

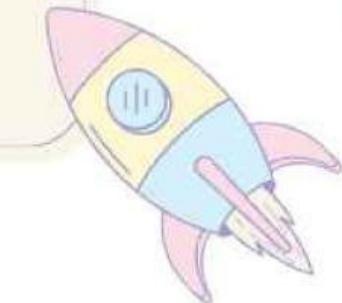
MODUL AJAR

TEORI RELATIVITAS

Tahun Ajaran 2025-2026



Disusun oleh:
MEILANI JUNELDI



Daftar Isi

TEORI RELATIVITAS

● Relativitas Newton

● Relativitas Einstein

● Dilasi Waktu

● Kontraksi Panjang



Massa, Momentum, dan
energi Relativistik

KURIKULUM MERDEKA – TEORI RELATIVITAS

Mata Pembelajaran : Fisika Modern

Topik: Teori Relativitas

Bobot: 1 Pertemuan (2 × 50 menit)

A. Tujuan Pembelajaran

No	IKTP
1	Mengidentifikasi perbedaan pandangan gerak menurut Prinsip Relativitas Newton dan Einstein.
2	Menjelaskan fenomena dilatasi waktu dan kontraksi panjang dengan contoh atau ilustrasi.
3	Menggunakan persamaan relativitas untuk menyelesaikan permasalahan fisika sederhana.
4	Menyimpulkan hubungan massa-energi berdasarkan rumus Einstein ($E = mc^2$).

B. Capaian Pembelajaran (CP) Kurikulum Merdeka

Elemen CP Fisika SMA

Pemahaman Konsep dan Prinsip Fisika

Keterampilan Proses Sains

Sikap Ilmiah dan Profil Pelajar Pancasila

Deskripsi Capaian Pembelajaran

Siswa memahami dan menjelaskan prinsip relativitas khusus dan umum serta keterkaitannya dengan konsep ruang dan waktu.

Siswa mampu menganalisis data, melakukan penalaran ilmiah, dan menyusun argumen berbasis bukti terkait fenomena relativistik.

Siswa menunjukkan rasa ingin tahu, berpikir kritis, bekerja sama, dan bertanggung jawab dalam proses pembelajaran.

C. Alur Tujuan Pembelajaran (ATP)

Tahap	Aktivitas Pembelajaran	Bukti Kompetensi
Pendahuluan	Peserta didik mengamati animasi/ilustrasi objek	Hasil diskusi dan jawaban pertanyaan awal.
Inti	Peserta didik menjelaskan konsep relativitas Newton dan	Jawaban evaluasi berbasis soal interaktif.
Aplikasi	Peserta didik menghitung fenomena relativitas	Jawaban latihan numerik.
Refleksi	Peserta didik menuliskan kesimpulan	Pernyataan refleksi.

C. Teknik Asesmen Kurikulum Merdeka

Jenis Asesmen	Bentuk Kegiatan	Tujuan	Output / Produk	Waktu
Asesmen Diagnostik	Kuis singkat konsep ruang, waktu, dan kecepatan	Mengukur pengetahuan awal siswa	Hasil kuis reflektif	Sebelum pembelajaran

Asesmen Formatif	Diskusi kelompok tentang contoh fenomena relativistik	Menilai keterlibatan dan pemahaman selama proses	Catatan observasi guru	Saat pembelajaran
Asesmen Sumatif (Performance)	Presentasi proyek mini 'Relativitas dalam Kehidupan Nyata'	Mengukur kemampuan analisis, penerapan, dan komunikasi ilmiah	Presentasi & laporan proyek	Setelah pembelajaran
Asesmen Reflektif	Jurnal belajar / refleksi diri	Mengembangkan kesadaran belajar mandiri	Catatan refleksi siswa	Akhir pembelajaran

D. Rubrik Penilaian Performance (Presentasi Teori Relativitas)

Aspek yang Dinilai	Deskripsi Kriteria	4 (Sangat Baik)	3 (Baik)	2 (Cukup)	1 (Kurang)
Pemahaman Konsep	Ketepatan menjelaskan konsep relativitas khusus dan umum	Sangat jelas, logis, dan sesuai teori Einstein	Cukup benar, sedikit kekeliruan	Kurang lengkap	Banyak kekeliruan
Analisis Fenomena Nyata	Mengaitkan teori dengan fenomena seperti GPS, waktu relativistik, dll	Contoh sangat relevan dan mendalam	Relevan tapi kurang mendalam	Umum tanpa bukti kuat	Tidak dapat mengaitkan
Penalaran Ilmiah	Argumentasi logis dan berbasis data	Kritis dan berdasarkan fakta ilmiah	Logis namun tidak lengkap	Lemah dan tidak berbasis data	Tidak menunjukkan penalaran
Kreativitas Media / Simulasi	Penggunaan media / eksperimen	Sangat kreatif dan menarik	Cukup kreatif	Minim variasi	Tidak ada media pendukung

Komunikasi Ilmiah	Kejelasan, istilah ilmiah, kerja sama tim	Sangat komunikatif dan percaya diri	Cukup jelas dan terstruktur	Kurang percaya diri	Tidak dapat menyampaikan ide
-------------------	---	-------------------------------------	-----------------------------	---------------------	------------------------------

