

# RELATIVITAS

**Oleh: Yusman Wiyatmo  
Jurdik Fisika FMIPA UNY**

## **A. Pendahuluan**

Apakah dunia fisis yang bebas dari pengaruh inderawi benar-benar ada? Apakah gunung-gunung, pohon-pohon, ladang, lautan, dan awan semuanya benar-benar ada baik mereka kita amati ataupun tidak? Kesadaran kita terhadap dunia luar terjadi dalam diri kita, mungkin semuanya hanya sebuah ilusi (Pfeffer, 2000: 19).

Selanjutnya, karena tidak ada eksperimen yang dapat membuktikan eksistensi fisis dari sebuah objek yang tak terbedakan oleh pengamat, apakah makna eksistensi fisis tanpa hadirnya pengamat? Apakah segala sesuatu yang kita amati atau lihat benar-benar ada? Dapatkah kita selalu membedakan antara realitas nyata dan maya? Dimanakah batas antara realitas dan ilusi?

Plato mengakui keberadaan dunia luar tetapi ia menyimpulkan bahwa dunia yang kita lihat dengan indera adalah beraneka ragam, pernah berubah, dan tidak dapat dipercaya. Dunia yang sesungguhnya adalah dunia ide-ide yang tidak dapat diubah dan tidak dapat dikorupsi. Dunia ide-ide ini tidak dapat diakses oleh indera tetapi hanya ada dalam pikiran. Dalam hal ini pengamatan tidak berguna.

Menurut pandangan Plato, kejadian fisis tidak membuktikan apa-apa. Kejadian-kejadian fisis tersebut tidak dapat menjungkirbalikkan pemikiran murni. Realitas di balik penampakan. Seseorang menginterpretasikan dunia yang tak sempurna, ia memiliki pengalaman dalam istilah visi kesempurnaan. Ide-ide tentang garis, lingkaran, bujur sangkar lebih nyata dibandingkan dengan sifat-sifat fisis, yang di dalamnya terdapat beberapa contoh murni dari bentuk-bentuk ideal.

Pandangan yang lain dikemukakan oleh Aristoteles sebagai berikut: fisika dan sains umumnya mempelajari dunia fisis dan mendapatkan kebenaran darinya. Pengetahuan asli diperoleh dari pengalaman inderawi melalui intuisi dan abstraksi. Abstraksi-abstraksi ini tidak memiliki eksistensi yang independen dari pikiran. Dengan menggunakan intuisi dan abstraksi, Aristoteles mendeskripsikan kualitas pengamatan terhadap objek dalam konsep mental. Sebagai contoh, karena materi yang ia lihat di sekitarnya, ia melakukan korupsi,

meluruh, atau mengalami kematian. Aristoteles menyimpulkan bahwa perubahan terus-menerus merupakan atribut yang universal dari dunia sublunar.

Jika fenomena cahaya dan penciptaan semesta dapat diterangkan dengan pemikiran dan eksperimen, maka adakah sesuatu di dunia yang tidak dapat? Ini merupakan agenda era modern. Pengukuran menjadi ukuran realitas. Sebuah konsep dianggap nyata secara fisis jika berkaitan dengan dunia fisis yang dapat diukur. Panas meskipun tidak kelihatan adalah nyata secara fisis karena kita dapat mengukur suhu dengan thermometer. Demikian pula warna adalah nyata secara fisis. Setiap konsep yang tidak memuaskan dari kriteria pengukuran dibersihkan dari badan sains.

## **B. Teori Relativitas Khusus**

### **1. Postulat Pertama Einstein**

Postulat pertama Einstein dikenal sebagai prinsip relativitas. Pada postulat ini dinyatakan bahwa: hukum-hukum fisika adalah sama dalam tiap-tiap kerangka acuan inersia. Jika hukum-hukum itu dibedakan maka perbedaan tersebut dapat membedakan satu kerangka inersia dengan kerangka lainnya atau dapat membuat satu kerangka yang bagaimanapun lebih benar dibandingkan kerangka lainnya. Contoh pertama adalah kita mengamati dua anak yang bermain menangkap bola dalam kereta yang bergerak dengan bergerak. Hal ini disebabkan hukum mekanika klasik (Newtonian) adalah sama dalam tiap-tiap sistem inersia (Young dan Freedman, 2003: 649).

