

KONSEP PEMAHAMAN TEORI RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN TENTANG PEMUAIAN WAKTU

Ahmad Kurnia
Teknik Elektro, Politeknik TEDC Bandung

Abstrak

Teori relativitas khusus Einstein tentang pemuaian waktu telah memberi pandangan bahwa besaran waktu, panjang dan juga massa adalah besaran relatif atau dinamis. Einstein menyampaikan teori tersebut setelah melihat fakta bahwa kecepatan cahaya adalah tetap tidak tergantung dari gerak pengamat. Obyek yang bergerak mendekati kecepatan cahaya menurut pandangan pengamat yang diam akan terlihat waktunya berjalan lebih lambat. Fenomena ini diuraikan dalam "Paradok Kembar", istilah dalam konsep pemuaian waktu. Paradok Kembar karena hukum alam, bahwa fenomena tersebut berada dalam kontinum berdimensi empat ruang-waktu dengan 3 koordinat x, y, z untuk ruang dan koordinat ke-4 yakni t (ct) yang terkait waktu ($\gamma = \sqrt{1-v^2/c^2}$). Dengan memakai postulat ke-2 Einstein, akan dapat difahami konsep dan proses pemuaian waktu. Pembuktian pemuaian waktu dengan wahana berawak seperti roket yang membawa astronot pulang-pergi ke bulan, tidak teramati karena hanya berbeda 0,72 mikro detik untuk perjalanan 7 hari. Baru setelah 60 tahun dicetuskan Einstein, dua fisikawan dari MIT Amerika Serikat telah berhasil membuktikan kebenaran teori tersebut. Beliau mengamati peluruhan partikel hasil tumbukan sinar kosmik dengan atmosfer bumi yang disebut muon, yang mengalami peluruhan lambat, yang seharusnya tersisa 5 % ketika sampai di permukaan laut, ternyata masih tersisa 68 % . Ini berarti muon yang berkecepatan 0,94 c mengalami pelambatan waktu sehingga peluruhannya baru sedikit.

Kata kunci: teori relativitas, Einstein, pemuaian waktu, paradok kembar

I. PENDAHULUAN

Teori Relativitas, dari kata relatif menyatakan sesuatu yang relatif, lawan kata dari mutlak atau absolut. Teori Relativitas dikembangkan oleh ilmuwan Albert Einstein pada tahun 1905 untuk relativitas khusus dan tahun 1916 untuk relativitas umum. Postulat tentang Relativitas Khusus berkaitan dengan struktur ruang dan waktu, sedangkan Relativitas Umum sudah mengaikkannya dengan gravitasi. Ruang merupakan besaran volume yang memiliki tiga dimensi yakni dimensi 1 – garis (panjang) , dimensi ke-2 – luas (panjang X lebar) dan dimensi ke-3 – volume (panjang X lebar X tinggi). Jadi volume atau ruang merupakan besaran panjang pangkat 3, sedangkan waktu adalah besaran tersendiri yang tidak terkait dengan ruang. Teori Relativitas Khusus menyimpulkan bahwa besaran waktu tak lain merupakan dimensi ke-4 dari ruang.

Konsep kesatuan ruang dan waktu memang tidak sederhana untuk dapat difahami. Untuk itu langkah pertama harus mendefinisikan apa yang dimaksud dengan gerak. Jika suatu benda dinyatakan bergerak, artinya kedudukannya berubah relatif terhadap suatu acuan. Contoh, ketika berada dalam gerbong keretapi yang diam di stasion, dari kaca jendela kita lihat di rel sebelah ada gerbong keretapi lain yang juga diam.

Kemudian mata kita yang mengamati gerbong keretapi sebelah mulai mulai bergerak. Disini kita tidak dapat memastikan gerbong keretapi sebelah yang bergerak dan gerbong kita yang diam, atau sebaliknya, gerbong kita yang bergerak. Untuk menentukan gerbong mana yang bergerak harus ditentukan acuan, disini acuannya adalah stasion. Akan terlihat gerbong mana yang bergerak meninggalkan stasion. Apabila kita berjalan dalam gerbong keretapi yang bergerak, dikatakan kita bergerak relatif terhadap keretapi dan keretapi bergerak relatif terhadap stasion. Dalam skala makro, stasion atau bumi tidak dapat dijadikan acuan, karena bumi bergerak relatif atau beredar mengelilingi matahari, dan matahari juga tidak dapat dijadikan acuan karena bergerak relatif terhadap pusat Galaksi Bima Sakti. Apakah pusat galaksi yang menjadi pusat acuan atau acuan mutlak? Edwin Hubble pada tahun 1929 dalam pengamatannya menemukan pergeseran cahaya bintang ke arah merah (ini berarti frekwensinya cenderung menurun). Setelah dikaji korelasinya dengan efek Dopler; disimpulkan bahwa galaksi dan bintang-bintang bergerak saling menjauh. Dengan demikian galaksi bintang-bintang juga bergerak dan ruang alam semesta ini mengembang. Jadi kesimpulannya, tidak dapat ditentukan kerangka atau acuan universal yang meliputi