Skor Akhir = (Total Skor / 20) × 100

Kategori Nilai: 85-100 = Sangat Baik; 70-84 = Baik; 55-69 = Cukup; <55 = Kurang

Level Kognitif	Teknik Asesment	Contoh Soal Teori Relativitas	Kunci Jawaban / Rubrik Singkat
C-1 (Mengingat)	Essay	1. Sebutkan dan jelaskan dua postulat utama dalam Teori Relativitas Khusus Einstein	1. Prinsip Relativitas 2. Konstanta Kecepatan Cahaya
C-2 (Memahami)	Essay	1. Jelaskan perbedaan antara waktu proper dan waktu dilatasi	Waktu proper kerangka acuan yang sama dengan dua kejadian yang terjadi di tempat sama. Waktu Dilatasi kerangka acuan yang berbeda (bergerak relatif) terhadap dua kejadian tersebut.
C-3 (Menerapkan)	Essay	1. Sebuah pesawat antariksa bergerak dengan kecepatan $0,866c$ relative terhadap bumi. Jika panjang pesawat saat diukur dalam keadaan diam adalah 60 meter, hitunglah panjang pesawat tersebut menurut pengamat bumi ?	Dkt : $L_0 = 60\text{m}$ $V = 0,866c$ Rumus $L = L_0 * \sqrt{1 - V^2/C^2}$. $L = 60 * (1 - 0,866^2/1)$. $L = 60 * (1 - 0,75)$. $L = 60 * 0,25$. $L = 60 * 0,5 = 30$ Meter

C-4 (Menganalisis)	Essay	<p>1. Bandingkan dan bedakan konsep massa diam dengan energi diam dalam teori relativitas.</p>	<p>Massa diam= diukur ketika benda tersebut diam relative terhadap pengamat. massa ini adalah invariant. Energi diam=suatu benda semata-mata karena massanya ketika ia diam memiliki kandungan energi internal benda.</p>
C-5 (Mengvaluasi)	Essay	<p>1. Untuk misi antarbintang ke Alpa Centauri (4,37 tahun cahaya), diusulkan dua skenario : Skenario A : Pesawat bergerak 0,5 c seluruh perjalanan Skenario B: Pesawat mengalami percepatan konstan 1g hingga titik tengah lalu deselerasi 1 g</p>	<p>Skenario B lebih unggul pada misi nya karena mempersingkat waktu subjektif kru dan menyediakan lingkungan lebih sehat</p>
C-6 (Mencipta)	Essay	<p>1. Seorang konten kreator sains populer membuat pertanyaan berikut :"Menurut $E=mc^2$, jika kita memanaskan</p>	<p>Benar bahwa massa secangkir kopi akan bertambah sangat sedikit ketika dipanaskan Salah klaim massa</p>

C-4 (Menganalisis)	Essay	1. Bandingkan dan bedakan konsep massa diam dengan energi diam dalam teori relativitas.	Massa diam= diukur ketika benda tersebut diam relative terhadap pengamat.massa ini adalah invariant. Energi diam=suatu benda semata-mata karena massanya ketika ia diam memiliki kandungan energi internal benda.
C-5 (Mengvaluasi)	Essay	1. Untuk misi antarbintang ke Alpa Centauri (4,37 tahun cahaya), diusulkan dua skenario : Skenario A : Pesawat bergerak 0,5 c seluruh perjalanan Skenario B: Pesawat mengalami percepatan konstan 1g hingga titik tengah lalu deselerasi 1 g	Skenario B lebih unggul pada misi nya karena mempersingkat waktu subjektif kru dan menyediakan lingkungan lebih sehat
C-6 (Mencipta)	Essay	1. Seorang konten kreator sains populer membuat pertanyaan berikut :"Menurut $E=mc^2$, jika kita memanaskan	Benar bahwa massa secangkir kopi akan bertambah sangat sedikit ketika dipanaskan Salah klaim massa

		secangkir kopi, massanya akan bertambah. ini adalah bukti bahwa massa dan energi adalah hal yang sama persis	dan energi adalah hal yang sama persis
--	--	--	--



Relativitas Newton



suatu benda bergerak jika posisinya terhadap sesuatu relatif berubah ."Sesuatu" yang dimaksud pada definisi tersebut adalah kerangka acuan. Seorang penumpang bergerak relatif terhadap pesawat; pesawat bergerak relatif terhadap Bumi; Bumi bergerak relatif terhadap Matahari; Matahari bergerak relatif terhadap Galaksi Bima Sakti; dan seterusnya.Pada setiap kasus, kerangka acuan menjadi bagian dari definisi gerak.

Untuk mengatakan bahwa suatu benda bergerak, maka akan selalu berimplikasi terhadap kerangka acuan tertentu. Teori relativitas Newton memandang bahwa gerak bersifat relatif, bergantung pada kerangka acuan. Kerangka acuan yang dimaksud dalam hal ini adalah kerangka acuan inersial .

