c$  = Kecepatan cahaya (m/s)

Contoh soal

1. Sebuah partikel dalam diam memiliki massa 100 gram. Berapakah massanya jika partikel tersebut bergerak dengan kecepatan sebesar  $0,6c$ ?

Penyelesaian:

$$m_0 = 100 \text{ g}$$

$$v = 0,6c$$

Ditanyakan

$$m = ?$$

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

$$m = \frac{100}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{100}{\sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{100}{\sqrt{1 - 0,36}}$$

$$m = \frac{100}{\sqrt{0,64}}$$

$$m = \frac{100}{0,8}$$

$$m = 125 \text{ gram}$$

2. Jika laju partikel  $0,6c$  maka berapa perbandingan massa relativistic terhadap massa diamnya?

Penyelesaian

$$v = 0,6c$$

Ditanyakan

$$m : m_0 = \dots?$$

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

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

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}}}$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,36}}$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{64}}$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{0,8} = \frac{10}{8} = \frac{5}{4}$$

Jadi perbandingan  $m : m_0 = 5 : 4$

$\frac{1}{0,8} \times \frac{10}{10} = \frac{10}{8}$

### 3. Momentum Relativistik

Anda telah mengetahui bahwa besar momentum suatu benda bermassa  $m$  yang sedang bergerak dengan kelajuan  $v$  diberikan sebagai :  $p = m \cdot v$ . Untuk benda yang bergerak dengan kecepatan relativistik maka momentumnya adalah momentum relativistik. Besar momentum relativistik  $p$  diperoleh dari persamaan  $p = mv$  dengan memasukkan  $m$  sebagai massa relativistik yaitu:

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

Jadi persamaan momentum relativistic seperti berikut:

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

### 4. Energi Relativistik

Albert Einstein pada tahun 1905 menyatakan bahwa ada kesetaraan antara massa dan energi pada benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya. Pada penyinaran zat radioaktif, selalu disertai energi yang sangat besar. Energi ini diserap dan berubah menjadi panas. Jika benda diam menerima energi kinetik, massa relatif benda akan bertambah. Tetapi, jika kehilangan energi, massa benda relatif akan berkurang.

Dalam fisika klasik kita mengenal dua prinsip kekekalan, yaitu kekekalan massa (klasik) dan kekekalan energi. Dalam relativitas, kedua prinsip kekekalan tersebut bergabung menjadi prinsip kekekalan massa-energi, dan memegang peranan penting dalam reaksi inti.

Menurut Einstein, benda yang bergerak dengan kelajuan  $v$ , akan memiliki energi kinetik. Ini karena adanya kesetaraan antara massa dengan energi.

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

Dimana :

$E_k$  = Energi kinetik relativitas

$m_0$  = massa diam

$m$  = massa total

$c$  = kecepatan cahaya

## 5. Hukum Kekekalan Energi Relativistik

Jika sebuah benda dalam keadaan diam (massa diam  $m_0$  membelah secara spontan menjadi dua bagian massa diam masing – masing  $m_{01}$  dan  $m_{02}$ ) yang bergerak masing-masing dengan kelajuan  $v_1$  dan  $v_2$ , maka berlaku hukum kekekalan energi relativistik, yaitu energi *relativistik awal sama dengan energi relativistik akhir*.

$$mc^2 = \gamma m_0 c^2$$

Dengan:

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

## C. Rangkuman

1. Kontraksi Panjang adalah fenomena memendeknya sebuah objek yang diukur oleh pengamat yang sedang bergerak pada kecepatan bukan nol relatif terhadap objek tersebut. Kontraksi ini biasanya hanya dapat dilihat ketika mendekati kecepatan cahaya.

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

2. Sebuah benda yang memiliki massa diam  $m_0$  maka benda tersebut jika bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya akan mengalami perubahan massa yang disebut dengan massa relativistic sebesar

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

3. Benda yang bergerak dengan kecepatan relativistik maka momentumnya adalah momentum relativistik. Persamaan momentum relativistiknya adalah:

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

4. Benda yang bergerak dengan kelajuan mendekati kecepatan cahaya, akan memiliki energi kinetik. Ini karena adanya kesetaraan antara massa dengan energi. Persamaannya:

$$E_k = mc^2 - m_0 c^2$$

5. Jika sebuah benda dalam keadaan diam (massa diam  $m_0$  membelah secara spontan menjadi dua bagian massa diam masing – masing  $m_{01}$  dan  $m_{02}$ ) yang bergerak masing-masing dengan kelajuan  $v_1$  dan  $v_2$ , maka berlaku hukum kekekalan energi relativistik, yaitu energi *relativistik awal sama dengan energi relativistik akhir*.

$$mc^2 = \gamma m_0 c^2$$

## D. Penugasan Mandiri

Buatlah presentasi pembelajaran tentang kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistic, momentum relativistic, energy relativistic, atau hukum kekekalan energy

relativistic dalam bentuk disesuaikan dengan kemampuan dan keadaan kalian boleh power point, cerita bergambar (komik), charta atau video!