seluruh ruang. Ini berarti di alam semesta ini tidak ada "Gerak Absolut". Jadi semua materi di alam semesta bergerak, sehingga tidak dapat didefinisikan kerangka acuan yang "diam" sebagai acuan universal. Oleh sebab itu dalam menentukan posisi atau koordinat suatu titik dalam ruang tidak cukup dengan koordinat seperti koordinat Cartesius dengan 3 komponen arah yang biasa disimbolkan dengan arah x , y dan z . Transformasi Galileo yang disempurnakan oleh H.A Lorentz untuk kecepatan yang mendekati kelajuan cahaya, merumuskan perubahan kecepatan sebuah benda berdasarkan suatu kerangka acuan terhadap kerangka acuan lain yang bergerak atau diam. Persamaan transformasi Lorentz untuk suatu peristiwa dalam koordinat acuan yang bergerak memunculkan faktor t atau waktu dalam menentukan koordinatnya, sehingga besaran waktu menjadi koordinat ke empat dalam ruang. Karena ketiadaan acuan universal itulah, maka koordinat dari suatu posisi selain 3 koordinat cartesius x , y dan z ; bertambah satu yang mengandung besaran waktu. Koordinat x , y dan z merupakan besaran panjang/jarak, maka koordinat ke empat tersebut juga merupakan besaran panjang. Dari persamaan kecepatan $v = \text{jarak/waktu}$, maka jarak = kecepatan \times waktu. Dalam koordinat relativistik, koordinat jarak atau panjang yang ke empat tersebut adalah $c \times t$, dimana $c =$ kecepatan cahaya dan $t =$ waktu. Jadi koordinat relativistik suatu posisi adalah (x, y, z, ct) . Memang sulit bahkan tidak dapat digambarkan dan dibayangkan dalam ruang nyata 3 dimensi, bagaimana koordinat posisi (x,y,z,ct) tersebut. Koordinat (x,y,z,ct) menyatakan koordinat peristiwa yang sudah dan sedang berjalan di alam ini. Dr. Hans J. Wosparik, dosen fisika teori dari ITB, menyatakan bahwa peristiwa masa lalu yang telah terjadi yang kita kenal sebagai sejarah, dalam fisika relativistik merupakan proses dari gerak alam semesta. Dr. Hans J. Wosparik adalah fisikawan yang mendalami bidang partikel dan relativitas umum Einstein, ditahun 1980-an pernah melakukan riset bersama Martinus Veltman, pemenang hadiah Nobel Fisika tahun 1999.

Munculnya teori Relativitas dikarenakan konsekuensi dari ketiadaan kerangka acuan universal tersebut. Albert Einsein mengembangkan Teori Relativitas Khusus yang menganalisa kerangka acuan universal yang merupakan kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap terhadap kerangka lainnya. Teori Relativitas Khusus oleh Einstein memunculkan 2 postulat :

1. Hukum Fisika dinyatakan dalam persamaan yang sama untuk semua kerangka

acuan inersial atau kerangka yang bergerak dengan kecepatan tetap antara satu dan lainnya. Postulat ini muncul karena jika hukum fisika berbeda untuk pengamat yang berbeda ketika dalam keadaan gerak relatif, maka dapat ditentukan yang mana dalam keadaan "diam" dan yang mana dalam keadaan "bergerak", tetapi kenyataannya tidak ada kerangka acuan universal atau dapat dikatakan tidak ada posisi diam mutlak.

2. Rambatan cahaya dalam ruang hampa memiliki kelajuan yang sama untuk semua pengamat, tidak bergantung dari keadaan gerak pengamat (diam atau bergerak).

Postulat ke-2 ini menyatakan bahwa kecepatan cahaya adalah sama untuk semua arah dan kondisi, disamping itu tidak ada obyek yang dapat bergerak melebihi kecepatan cahaya.

Kedua postulat tersebut membuat perubahan besar ilmu fisika dalam cara memahami fenomena alam baik makrokospis maupun mikrokospis. Akibat Postulat Kerelatifan Khusus tersebut, maka besaran panjang/ruang, waktu dan massa bukan sesuatu yang mutlak tetapi relatif. Andaikan ada Roket yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, akan terlihat lebih pendek terhadap pengamat yang diam daripada penumpang dalam roket tersebut, kemudian selang waktu 2 peristiwa dalam roket akan terasa lebih lama terhadap pengamat diam dibandingkan dengan penumpang roket tersebut dan massa roket terlihat lebih besar terhadap pengamat dibandingkan terhadap penumpang roket tersebut. Fenomena ini memang tidak sederhana untuk difahami.