Prinsip relativitas Galileo berbunyi bahwa hukum-hukum mekanika seperti hukum-hukum yang mengatur benda jatuh yang sah menurut sebuah kerangka acuan maka juga sah dalam semua kerangka acuan yang bergerak dengan kelajuan konstan. Dengan kata lain mustahil melalui eksperimen-eksperimen yang melibatkan hukum-hukum mekanika, apakah kerangka acuan kita bergerak atau diam terhadap kerangka acuan lainnya yang di dalamnya juga berlaku hukum-hukum mekanika. Einstein memperluas prinsip relativitas Galileo sehingga mencakup semua hukum fisika bukan hanya hukum-hukum mekanika klasik saja tetapi juga mencakup hukum-hukum yang mengatur radiasi gelombang elektromagnetik. Prinsip relativitas Einstein yang telah diperbaharui menyatakan bahwa semua hukum alam sesungguhnya identik dalam semua kerangka acuan yang bergerak secara

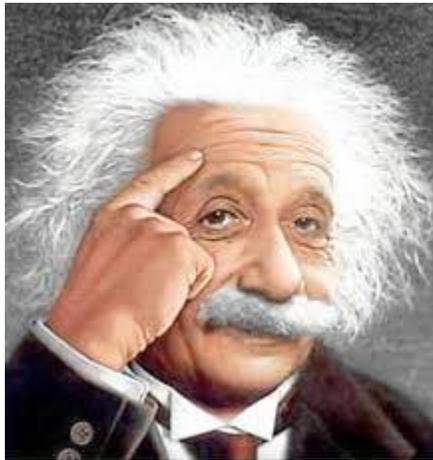
beraturan terhadap satu sama lain dan oleh karenanya tidak ada cara untuk membedakan gerak beraturan absolut atau diam absolut.

Contoh kedua adalah gaya gerak listrik yang diinduksikan dalam sebuah kumparan oleh magnet batang permanen yang digerakkan keluar masuk kumparan. Dalam kerangka acuan ini kumparan dalam keadaan diam, magnet yang bergerak menyebabkan perubahan fluks magnetik yang melalui kumparan tersebut dan timbul gaya gerak listrik (ggl) induksi pada kumparan. Dalam kerangka acuan yang berbeda dapat dibuat dengan cara magnet dalam keadaan diam, sementara kumparan yang digerakkan dalam medan magnet akan menimbulkan ggl induksi. Menurut prinsip relativitas, kedua sudut pandang tersebut berlaku sama, keduanya harus meramalkan ggl induksi yang sama. Hukum induksi Faraday dapat diterapkan untuk kedua deskripsi tersebut. Jika magnet batang yang digerakkan dan kumparan yang digerakkan tidak memberikan hasil yang sama maka kita dapat menggunakan percobaan ini untuk membedakan satu kerangka inersia dari kerangka inersia lainnya. Tentu saja hal ini bertentangan dengan prinsip relativitas.

Konsep yang tak kalah penting adalah ramalan tentang laju radiasi gelombang elektromagnetik yang diturunkan dari persamaan Maxwell, dinyatakan bahwa cahaya dan semua gelombang elektromagnetik bergerak dalam ruang hampa dengan laju konstan  $c = 299.792.458 \text{ m/s}$  atau dibulatkan menjadi  $3.10^8 \text{ m/s}$ . Kelajuan cahaya  $c$  ini memiliki peran penting dalam relativitas.

Teori relativitas khusus pertama menyebutkan bahwa karena eter tidak dapat dideteksi, dan oleh karenanya tidak bermanfaat maka tidak ada alasan untuk terus menelitinya. Eter tidak dapat dideteksi karena setiap upaya untuk mengukurnya atau mengetahui sifatnya yang berpuncak pada eksperimen Michelson-Morley, sama sekali gagal sekalipun hanya untuk menunjukkan keberadaanya. Eter tidak bermanfaat, karena menurut persamaan-persamaan medan elektromagnetik Maxwell, perambatan cahaya dapat dianggap sebagai perambatan energi melalui ruang hampa sekaligus sebagai pengganggu media eter. Menurut Einstein, medan-medan elektromagnetik bukan merupakan media eter dan tidak terikat dengan media apa pun tetapi merupakan realitas-realitas yang independen dan tidak dapat direduksi menjadi sesuatu lainnya. Penegasan ini dikuatkan oleh ketidakmampuan para fisikawan untuk mendeteksi eter (Zukaf, 2003: 160).

Dengan pernyataan itu Einstein mengakhiri sejarah mekanika yang terkenal itu dengan idenya bahwa peristiwa-peristiwa fisik dapat dijelaskan sebagai objek. Mekanika klasik merupakan cerita tentang objek-objek dan gaya-gaya yang bekerja diantara objek-objek tersebut. Hal ini merupakan pemutusan dari sebuah tradisi yang sudah berusia tiga abad lamanya. Medan elektromagnetik tidak memerlukan objek apapun, medan elektromagnetik bukan media eter, tetapi merupakan realitas-realitas puncak yang tidak dapat dipecah-pecah lagi. Sejak saat itu dalam mekanika kuantum tidak ada perumpamaan konkret yang diasosiasikan dengan teori fisika.



Gambar 1. Albert Einstein (Penemu Teori Relativitas)

Teori relativitas dan kuantum mengabarkan keterlepasannya dari pengalaman yang mencirikan teori fisika selama ini. Kenyataannya gejala ini terus berlanjut. Sekalipun ada keniscayaan hukum yang mengaturnya, fisika menjadi semakin abstrak ketika merambah ranah-ranah pengalaman yang semakin luas. Hanya waktu yang dapat menjelaskan apakah gejala ini akan berputar balik atau tidak.