### E. Latihan Soal

1. Jarak kota Jogja-Gresik jika diukur oleh pengamat di bumi adalah 300 km. Berapakah jarak kedua kota tersebut jika diukur oleh awak pesawat antariksa yang bergerak dengan kecepatan  $0,6c$ ?
2. Massa Leli ketika berada di dalam roket yang sedang meluncur ke angkasa dengan kelajuan  $0,8c$  adalah 90 kg jika diukur oleh pengamat di bumi. Tentukan massa Leli ketika masih di bumi
3. Elektron yang memiliki massa diam  $m_0$  bergerak dengan kecepatan  $0,6c$ . Momentum relativistik elektron adalah....
4. Sebuah elektron bergerak dengan dengan kelajuan  $0,5\sqrt{3}c$ . Jika massa diam elektron adalah  $9,1 \times 10^{-31}$  kg, maka tentukan
  - a. energi relativistiknya!
  - b. energi kinetik gerak elektron!

**Pembahasan latihan Soal**

1. Diketahui

$$L_0 = 300 \text{ km}$$

$$v = 0,6c$$

Ditanyakan

$$L = \dots$$

Jawab

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

$$L = 300 \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}$$

$$L = 300 \sqrt{1 - 0,36}$$

$$L = 300 \sqrt{0,64}$$

$$L = 300 \cdot 0,8$$

$$L = 250$$

2. Diketahui

$$m = 90 \text{ kg}$$

$$v = 0,8c$$

Ditanyakan

$$m_0 = \dots$$

Jawab

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

$$90 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$$

$$90 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$90 = \frac{m_0}{0,6}$$

$$90 \times 0,6 = m_0$$

$$m_0 = 54 \text{ kg}$$

3. Diketahui

$$v = 0,6c$$

Massa diam =  $m_0$

Ditanya:

Momentum relativistik (p)

Jawab:

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

$$p = \frac{m_0 \cdot 0,6c}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}}$$

$$p = \frac{m_0 \cdot 0,6c}{\sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}}}$$

$$p = \frac{m_0 \cdot 0,6c}{\sqrt{1 - 0,36}}$$

$$p = \frac{m_0 \cdot 0,6c}{\sqrt{0,64}}$$

$$p = \frac{m_0 \cdot 0,6c}{0,8}$$

$$p = \frac{3}{4} m_0 c$$

4. Diketahui

$$m_0 = 9,31 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$v = 0,5\sqrt{3} c$$

Ditanyakan

a. E ?

b.  $E_k$  ?

Jawab

$$a. E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2$$

$$E = \frac{9,1 \times 10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{(0,5\sqrt{3} c)^2}{c^2}}} \times (3 \cdot 10^8)^2$$



$$E = \frac{9,1x10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{(0,5\sqrt{3} c)^2}{c^2}}} x 9.10^{16}$$

$$E = \frac{9,1x10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{0,75 c^2}{c^2}}} x 9.10^{16}$$

$$E = \frac{9,1x10^{-31}}{\sqrt{1 - 0,75}} x 9.10^{16}$$

$$E = \frac{9,1x10^{-31}}{\sqrt{0,25}} x 9.10^{16}$$

$$E = \frac{9,1x10^{-31}}{0,5} x 9.10^{16}$$

$$E = 18,2x10^{-31} x 9.10^{16}$$

$$E = 1,638 x 10^{-13} J$$

b.  $E_k = E - E_0$

$$E_k = E - m_0.c^2$$

$$E_k = 1,638.10^{-13} - 9,1.10^{-31}.(3.10^8)^2$$

$$E_k = 0,82.10^{-13} J$$

**F. Penilaian Diri**

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut secara jujur dan bertanggung jawab dengan cara membubuhkan tanda centang (✓)!

No	Pertanyaan	Ya	Tidak
1	Saya mampu menjelaskan kontraksi panjang		
2	Saya mampu menjelaskan konsep massa relativistik		
3	Saya mampu menjelaskan konsep momentum relativistik		
4	Saya mampu menjelaskan konsep energy relativistik		
5	Saya mampu menjelaskan hukum kekekalan energy relativistic		

Bila ada jawaban "Tidak", maka segera lakukan review pembelajaran, terutama pada bagian yang masih "Tidak".

Bila semua jawaban "Ya", maka Anda dapat melanjutkan ke pembelajaran berikutnya.

## EVALUASI

Kerjakan soal-soal berikut untuk mengetahui keberhasilan kalian dalam mempelajari modul ini!