Teori Relativitas Khusus

Teori ini berkaitan dengan kerelatifan khusus mengenai ruang dan waktu. Teori ini juga memberi wawasan baru bidang fisika, yakni fisika modern, yang berbeda dengan fisika klasik. Konsep-konsep fisika klasik seperti mekanika Newton telah dapat menjawab dan memahami berbagai fenomena alam dalam kehidupan sehari-hari, tetapi terbatas untuk gerak benda kecepatan rendah. Akan berbeda halnya bila benda bergerak dengan kecepatan tinggi, mendekati kecepatan cahaya. Ketika Huygens dapat menyimpulkan bahwa cahaya adalah juga gelombang seperti halnya gelombang bunyi, tentunya gelombang cahaya juga memerlukan medium untuk perambatannya. Masalah timbul ketika cahaya matahari mencapai bumi, zat atau medium apa yang menjadi perantaranya karena ruang angkasa antara bumi dan matahari hampa udara. Timbullah hipotesa,

bahwa ada medium yang dinamakan Eter , yang berada dimana-dimana termasuk di ruang hampa. Eksperimen yang dilakukan oleh Albert A. Michelson dan Edward W. Morley pada tahun 1887 dengan alat interferometer untuk menganalisa pengaruh zat eter dalam perambatan cahaya matahari , tidak menunjukkan adanya zat yang bernama eter. Hal yang mengejutkan lainnya dari eksperimen tersebut adalah kecepatan cahaya besarnya tetap tidak tergantung dari gerak.

Setelah disimpulkan bahwa kelajuan cahaya adalah absolut, besarnya tetap tidak tergantung gerak dan tidak ada gerak yang dapat melebihi kecepatan cahaya, tentunya harus dikaji ulang penjumlahan kecepatan dalam mekanika klasik. Teori Relativitas Khusus Einstein membawa akibat luas yang menyimpang dari pengamatan sehari-hari. Contoh dalam mekanika klasik, misal keretapi bergerak melewati stasion tanpa berhenti dengan kecepatan 36 km/jam (10 m/detik), kemudian seorang penumpang berlari searah dengan gerak keretapi dari gerbong paling belakang keretapi ke gerbong depan dengan kecepatan 18 km/jam (5 m/detik). Bila gerak keretapi terhadap pengamat = v_k dan gerak penumpang terhadap keretapi = v_o , maka pengamat yang berada di stasion akan melihat penumpang tersebut bergerak dengan kecepatan $v_p = v_k + v_o = 10 + 5 = 15$ m/detik. Andaikan keretapi bergerak mendekati kecepatan cahaya $v_k = c$ (c = kecepatan cahaya) dan penumpang yang berlari bergerak dengan kecepatan $v_o = 0,5 c$, maka menurut mekanika klasik, pengamat di stasion akan melihat kecepatan penumpang $v_p = v_k + v_o = 0,9 c + 0,5 c = 1,4 c$, ini akan bertentangan dengan postulat bahwa tidak ada obyek yang berkecepatan diatas kecepatan cahaya c .

Untuk itu teori relativitas merumuskan penjumlahan kecepatan relativistik sebagai berikut :

$$V_R = \frac{V_1+V_2}{1+(V_1.V_2)/C^2} \dots\dots\dots (1)$$

Jadi bila $v_1 = 0,9 c$ dan $v_2 = 0,5 c$ akan diperoleh kecepatan yang diamati pengamat $v_p = 1,4 c / ((1 + 0,45 c^2 / c^2)) = 0,965 c$. Bagaimana bila $v_1 = c$? Kita akan mendapatkan $(v_1 + c) / [c (v_1 + c)/c^2] = c (v_1 + c) / (v_1 + c) = c !$, begitupun bila $v_1 = v_2 = c$ akan diperoleh $v_R = c$.

Kesimpulannya obyek berkecepatan cahaya c misalkan keretapi, dan penumpang juga bergerak dengan kecepatan c terhadap keretapi, maka penumpang yang bergerak tersebut diamati oleh pengamat di stasion = c dan sama dengan

kecepatan yang diamati oleh penumpang diam didalam keretapi .

Banyak yang menyatakan persamaan penjumlahan kecepatan relativistik hanya untuk kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya, sedangkan untuk kecepatan jauh dibawah kecepatan cahaya persamaan tersebut tidak berlaku. Ini keliru, persamaan penjumlahan relativistik berlaku umum termasuk untuk kecepatan sangat kecil. Seperti contoh diatas, kecepatan keretapi 10 m/detik, kecepatan lari penumpang 5 m/detik , maka dari penjumlahan relativistik didapat kecepatan berlarnya penumpang oleh pengamat $v_p = (10 + 5) / (1 + (5 \cdot 10) / (3 \cdot 10^8)^2) = 1 + 5,556 \cdot 10^{-16}$ akan menghasilkan kecepatan relativistik oleh pengamat $v_R = 14,9999999999999916$ m/detik. Perbedaan sangat sangat kecil sekitar seper-trilyun mili-meter (jauh lebih kecil dari panjang gelombang cahaya), sehingga tidak akan teramati perbedaannya dengan penjumlahan mekanika klasik $v_p = 10 + 5 = 15$ m/detik .