Permasalahan kedua adalah ketiadaan kerangka diam absolut. Mengapa kita harus membuat kerangka acuan yang mempunyai hak-hak istimewa terhadap semua kerangka lainnya, kerangka acuan tunggal yang sama sekali tidak bergerak? Secara teoritis kerangka acuan semacam ini dimungkinkan, tetapi karena tidak bias menjadi bagian dari pengalaman kita maka kerangka acuan tersebut ditolak kehadirannya. Tidaklah mungkin meletakkan di dalam struktur teoritis suatu karakteristik yang tidak sesuai dengan pengalaman kita.

Einstein telah berhasil dua tembok fisika dan filsafat yang kokoh dan membangun sebuah cara yang benar-benar baru untuk memahami realitas. Tanpa eter dan konsep gerak absolut yang membingungkan, realitas dapat dipahami lebih sederhana.

## **2. Postulat Kedua Einstein**

Einstein menjelaskan dalam postulat keduanya sbb: laju cahaya dalam ruang hampa adalah sama dalam semua kerangka acuan inersia dan tidak bergantung pada gerak sumber itu. Misalnya dua orang pengamat mengukur laju cahaya dalam ruang hampa. Pengamat pertama berada dalam keadaan diam terhadap sumber cahaya dan pengamat kedua bergerak sumber cahaya tersebut. Keduanya berada dalam kerangka-kerangka inersia. Menurut prinsip relativitas kedua pengamat harus mendapatkan hasil yang sama yakni laju cahaya sama dengan  $c$  tidak bergantung apakah pengamat itu diam atau bergerak. Hal ini bertentangan dengan akal sehat. Tetapi akal sehat adalah intuisi yang didasarkan pada pengalaman sehari-hari, dan biasanya tidak termasuk pengukuran laju cahaya.

Dalam postulat kedua Einstein juga dapat diungkap bahwa: tidak mungkin untuk seseorang pengamat inersia bergerak dengan laju  $c$ , yakni kelajuan cahaya dalam ruang hampa. Kelajuan benda dengan laju sama dengan kelajuan cahaya  $c$  mengimplikasikan sebuah kontradiksi logis.

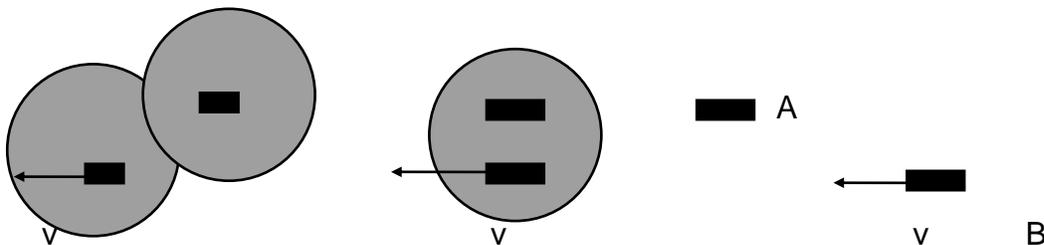
Upaya Einstein selanjutnya adalah memecahkan teka-teki yang telah sedikit terkuak dalam eksperimen Michelson-Morley yakni tentang kekonstanan kelajuan cahaya. Bagaimana mungkin kelajuan cahaya sama dengan  $c = 3.10^8$  m/s, apa pun gerak pengamatnya (diam, mendekati sumber cahaya, atau menjauhi sumber cahaya)? Dengan memutar haluan kerangka berpikir masyarakat secara cerdas, Einstein mengubah teka-teki kecepatan cahaya ini menjadi sebuah postulat. Meskipun disertai dengan kekhawatiran sementara tentang bagaimana mungkin hal ini bias terjadi, Einstein sungguh-sungguh menerima fakta yang tak terbantahkan secara eksperimental bahwa kelajuan cahaya selalu konstan. Teka-teki kekonstanan kelajuan cahaya diubah menjadi prinsip kekonstanan kelajuan cahaya. Prinsip kekonstanan kelajuan cahaya adalah fondasi pertama teori relativitas.

Dari sudut pandang mekanika klasik, prinsip kekonstanan kelajuan cahaya ini sama sekali tidak dapat dimengerti. Prinsip tersebut bertentangan dengan akal sehat. Sebelum Einstein, akal sehat yang totaliter memandang kekonstanan kelajuan cahaya sebagai sebuah paradoks.

Ketika kita menabrak batas-batas pengetahuan kita sendiri, hasilnya selalu menjadi sebuah paradoks. Dalam pikiran murni orang awam, jika kekonstanan cahaya tidak keliru maka akal sehatlah yang pasti keliru.