- Hukum yang berlaku dalam perhitungan fisika untuk kelajuan benda yang mendekati kelajuan cahaya adalah ....
  - relativitas Newton dan transformasi Lorentz
  - relativitas Einstein dan transformasi Galileo
  - relativitas Newton dan transformasi Galileo
  - relativitas Newton dan transformasi Einstein
  - relativitas Einstein dan Transformasi Lorentz
- Sebuah pesawat supercepat bergerak terhadap bumi dengan laju  $v = 0,6c$ . Di dalam pesawat, pulsa cahaya dipancarkan dari sumber S ke cermin C dan dipantulkan kembali ke S. Peristiwa ini diamati oleh A yang berada di pesawat B yang berada di bumi. Menurut kerangka A, waktu yang diperlukan pulsa cahaya untuk bergerak bolak-balik S-C-S adalah  $2 \times 10^{-8}$  s, maka:
  - menurut A jarak S ke C 3 m.
  - menurut B, jarak S ke C 2,5 m
  - menurut B, waktu yang diperlukan pulsa cahaya untuk bergerak bolak-balik SCS adalah  $2,5 \times 10^{-8}$  s.
  - Menurut B, kelajuan pulsa cahaya pada saat bergerak dari C ke S adalah  $2,5 \times 10^8$  s.Pernyataan yang benar adalah ....
  - (1), (2) dan (3)
  - (2) dan (3)
  - (2) dan (4)
  - (3) dan (4)
  - (4) saja
- Menurut pengamat di sebuah planet ada dua pesawat antariksa yang mendekatinya dari arah yang berlawanan, masing-masing adalah pesawat A yang kecepatannya  $0,5c$  dan pesawat B yang kecepatannya  $0,4c$  ( $c =$  cepat rambat cahaya). Menurut pilot pesawat A, besar kecepatan pesawat B adalah ....
  - $0,1c$
  - $0,25c$
  - $0,4c$
  - $0,75c$
  - $0,9c$
- Suatu unsur memiliki waktu paruh T. Jika unsur tersebut bergerak dengan kecepatan  $1,8 \cdot 10^8$  m/s, maka waktu paruhnya menjadi ....
  - $0,6T$
  - $0,8T$
  - T
  - $1,2T$
  - $1,25T$
- Perbandingan dilatasi waktu untuk system yang bergerak dengan kelajuan  $0,8c$  dan system yang bergerak dengan kelajuan  $0,6c$  adalah....
  - 3 : 4
  - 4 : 3

- C. 4 : 9  
D. 9 : 16  
E. 16 : 9
6. Besarnya kecepatan sebuah tongkat {panjang 2 m} agar panjangnya teramati sebesar 1 m dari laboratorium adalah ....
- A.  $\frac{1}{2}c$   
B.  $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$   
C.  $\frac{1}{3}c$   
D.  $\frac{2}{3}c$   
E.  $\frac{1}{3}\sqrt{2}c$
7. Bila laju partikel  $0,6c$ , maka perbandingan massa relativistic partikel itu terhadap massa diamnya adalah ....
- A. 2 : 3  
B. 3 : 4  
C. 5 : 4  
D. 8 : 3  
E. 7 : 5
8. Jika energi kinetik suatu partikel sama dengan setengah energi diamnya maka kelajuan partikel tersebut adalah ....
- A.  $\frac{1}{2}\sqrt{5}c$   
B.  $\frac{1}{3}\sqrt{5}c$   
C.  $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$   
D.  $\frac{1}{2}\sqrt{2}c$   
E.  $\frac{1}{2}c$
9. Menurut Einstein, sebuah benda dengan massa diam  $m_0$  setara dengan energy  $m_0.c^2$  ( $c$ =kelajuan cahaya dalam vakum). Apabila benda bergerak dengan kecepatan  $v$ , maka energi total setara dengan ....
- A.  $\frac{1}{2}m_0c^2$   
B.  $\frac{1}{2}m_0(2c^2 + v^2)$   
C.  $m_0(c^2 + v^2)$   
D.  $\frac{1}{2}m_0c^2$

E. 
$$\frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

10. Sebuah electron mempunyai energi total tiga kali energy diamnya. Besar momentum electron tersebut adalah ....
- A.  $7,7 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$
  - B.  $6,7 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$
  - C.  $5,7 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$
  - D.  $4,7 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$
  - E.  $3,7 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$

## KUNCI JAWABAN

1. E
2. A
3. D
4. A
5. B
6. B
7. C
8. C
9. E
10. A

## DAFTAR PUSTAKA

- Akrom, Muhamad. 2013. Super Tuntas Bahas dan Kupas Fisika SMA. Jakarta: Pandamedia
- Alfatah, Arif dan Irwan Yusuf. 20011. 100% Suka Fisika SMA Kelas XII. Yogyakarta: Mata Elang Media
- Cahyani, Fieska dan Yandri Santoso.2018. Ffisika Untuk SMA/MA Kelas XII. Bogor: Quadra
- Giancoli, douglas C. 2020. Fisika, Prinsip dan Aplikasi Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga
- Haliday, David. Robert Resnick. Jearl Walker. 2019. Fisika Dasar, Edisi Ketujuh Jilid 3. Jakarta: Erlangga
- Nurziati. 2012. Super Soal Fisika SMA. Jakarta: Gagas Media.