Pemuaian Waktu

Postulat ke dua Einstein tentang kelajuan cahaya selain mengakibatkan Penjumlahan Kecepatan Relativistik seperti persamaan (1) , juga menyebabkan perubahan pemahaman tentang kemutlakan besaran diantaranya besaran waktu dan panjang. Bahwa waktu dapat mengalami dilatasi atau pemuaian dalam referensi lain disebut pemuluran. Persamaan pemuaian waktu adalah :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

t = selang waktu peristiwa menurut pengamat yang diam

t_0 = selang waktu peristiwa dalam keadaan gerak relatif terhadap pengamat

v = kecepatan gerak relatif

c = kelajuan cahaya

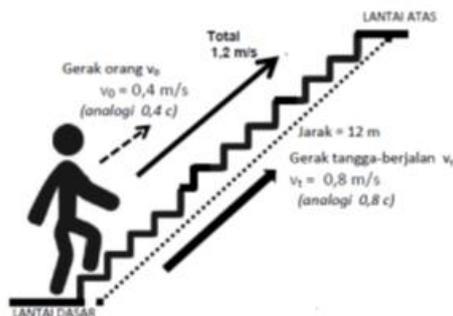
Yang dimaksud pemuaian waktu ; Pengamat (diam) akan melihat obyek yang bergerak dengan kecepatan v mendekati c , terjadi pemuaian selang waktu suatu peristiwa (yakni t) , terhadap selang waktu yang sama pada obyek yang bergerak tersebut (yakni t_0 - disebut waktu proper atau dikatakan waktu sebenarnya walaupun kurang tepat) . Misal pengamat dibumi memegang arloji yang identik dengan astronot yang akan terbang ke angkasa luar. Arloji memiliki alarm yang akan berbunyi "ting" seperti lonceng setiap 1 jam atau

3600 detik. Pada saat arloji sama-sama menunjukkan pukul 00.00, astronot terbang dengan wahana antariksa dengan kecepatan 0,8 c. Setelah terbang, arloji astronot berdenting pertama kali (pukul 01.00), menandakan bahwa astronot sudah terbang 1 jam dan ini merupakan selang waktu proper atau t_0 dari persamaan pemuaian waktu diatas. Bagaimana dengan selang waktu menurut arloji pengamat yang ada di bumi yakni t ? dengan persamaan pemuaian waktu diatas, akan diperoleh :

$$t = \frac{3600}{\sqrt{1-(0,8c)^2/c^2}} - \frac{\dots}{\sqrt{1-0,64}} \dots (3)$$

Waktu 6000 detik = 1 jam 40 menit. Jadi pengamat di bumi mengamati arloji astronot berdenting pertama kali setelah 1 jam 40 menit menurut arloji pengamat di bumi. Artinya ketika alarm arloji pengamat sudah berdenting menunjukkan jam 01 : 00, (di bumi), alarm arloji astronot belum. Ketika arloji astronot berdenting pada pukul 01.00, arloji pengamat sudah menunjukkan pukul 01 : 40, mulur atau memuai 40 menit sesuai hitungan diatas. Inilah yang disebut pemuaian waktu yang diamati pengamat di bumi terhadap gerak astronot tersebut.

Gambar-1 menguraikan secara sederhana bagaimana cara memahami konsep pemuaian waktu tersebut. Salah satu konsep untuk memahaminya adalah dengan analisis sederhana dari penjumlahan kecepatan relativistik.



Gambar 1. Dalam mekanika klasik, total kecepatan orang bergerak diamati dari lantai dasar.

Seseorang naik tangga-berjalan sambil berjalan/bergerak diatas tangga dengan kecepatan 0,4 m/detik (v_0). Tangga-berjalan bergerak 0,8 m/detik (v_t). Maka total orang tersebut bergerak dilihat pengamat di dasar tangga adalah 0,8 m/detik + 0,4 m/detik = 1,2 m/detik. Orang tersebut akan sampai ke lantai atas dalam waktu $t = L / (v_t + v_0) = 12/1,2 = 10$ detik. Apabila tangga-berjalan anggaplah berkecepatan 0,8 c (c = kecepatan cahaya) dan orang naek tangga berjalan dengan kecepatan 0,4 c; maka orang

tersebut akan mencapai lantai atas dalam waktu $t = L_0 / (0,8 + 0,4)c = 12 / 1,2 c$ detik = 10/c detik. Tetapi hasil ini dari perhitungan mekanika klasik. Postulat Einstein menyatakan tidak akan ada benda yang dapat melebihi kecepatan cahaya c, maka penjumlahan kecepatan tersebut harus sesuai dengan penjumlahan relativistik seperti persamaan (1) . Hasilnya orang tersebut bergerak dengan kecepatan relativistik $v_R = 0,91 c$. Disini akan tergambar proses pemuaian waktu yang diamati pengamat diam didasar tangga berjalan, sebab waktu untuk sampai ke lantai atas tersebut adalah $t = L / v_R = 12/0,91 c = 13,19/c$ detik, bukan 10/c detik seperti yang diamati dengan mekanika klasik. Terjadi pemuaian waktu 3,19 detik.