Korban utama dari pemikiran pemula Einstein adalah seluruh struktur transformasi klasik (Galilean), bahwa buah manis tetapi ilusif dari sebuah akal sehat itu berlabuh pada dimensi-dimensi kecepatan benda-benda makroskopis seperti gerak mobil, gerak pesawat terbang, gerak planet, dan sebagainya. Menundukkan akal sehat bukanlah pekerjaan yang mudah. Einstein adalah orang pertama yang melakukan secara total sehingga persepsinya terhadap ruang waktu berubah secara radikal. Selain itu ketika dipaparkan dan diterapkan secara keseluruhan, pandangan Einstein tentang ruang dan waktu menjadi lebih bermanfaat dari pada pandangan akal sehat (Zukav, 2003: 163).

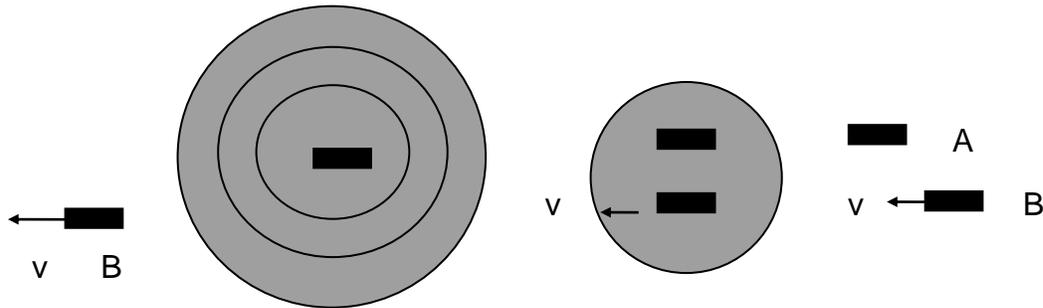
Postulat kedua Einstein muncul secara langsung dari hasil berbagai percobaan. Kesan pertama postulat ini kelihatannya sangat radikal, namun demikian postulat ini mengikuti hampir semua konsep intuitif mengenai waktu dan ruang yang kita bentuk berdasarkan pengalaman sehari-hari. Contoh sederhana dapat diamati pada Gambar 2 sebagai berikut:



**Gambar 2. Gejala Relativistik**

Dua buah kapal A dan B, kapal A diam di atas air sedangkan kapal B bergerak dengan kecepatan tetap  $v$ . Pada kawasan tersebut diliputi kabut sehingga kedua pengamat dalam masing-masing kapal tidak dapat mengetahui kapal mana yang bergerak. Pada saat kapal B berdemping dengan A, api dinyalakan untuk sesaat. Cahaya api bergerak dengan kelajuan tetap dalam semua arah sesuai dengan postulat kedua relativitas khusus. Pengamat pada masing-masing kapal mendapatkan bola cahaya mengembang dengan dirinya sebagai pusat, sesuai dengan prinsip relativitas, walaupun salah seorang pengamat berubah kedudukannya terhadap tempat padamnya api tersebut. Pengamat dalam kapal tidak dapat mendeteksi kapal

mana yang mengalami perubahan tempat, karena kabut menghilangkan kerangka acuan lain daripada kapal itu sendiri, dan karena kelajuan cahaya sama untuk kedua pengamat itu maka keduanya melihat gejala yang sama (Yusman Wiyatmo, 2007: 5). Gejala pada Gambar 2 merupakan gejala yang luar biasa. Gejala lain yang serupa dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3. Gejala Sehari-hari**

Kedua kapal A dan B berada pada suatu daerah tengah laut yang cerah. Pada saat kedua kapal berdampingan, salah seorang pengamat menjatuhkan batu ke dalam air. Pola seperti lingkaran dari riak yang terjadi meluas seperti tampak pada Gambar 3. Ternyata pola tersebut terlihat berbeda terhadap masing-masing pengamat dalam kapal itu. Hanya dengan mengamati apakah ia terdapat pada pusat pola riak itu, masing-masing pengamat dapat mengatakan apakah ia bergerak relatif terhadap air atau tidak. Air dalam hal ini dapat berlaku sebagai kerangka acuan. Pengamat dalam kapal yang bergerak dapat mengukur kelajuan riak terhadap dirinya sendiri dan mendapatkan perbedaan pada arah yang berbeda, berlainan dengan kelajuan riak yang serba sama terhadap pengamat dalam kapal yang diam. Hal ini membuktikan bahwa gerak dan gelombang dalam air berbeda dengan gerak dan gelombang dalam ruang hampa. Air dapat merupakan kerangka acuan sedangkan ruang hampa tidak. Kelajuan gelombang dalam air berubah terhadap pengamat, sedangkan kelajuan cahaya dalam ruang hampa tidak berubah terhadap pengamat.

Satu-satunya cara untuk menafsirkan persepsi bola cahaya yang mengembang secara identik dalam kedua kapal itu ialah dengan menganggap bahwa sistem koordinat dari masing-masing pandangan terpengaruh oleh gerak relatifnya. Jika gagasan ini dikembangkan dengan pertolongan postulat Einstein maka akan diperoleh banyak efek tak terduga dapat diramalkan, dan ternyata semuanya telah terbukti secara eksperimental.