Paradoks Kembar

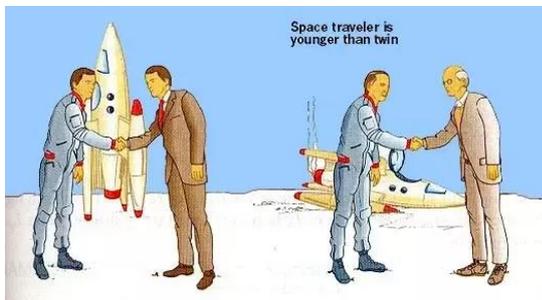
Dalam fisika modern, dikenal efek relativistik pemuaian waktu yang disebut paradoks kembar (*twin paradox*). Arti paradoks dalam kamus besar bahasa Indonesia adalah : " pernyataan yang seolah-olah bertentangan dengan pendapat umum atau kebenaran, tetapi kenyataannya mengandung kebenaran".

Istilah ini untuk mengganti dua arloji identik, satu dipegang pengamat di bumi dan yang satu lagi dibawa terbang ke angkasa dengan kecepatan v yang mendekati kecepatan cahaya. Disini sepasang arloji identik tersebut diganti dengan sepasang kembar, katakanlah kembar tersebut namanya Astro (A) dan Budi (B) . Astro menjadi astronot dan Budi menjadi peneliti antariksa. Ketika mereka berusia sama-sama 30 tahun, Astro mengembara ke angkasa luar pulang-pergi dengan wahana antariksa berkecepatan 0,8 c , ke suatu bintang yang berjarak 20 tahun cahaya. Istilah jarak dalam tahun cahaya adalah jarak yang ditempuh cahaya yang berkecepatan 3 X 10⁸ m/detik dalam setahun yang besarnya 9,46 X 10¹⁵ m . Karena jauhnya, jarak bintang-bintang selalu memakai jarak tahun cahaya. Sebagai perbandingan, jarak bumi ke matahari 8 menit cahaya, maksudnya cahaya matahari mencapai bumi dalam 8 menit dan jaraknya dalam meter adalah (8 X 60) X (3 X 10⁸) = 1,44 X 10¹¹ m atau 144 juta km. Dengan gerak 0,8 c, menurut saudaranya Budi di bumi , Astro kelihatannya hidup lebih lambat selama perjalanan tersebut. Ini sesuai dengan pemuaian waktu pada persamaan (2)

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = t_0 / \sqrt{1 - (0,8)^2 c^2/c^2} = t_0 / \sqrt{1 - 0,64} = t_0 / \sqrt{0,36} = 1,667 t_0$$

Untuk setiap detik tarikan nafas bagi Astro, bagi Budi itu 1 2/3-nya, untuk setiap 6 jam Astro makan,

bagi Budi itu 10 jam. Berhubung jarak bintang 20 tahun cahaya dari bumi, maka perjalanan yang ditempuhnya bolak-balik adalah 40 tahun cahaya. Pesawat berkecepatan 0,8 c maka lama waktu perjalanan tersebut adalah $t = 2 L_0 / v = 40$ tahun cahaya / 0,8 v. cahaya = 50 tahun. Jadi ketika pesawat kembali ke bumi, usia Budi adalah $30 + 50 = 80$ tahun. Sedangkan Astro selama melakukan perjalanan dengan waktu proper t_0 yakni $t_0 = 0,6 t$. Sehingga Astro melakukan perjalanan selama $0,6 \times 50$ tahun = 30 tahun. Ketika Astro kembali dan bertemu dengan saudara kembarnya Budi, usia Astro bertambah 30 tahun menjadi 60 tahun, sedangkan Budi sudah 80 tahun. Gambar-2 menggambarkan ilustrasi paradok kembar ini.



Gambar 2. Ilustrasi paradok kembar kiri, kembar Astro dan Budi berusia 30 tahun sebelum Astro berkelana pulang pergi ke suatu bintang berjarak 20 tahun cahaya dengan roket berkecepatan 0,8 c Kanan, ketika kembali bertemu, Astro berusia 60 tahun, Budi 80 tahun
(Sumber Ilustrasi Gambar: <https://images.app.goo.gl/xNWDwNB6bplTAMNZ7>)

Jika dilihat dari pandangan Astro yang berada di pesawat (sebagai pengamat), Budi dan bumi akan terlihat bergerak dengan kecepatan 0.8 c . Kalau diperhatikan, dimana letak paradoknya? Karena akan terjadi pemuaiian waktu yang diamati Astro sebagai pengamat di pesawat terhadap Budi di Bumi yang terlihat bergerak menjauhi pesawat. Disini Budi di bumi yang mengalami pemuaiian waktu. Astro menunggu 50 tahun untuk kembali ke Bumi dan bertemu Budi. Jadi usia Astro 80 tahun dan usia Budi 60 tahun, hasil sebaliknya dari hasil sebelumnya yang tentu saja jadi membingungkan.

Sebenarnya permasalahan dari paradoks ini adalah siapa yang sebenarnya bergerak, bergantung dari asimetri ke dua orang kembar tersebut. Budi di bumi selalu berada dalam kerangka acuan inersial di seluruh waktunya, sehingga Budi dapat memakai rumus pemuaiian waktu untuk seluruh perjalanan Astro. Sebaliknya Astro harus berubah dari suatu kerangka inersial ke

kerangka inersial lain ketika Astro membalikkan arah pesawat antariksanya sehingga pemakaian persamaan (3) oleh Astro hanya berlaku ketika dalam perjalanan menjauhi.

Yang harus diperhatikan lagi disini adalah besaran lainnya yakni panjang. Ketika bergerak mendekati kecepatan c, besaran panjang mengalami kontraksi atau pengerutan, kebalikan dari waktu yang mengalami pemuaiian. Pengerutan ini disebut kontraksi Lorents. Persamaan Kontraksi Lorentz adalah:

$$L = L_0 \sqrt{1 - V^2/C^2} \dots\dots\dots (4)$$

L adalah panjang relativistik sedangkan L_0 adalah panjang proper yang dirasakan oleh pengamat yang bergerak relatif.

Jarak Bumi ke Bintang 20 tahun cahaya, ini merupakan jarak proper (L_0) . Menurut Astro dari pesawat berkecepatan 0,8 c terjadi pengerutan Lorentz bahwa jarak bintang tersebut dari Bumi adalah (dalam satuan jarak tahun cahaya), $L = 20 \sqrt{(1 - 0,8^2)} = 20 \sqrt{0,36} = 12$ tahun cahaya. Sehingga waktu untuk menempuh perjalanan ke bintang tersebut adalah $t = L/v$, yakni jarak 12 tahun cahaya dibagi kecepatan 0,8 cahaya menghasilkan waktu 15 tahun. Juga selang waktu yang sama 15 tahun untuk perjalanan kembali ke bumi, sehingga total Astro memerlukan waktu 30 tahun untuk perjalanan pulang pergi tersebut. Jadi ketika kembali ke Bumi, usia Astro adalah benar menjadi $30 + 30 = 60$ tahun. Sedangkan Budi di bumi berada dalam kerangka acuan inersial yang tidak berubah, sehingga Budi melihat waktu perjalanan Astro adalah 50 tahun.

II. ANALISIS DAN PEMBAHASAN
Analisa dan Bukti Pemuaiian Waktu

Teori Relativitas Khusus tentang Pemuaiian waktu yang pertamakali dipresentasikan oleh Albert Einstein tahun 1905 dirasakan bertentangan dengan logika dan hukum fisika sehari-hari. Bagaimana dengan narasi paradoks kembar diatas, bila Astro berkelana dengan kecepatan yang lebih tinggi lagi yakni 0,99 c; maka terjadi pemuaiian waktu yang lebih besar yakni 7 kalinya. Astro berkelana selama 30 tahun tetapi menurut perhitungan Budi di bumi, Astro berkelana selama 210 tahun. Ketika Astro kembali ke bumi, yang ditemuinya adalah cucu-cucu dari cicitnya saudara kembarnya itu. Kelihatan narasi seperti ini hanya cerita dalam film fiksi saja.

Paradoks kembar tentang pemuaiian waktu memang memunculkan keheranan yang lebih dibanding hasil relativitas khusus yang lainnya. Apakah teori tersebut sudah dapat dibuktikan?

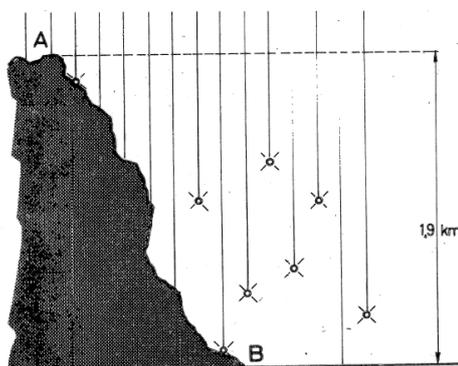
Menguji pemuaiian waktu dengan membuat wahana berkecepatan mendekati cahaya jelas saat ini mustahil. Sekarang teknologi memang telah dapat membuat pesawat yang terbang melebihi kecepatan suara bahkan mencapai Mach-4 atau 4 X kecepatan suara. Tapi kecepatan suara hanya 343 m/detik atau 1 per 876.636 kecepatan cahaya ($1,43 \times 10^{-6} c$). Roket Apollo-11 yang membawa Neil Amstrong pulang pergi ke bulan tahun 1969, memiliki kecepatan (maksimal) sebesar 10.840 m/detik, hanya 1/27.800 kali kecepatan cahaya atau 0,000036 c. Anggap kecepatan Apollo-11 tetap selama 7 hari penerbangan ke bulan, diluar waktu beliau berjalan-jalan dibulan. Waktu 7 hari (168 jam) tersebut sebagai waktu proper (t_0). Dari perhitungan pemuaiian waktu, akan diperoleh $t = 1,000000001 t_0 = 168.0000002$ jam, terjadi pemuaiian 0,0000002 jam atau 0,00072 detik. Jadi astronot Neil Amstrong bersama dua rekannya akan terlihat lebih muda hanya 0,72 mili-detik oleh operator NASA di *Control Room Kenedy Space Center*. Tentu saja perbedaan ini sama sekali tidak signifikan atau sama sekali tidak akan teramati ada pemuaiian waktu.