### C. Pemuaian Waktu

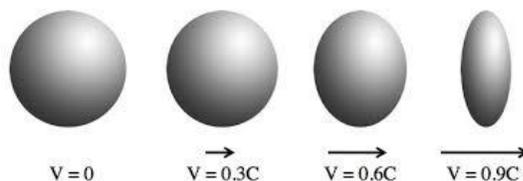
Sebuah lonceng yang bergerak terhadap pengamat kelihatannya bergerak lebih lambat daripada jika lonceng itu diam terhadapnya. Hal ini berarti bahwa jika seorang pengamat dalam suatu roket mendapatkan selang waktu antara dua kejadian dalam roket  $t_0$ , orang di bumi mendapatkan bahwa selang waktu tersebut lebih panjang yaitu  $t$ . Kuantitas  $t_0$  yang ditentukan oleh kejadian yang terdapat pada tempat yang sama dalam kerangka acuan pengamatnya disebut selang waktu proper antara kejadian itu. Bila diamati dari bumi kejadian yang menandai permulaan dan akhir selang waktu itu terjadi pada tempat yang berbeda, dan mengakibatkan selang waktunya kelihatan lebih panjang dari waktu proper. Fenomena ini disebut pemuaian waktu. Hubungan antara waktu proper  $t_0$  dan waktu relativistik  $t$  tampak pada persamaan (1).

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots(1)$$

- dengan  $t_0$  : selang waktu pada lonceng yang diam relatif terhadap pengamat.
- $t$  : selang waktu pada lonceng dalam keadaan gerak relatif terhadap pengamat.
- $v$  : kelajuan gerak relatif.
- $c$  : kecepatan cahaya.

### D. Kontraksi Lorentz

Pengukuran panjang seperti halnya pengukuran selang waktu juga dipengaruhi oleh gerak relatif. Panjang  $L$  benda yang bergerak terhadap pengamat kelihatannya lebih pendek dari panjang  $L_0$  bila diukur dalam keadaan diam terhadap pengamat. Gejala ini dikenal sebagai *pengerutan Lorentz Fitz Gerald*. Panjang  $L_0$  suatu benda dalam kerangka diamnya disebut sebagai *panjang proper*. Fenomena dapat dilihat pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Ukuran Objek Akan Mengalami Kontraksi Panjang Pada Bagian yang Searah dengan Gerakan Objek

Contoh gejala fisis yang memenuhi pengerutan panjang ini adalah terbentuknya muon. Muon adalah partikel tak stabil yang tercipta pada tempat tinggi oleh zarah cepat dalam sinar kosmik yang datang dari angkasa luar sewaktu terjadi tumbukan dengan inti atom dalam atmosfer bumi. Muon memiliki ciri-ciri fisis seperti terungkap pada Tabel 1.

Tabel 1. Ciri-ciri Fisis Muon

Massa	207 massa elektron
Muatan	-e atau +e
Kecepatan	0,998 c = 2,994 X 10 <sup>8</sup> m/s

Muon akan meluruh menjadi elektron atau positron setelah umur rata-ratanya 2  $\mu$ s. Muon dalam sinar kosmik berkelajuan 0,998 c dan mencapai permukaan laut dalam jumlah besar. Muon menembus tiap cm persegi permukaan bumi rata-rata lebih dari 1 kali tiap menit. Dalam umur rata-rata muon tersebut jarak yang dapat ditempuh sebelum meluruh adalah:

$$h_0 = vt_0 = (2,994 \cdot 10^8 \text{ m/s})(2 \cdot 10^{-6} \text{ s}) = 600 \text{ m}$$

Sedangkan muon tercipta pada ketinggian 6000 m atau lebih. Untuk memecahkan paradoks ini maka tinjau bahwa umur muon 2 $\mu$ s didapat oleh pengamat yang dalam keadaan diam terhadap muon. Karena muon bergerak ke arah kita yang berada di bumi maka umurnya akan memanjang terhadap kerangka acuan kita dengan pemuaiian waktu, sehingga umur muon menjadi:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}} = 31,6 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 31,6 \mu\text{s}$$

Hal ini berarti bahwa muon yang bergerak memiliki umur 16 kali lebih panjang dari pada dalam keadaan diam. Dalam selang waktu t= 31,6 $\mu$ s sebuah muon yang berkelajuan 0,998 c dapat menempuh jarak:

$$h = vt = (2,994.10^8 \text{ m / s})(31,6.10^{-6} \text{ s}) = 9.500\text{m}$$

Walaupun umur muon hanya  $t_0 = 2\mu\text{s}$  terhadap kerangka acuannya, namun muon dapat mencapai tanah dari ketinggian 9.500 m karena dalam kerangka acuan pengamat di bumi umur muon adalah  $31,6\mu\text{s}$ .

Apakah yang terjadi jika ada pengamat yang ikut dengan muon turun dengan kelajuan  $v = 0,998 c$ , sehingga terhadap pengamat muon dalam keadaan diam. Pengamat dan muon berada dalam kerangka acuan yang sama, dalam kerangka ini umur muon  $2 \mu\text{s}$ . Terhadap pengamat ini muon hanya dapat menempuh jarak 600 m sebelum meluruh. Satu-satunya cara untuk menerangkan pencapaian tanah oleh muon ialah dengan menyatakan bahwa jarak yang ditempuhnya diamati oleh pengamat dalam kerangka bergerak menjadi lebih pendek karena pergerakan itu. Prinsip relativitas menyatakan bahwa besarnya pengerutan sebanding dengan  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ .

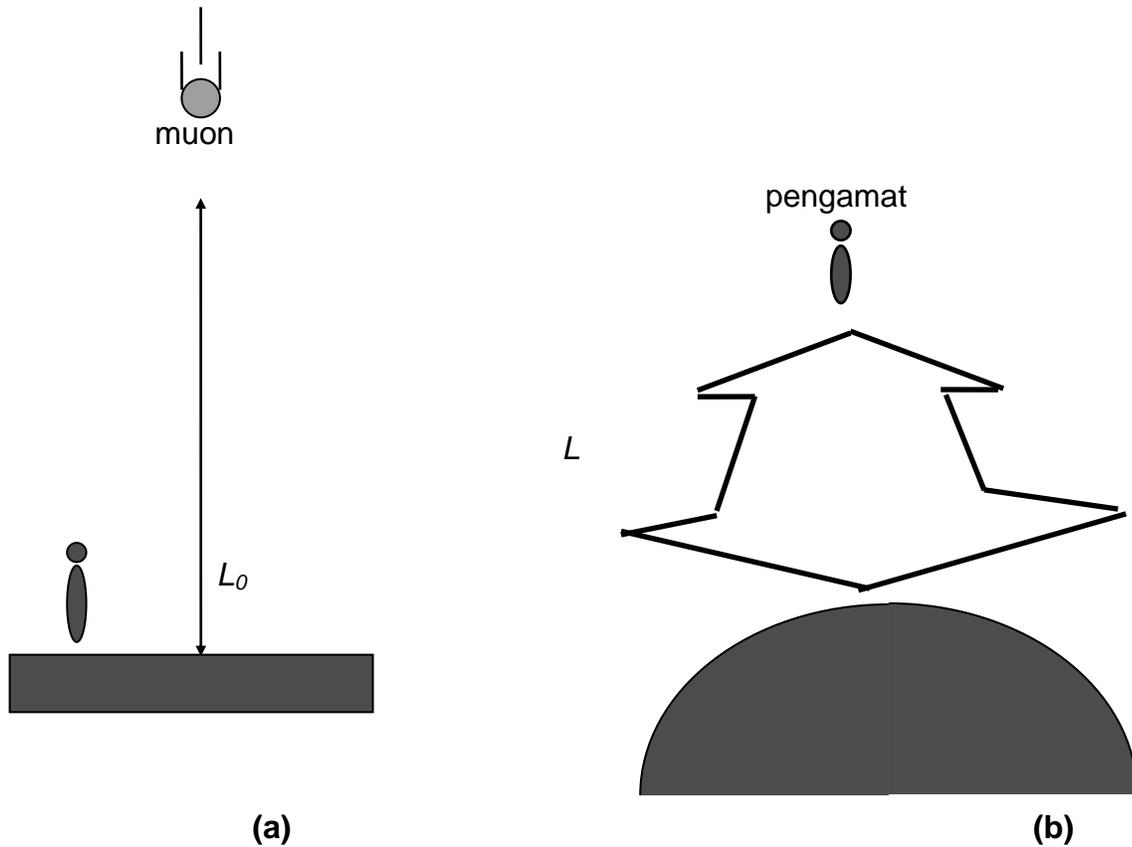
Jadi dapat disimpulkan bahwa ketinggian  $h_0$  yang kita ukur harus menjadi lebih kecil dalam kerangka acuan muon  $h$  yang memenuhi persamaan (2).

$$h = h_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \dots\dots\dots(2)$$

Dalam kerangka acuan kita muon menempuh jarak  $h_0 = 9.500 \text{ m}$  karena pemuaian waktu. Dalam kerangka acuan muon yang tidak mengalami pemuaian waktu, jaraknya mengerut menjadi:

$$h = (9.500\text{m}) \sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}} = 600\text{m}$$

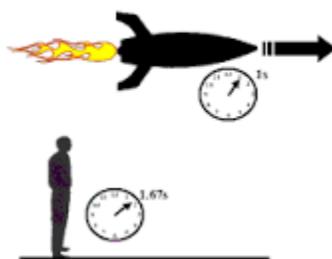
Peristiwa pengerutan uon dapat diamati pada Gambar 5.



Gambar 5. (a). Diamati oleh pengamat di bumi ketinggian terjadinya muon  $L_0$ .  
 (b). Diamati oleh orang yang bergerak bersama muon, permukaan bumi berada pada jarak  $L$  di bawahnya. ( $L_0 > L$ ).