Hampir 60 tahun relativitas khusus pemuaiian waktu yang dicetuskan oleh Einstein hanya teori atau hitung-hitungan matematis diatas kertas. Karena mustahil membuktikan pemuaiian waktu dengan wahana terbang yang dibuat manusia.

Tahun 1963, enam tahun sebelum pendaratan manusia di bulan, ahli fisika David H. Frisch dan James H. Smith dari Departemen Fisika "*Massachussets Institute of Technology (MIT)*" Amerika Serikat telah dapat membuktikan kebenaran teori relativitas pemuaiian waktu Einstein. Caranya adalah dengan melakukan pengukuran terhadap suatu jenis partikel tak stabil yang dinamakan Muon. Partikel muon terbentuk dari tumbukan sinar kosmik dari angkasa luar yang datang ke bumi dengan inti atom dalam atmosfer bumi. Massa muon 207 kali massa elektron dan dapat bermuatan elementer Positif atau Negatif. Muon meluruh menjadi elektron atau positron setelah 2 μs (mikro-detik). Kecepatan muon ini diketahui hampir sama dengan kecepatan cahaya yakni 0,994 c. Muon berumur pendek dalam arti mempunyai umur tertentu sebelum meluruh (*decay*). Umur satu muon tidak dapat diketahui pasti tetapi perubahan jumlah muon akibat peristiwa peluruhan dapat diukur. Peluruhan menggunakan satuan waktu seperti peluruhan radioaktif yakni menggunakan waktu "setengah umur". Penurunan jumlah muon karena meluruh terjadi secara eksponensial. Bila waktu peluruhan setengah umur = T, maka setelah waktu T, muon

tinggal 50% , kemudian setelah waktu 2 T tinggal 25%, setelah waktu 3 T - 12,5%, setelah waktu 4 T - 6,25% dan seterusnya. Dari hasil pengamatan terhadap kumpulan muon yang diam (atau bergerak jauh dibawah kecepatan cahaya), diperoleh waktu peluruhan setengah umur atau biasa disebut waktu paruh dari partikel muon, yakni $T = 1,5 \times 10^{-6}$ detik (1,5 mikro-detik).

Kedua fisikawan Amerika tersebut melakukan pengukuran jumlah muon di dua tempat atau titik dengan ketinggian berbeda seperti dilukiskan dalam Gambar-3, yakni A di puncak Gunung Washington di New Hampshire, ketinggian 1907 meter dari permukaan laut dan titik B di dekat permukaan laut. Karena telah diketahui kecepatan muon 0,994 c maka waktu tempuh muon dari puncak gunung (A) ke dekat permukaan laut (B) adalah $t = L_0 / v = 1907 \text{ m} / (2,98 \times 10^8) \text{ m/detik} = 6,3 \times 10^{-6}$ detik (6,3 mikro-detik) atau sama dengan 4,2 T (dari 6,3/1,5). Sisa muon setelah meluruh dalam waktu 4 T adalah 6,25%, maka dalam waktu $t = 4,2 T$, seharusnya akan tersisa muon dari persamaan eksponensial $2^{-t} = 2^{-4,2} = 0,054$ atau 5,4% di titik-B dekat permukaan laut .



Gambar 3. Pengamatan partikel muon di dua titik A dan B

Ternyata hasil pengamatan kedua fisikawan tersebut mengejutkan, karena masih ada sisa muon 68% di titik-B, jumlah yang banyak dan diluar perkiraan. Ini berarti meluruh hanya 32%, kurang dari 50%. Hasil ini menunjukkan bahwa muon meluruh sebelum usia setengah umur T atau dibawah waktu paruh T.

Dengan data waktu tempuh muon dari A ke B sebesar 6,3 mikro-detik yakni waktu t, kecepatan muon 0,994 c, maka waktu proper t_0 yang ditempuh muon sesuai persamaan (2) relativitas pemuaiian waktu Einstein adalah :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (0,994 c)^2/c^2}} = 9,1 t_0$$

maka $t_0 = 1/9,1$ $t = 0,11 \times 6,3$ mikro-detik = 0,7 mikro-detik.