Fitz Gerald dan Lorentz membayangkan bahwa penggaris-penggaris yang pejal dimampatkan oleh tekanan belitan eter. Menurut Einstein, gerak itu sendirilah yang menyebabkan kontraksi panjang dan memuainya waktu. Dalam hal ini terdapat cara lain untuk melihat peristiwa kekonstanan kelajuan cahaya. Jika penggaris yang bergerak menjadi lebih pendek dan arloji yang bergerak berdetak lebih lambat sehingga pengamat yang bergerak akan mengukur kelajuan cahaya dengan sebuah penggaris yang lebih pendek (jarak lintasan cahaya lebih pendek) dan sebuah arloji yang lebih lambat iramanya (membutuhkan waktu lebih lama) dari pada pengamat yang diam. Setiap pengamat akan menganggap penggaris dan arlojinya sangat normal dan sempurna, sehingga kedua pengamat akan memperoleh kelajuan cahaya sama dengan  $c$ .

Inilah buah awal dari asumsi-asumsi dasar Einstein (prinsip kekonstanan kelajuan cahaya dan prinsip relativitas). Pertama, Sebuah objek yang bergerak tampak memendek lintasannya ketika kelajuannya bertambah, pada kelajuan cahaya, objek akan lenyap. Kedua, sebuah arloji yang bergerak bergerak lebih lambat dari pada arloji yang diam, dan terus melambat iramanya ketika kelajuannya bertambah, pada kelajuan arloji sama dengan kelajuan cahaya, arloji akan berhenti berdetak, seperti tampak pada Gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6. Arloji yang Bergerak Akan Berdetak Lebih Lambat

Efek-efek ini hanya terlihat oleh seorang pengamat yang diam, yakni pengamat yang diam terhadap arloji dan penggaris yang bergerak. Efek-efek ini tidak terlihat oleh pengamat yang bergerak bersama dengan arloji dan penggaris. Untuk menerangkan hal ini Einstein memperkenalkan istilah proper (benar) dan relatif. Panjang penggaris yang kita ukur ketika kita diam terhadap penggaris disebut panjang proper. Selang waktu yang kita ukur ketika kita diam terhadap arloji disebut waktu proper. Panjang proper dan waktu proper terlihat normal. Panjang yang kita amati ketika mistar bergerak terhadap kita disebut panjang relatif. Demikian pula selang waktu yang kita ukur ketika arloji bergerak terhadap kita disebut waktu relatif. Panjang relatif selalu lebih pendek dibandingkan panjang sebenarnya (panjang proper). Waktu relatif selalu lebih lama dibandingkan waktu sebenarnya (waktu proper).

Waktu yang kita lihat pada arloji kita sendiri adalah waktu proper, dan waktu yang kita lihat pada arloji orang yang bergerak terhadap kita adalah waktu relatif (menurut penglihatan kita, bukan penglihatan orang yang bergerak terhadap kita). Panjang mistar di tangan kita sendiri adalah panjang sebenarnya, dan panjang mistar di tangan orang lain yang

bergerak terhadap kita adalah panjang relatif. Dari kerangka acuan orang yang bergerak terhadap kita, maka orang tersebut diam dan kita bergerak, dan sebaliknya.

Bayangkan kita sedang naik sebuah pesawat luar angkasa untuk melakukan eksplorasi. Kita diharuskan menekan sebuah tombol setiap lima belas menit sekali untuk mengirimkan sebuah sinyal ke bumi. Ketika kecepatan pesawat terus-menerus bertambah, rekan-rekan kita di bumi melihat bahwa sinyal-sinyal yang kita kirim ke bumi mulai berinterval tujuh belas menit, dan kemudian dua puluh menit. Setelah beberapa hari rekan-rekan kita di bumi mulai keheranan mendapati bahwa sinyal-sinyal yang kita kirim datang setiap dua hari sekali. Ketika kecepatan pesawat terus bertambah, sinyal-sinyal yang kita kirim datang ke bumi dalam interval waktu tahunan. Akhirnya sinyal-sinyal kita datang setiap satu, dua generasi dan seterusnya. Sementara itu di pesawat, kita sama sekali tidak mengetahui kebingungan rekan-rekan kita di bumi. Sejauh pengetahuan kita, semuanya berjalan sesuai dengan rencana, meskipun kita menjadi bosan dengan rutinitas menekan tombol setiap lima belas menit sekali. Ketika kita kembali ke bumi beberapa tahun kemudian (waktu kita sendiri), kita mendapati bahwa kita telah berkelana, menurut waktu bumi selama berabad-abad (waktu relatif). Tepatnya lama waktu itu bergantung pada kecepatan pesawat (Zukaf, 2003: 168).

Peristiwa ini bukanlah fiksi ilmiah, peristiwa ini didasarkan pada sebuah fenomena terkenal yang disebut paradoks kembar. Paradoksnya terletak pada seseorang yang tetap tinggal di bumi dan saudara kembarnya yang pergi dengan pesawat ruang angkasa dan kembali ke bumi dengan usia yang lebih muda dibandingkan saudara kembarnya yang tinggal di bumi.

Contoh lain waktu proper dan waktu relatif dapat dikemukakan sebagai berikut: misalnya kita berada di stasiun luar angkasa untuk mengamati seorang astronot yang meluncur dengan kecepatan 161 kilo mil per detik terhadap kita. Ketika kita melihatnya, kita mendapati kelembaman tertentu dalam gerakannya, seolah-oleh astronot tersebut bergerak pelan (slow motion). Kita juga mendapati bahwa semua yang ada di dalam pesawat tampak bergerak pelan. Rokok si astronot, sebagai contoh, tersisa dua kali lebih panjang dibandingkan rokok kita. Tentu saja kelembamannya itu disebabkan oleh fakta bahwa astronot itu dengan cepat semakin jauh jaraknya dari kita, dan dalam setiap

momentum, pesawatnya semakin jauh jangkauannya dari kita. Meski demikian setelah menghitung lama waktu penerbangannya, kita masih mendapati bahwa astronot itu bergerak lebih lambat dari biasanya.

Akan tetapi bagi astronot, kita lah yang menyalipnya dengan kecepatan 161 kilo mil per detik, dan setelah mengetahui yang sebenarnya, dia mendapati bahwa kita lah yang bergerak lambat. Rokok kita masih tersisa dua kali lebih panjang dibandingkan rokoknya. Peristiwa ini merupakan ilustrasi yang paling tepat tentang bagaimana rumput di hamalan sebelah selalu lebih hijau. Rokok setiap orang tersisa dua kali lebih panjang dari pada rokok orang lain.

Waktu yang kita alami dan ukur sendiri adalah waktu kita sendiri. Rokok kita bakar habis sesuai dengan lama waktu normalnya. Waktu yang kita ukur adalah waktu relative bagi astronot. Rokok astronot lebih panjang dua kali dari pada rokok kita karena waktunya berjalan dua kali lebih lambat dari pada waktu kita. Ini menggambarkan panjang proper dan panjang relatif. Dari sudut pandang kita, rokok astronot, ini menunjukkan arah yang dituju pesawatnya, lebih panjang dari rokok kita sendiri.

Dari cara pandang yang lain, astronot tersebut melihat dirinya diam dan rokoknya normal. Dia juga melihat kita meluncur dengan kecepatan 161 kilo mil per detik terhadapnya, dan rokok kita lebih panjang dar pada rokoknya dan terbakar lebih lambat.

## **E. Evaluasi**

1. Jelaskan mengapa kelajuan cahaya konstan sama dengan  $c$  baik diamati oleh pengamat yang diam maupun pengamat yang bergerak (baik menjauhi maupun mendekati) sumber cahaya?
2. Berdasarkan postulat kedua Einstein, apakah kelajuan zarah dapat melampaui kelajuan cahaya? Jelaskan!
3. Cari kelajuan pesawat angkasa yang loncengnya berjalan 15 detik lebih lambat tiap jam relatif terhadap lonceng di bumi!

4. Batang meteran kelihatan hanya mempunyai panjang 50 cm terhadap seorang pengamat. Berapakah kelajuan relatifnya? Berapa waktu yang diperlukan untuk melewati pengamat itu?
5. Nakula melakukan perjalanan ke ruang angkasa dengan pesawat berkelajuan 0,8 c menuju bintang yang berjarak 4 tahun cahaya. Hitunglah:
  - a. Menurut kerangka acuan saudara kembarnya (Sadewa) yang tinggal di Bumi, berapa lama Nakula melakukan perjalanan luar angkasa?
  - b. Menurut kerangka acuan Nakula, berapa tahun ia melakukan perjalanan ruang angkasa?
  - c. Berapa tahun selisih perhitungan Nakula dan Sadewa terkait dengan perjalanan ruang angkasa tersebut?
  - d. Berapa tahun cahaya jarak pulang pergi antara Bumi dan bintang menurut kerangka acuan Nakula?
6. Sebuah zarah tak stabil tercipta pada ketinggian 15.000 m di atas permukaan Bumi dan bergerak mendekati Bumi. Jika umur zarah tersebut terhadap kerangka diamnya 2,5 mikro detik, tentukan:
  - a. Berapa jarak tempuh zarah terhadap kerangka diamnya?
  - b. Berapa umur zarah terhadap kerangka acuan pengamat yang diam di Bumi?
  - c. Berapa jarak tempuh zarah menurut kerangka acuan pengamat yang diam di Bumi?

## **F. Daftar Pustaka**

- Pfeffer, JI and Solomo Nir. 2000. *Modern Physics, An Introductory Text*. London: Imperial College Press.
- Young and Freedman. 2003. Trans: P. Silaban. *Fisika Universitas*. Edisi 10 Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Yusman Wiyatmo. 2007. *Fisika Modern*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Zukav, G. 2003. Trans: Agung Prihantoro dan Fuad Arif Fudiyatarto. *Dancing Wu Li Masters An Overview of The New Physics*. Yogyakarta: Kreasi Wacana.