Jadi waktu yang diperlukan oleh muon untuk menempuh jarak dari A ke B atau waktu proper t_0 adalah 0,7 detik. Hasil dari rumus Einstein ini ternyata sesuai dengan hasil pengujian dan pengamatan yang menemukan sisa muon masih 68% di titik-B. Sisa 68 % menunjukkan waktu peluruhan muon kurang dari waktu paruh T dan setelah dihitung dari $2^{-t} = 0,68$ maka diperoleh bahwa lamanya waktu peluruhan muon yakni t baru mencapai 0,47 $T = 0,71$ mikro-detik. Ini sesuai (mendekati) dengan hasil rumus Einstein tersebut (t_0).

Kesesuaian ini luar biasa, bahwa **teori pemuaiian waktu yang terkesan janggal adalah suatu kenyataan !**

Lebih jauh bila dianalisa, bagaimana bila seandainya kita ikut gerak bersama muon tersebut. Berapa waktu yang kita ditempuh dari A ke B ? Disini terjadi kontraksi Lorentz bahwa jarak A ke B menurut kita yang ikut gerak dengan muon adalah $L = L_0 (1 - v^2/c^2) = 1,9 \text{ km} \sqrt{(0,012)} = 0,21 \text{ km}$ (bukan 1,9 km). Sehingga waktu tempuh dari A ke B adalah $t = L/v = 0,21 \text{ km} / (0,994 \times 3.10^8 \text{ km/detik}) = 0,7$ mikro-detik, sama dengan waktu peluruhan muon yang tersisa 68% yang juga kita amati dalam keadaan bergerak bersama muon, dan disini muon pada posisi diam terhadap kita.

III. KESIMPULAN

1. Tidak ada kerangka universal di alam ini, semua obyek bergerak sehingga tidak ada gerak mutlak. Dengan postulat Einstein bahwa kecepatan cahaya adalah tetap tak bergantung gerak, berimplikasi pada konsep bahwa waktu, panjang dan massa bukanlah besaran yang mutlak tetapi relatif dan dinamis.
2. Relativitas sudah merupakan hukum alam dan berlaku untuk semua kondisi baik untuk gerak yang mendekati kecepatan cahaya maupun gerak kendaraan sehari-hari, hanya saja untuk gerak yang diamati sehari-hari, efek relativistik untuk penjumlahan kecepatan dan pemuaiian waktu sangat-sangat kecil dengan skala perbandingan paling besar di kisaran 10^{-7} atau se per sepuluh juta .
3. Terjadinya Paradok Kembar, bahwa usia yang bergerak mendekati kecepatan cahaya lebih

muda dari kembarannya karena hukum dan kerja alam semesta. Bahwa semua peristiwa tersebut berada dalam kontinum (koordinat) berdimensi empat ruang-waktu dengan 3 koordinat x,y,z untuk ruang dan koordinat ke 4 yakni ct yang berkaitan dengan waktu ($i = \sqrt{-1}$). Jadi waktu merupakan dimensi ke-4 dari ruang. Fenomena ini dapat dikaji dengan melihat lintasan 2 orang kembar dalam ruang-waktu secara geometris sehingga sampai pada kesimpulan tersebut. Ruang-waktu adalah suatu cara untuk memberikan kenyataan pada postulat Einstein terhadap proses penuaan yang asimetrik dari dua orang kembar, bahwa hal tersebut merupakan akibat dari hukum alam, sama seperti hukum alam yang dialami sehari-hari.

4. Bahwa teori relativitas tentang pemuaiian waktu adalah fakta yang telah dibuktikan kebenarannya pertama-kali oleh dua fisikawan dari MIT Amerika Serikat, hampir 60 tahun setelah teori ini disampaikan oleh Albert Einstein.

DAFTAR PUSTAKA

- Arthur Beiser , 1981 . *Concepts of Modern Physics - McGraw-Hill, Inc*, Terjemahan oleh The Houw Liong, Ph.D “*Konsep Fisika Modern*” Penerbit Erlangga Jakarta, 1983.
- Dr. Hans J. Wopakrik (Fisika FMIPA ITB), “*Berkenalan dengan teori Relativitas Umum Einstein*”, Penerbit ITB , 1987.
- Paul E. Tippens (Southern Polytechnic State University) , “*Physics*”, Seven Edition, McGraw-Hill, 2007.
- Tim Penulisan buku Fisika Depdikbud RI 1972-1988 , “*Energi, Gelombang dan Medan*” Jilid – III , PT Balai Pustaka, 1983.
- David H. Frisch & James H. Smith “*Measurement of the Relativistic Time Dilation using μ -Mesons*” , Journal dari MIT Amerika Serikat, 14 January 1963
<https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/muons/frisch-smith-1963.pdf>
- Wikipedia, “*Theory of Relativity*”
https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_relativity
- Wikipedia Indonesia, “*Teori Big Bang – Ledakan Dasyat*”
https://id.wikipedia.org/wiki/Ledakan_Dahsyat