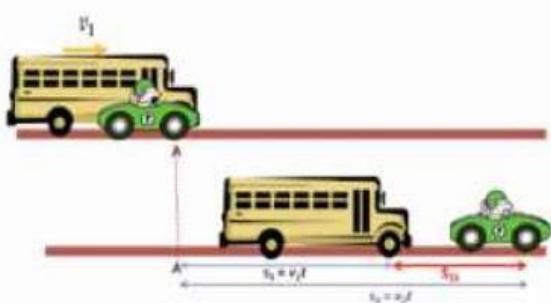
Kerangka acuan inersial merupakan kerangka acuan yang berada dalam kondisi diam maupun bergerak dengan kecepatan konstan terhadap kerangka acuan yang lain dalam suatu garis lurus



Relativitas Newton

Prinsip Relativitas Newton

Kerangka acuan inersial disebut juga sebagai kerangka acuan di mana Hukum I Newton berlaku. Hal ini dikarenakan pada Hukum I Newton, benda akan tetap berada pada posisi diam atau bergerak dengan kecepatan konstan jika tidak ada gaya yang mengenainya. Prinsip relativitas Newton yang dikemukakan oleh Galileo dan Newton menegaskan bahwa pada semua kerangka acuan inersial, hukum - hukum mekanika berlaku sama.



Gambar 1.3 Ilustrasi Prinsip Relativitas Newton
Sumber: pixabay.com

Perhatikan Gambar 1.3, terdapat sebuah bus berwarna kuning dengan kecepatan v_1 , dan sebuah mobil berwarna hijau dengan kecepatan v_2 . Pada waktu $t = 0$, kedua kendaraan tersebut berada pada titik A. Setelah selang waktu t , posisi kedua kendaraan berubah. Bus ada di belakang mobil sejauh s_{21} . Lalu berapakah kecepatan mobil relatif terhadap bus?

Sebagaimana yang dapat kita lihat pada Gambar 1.3, jarak yang ditempuh bus dalam selang waktu t adalah $s_1 = v_1 t$, sedangkan jarak yang ditempuh mobil dalam selang waktu t adalah $s_2 = v_2 t$. Jarak antara mobil dan bus yaitu s_{21} , yang tidak lain adalah selisih dari s_2 dan s_1 , sehingga didapatkan $s_{21} = s_2 - s_1 = v_2 t - v_1 t = (v_2 - v_1) t$. Selanjutnya, dapat kita tentukan kecepatan mobil relatif terhadap bus (v_{21}) sebagai berikut:

$$v_{21} = \frac{s_{21}}{t} = \frac{(v_2 - v_1)t}{t} = v_2 - v_1$$

sedangkan bus melakukan GLB. Percepatan mobil relatif terhadap bus (a_{21}) dapat diperoleh sebagai berikut:

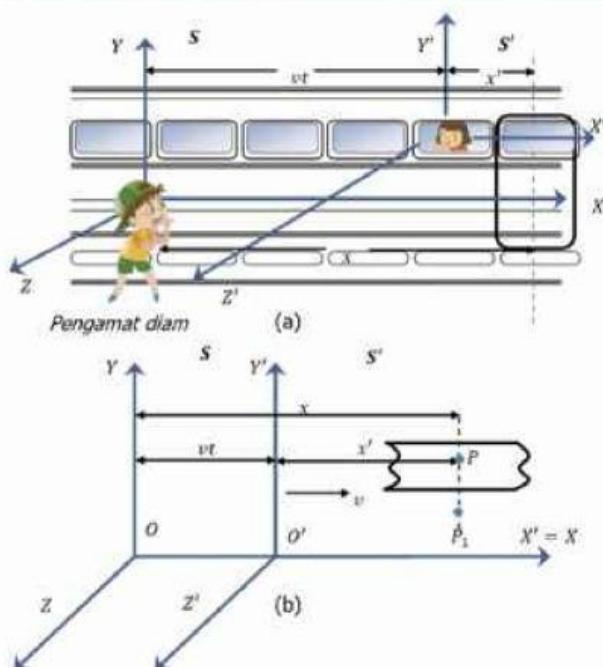
$$a_{21} = \frac{dv_{21}}{dt} = \frac{(dv_2 - dv_1)t}{dt} = a_2 - a_1 = a_2 - 0 = a_2$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, ternyata percepatan mobil relatif terhadap bus (a_{21}) sama dengan percepatan mobil relatif terhadap titik A (a_2). Oleh karena titik A merupakan kerangka acuan diam, maka hal ini menunjukkan bahwa percepatan benda pada kerangka acuan bergerak dengan kecepatan konstan sama dengan percepatan benda pada kerangka acuan diam.

Relativitas Newton

Transformasi Galileo

Berdasarkan teori relativitas yang disampaikan oleh Newton, Galileo mengusulkan sebuah transformasi perubahan koordinat antar kerangka acuan. Transformasi tersebut dikenal dengan transformasi Galileo. Transformasi Galileo menjelaskan tentang perubahan koordinat dari kerangka acuan diam ke kerangka acuan yang bergerak konstan, begitupun sebaliknya. Selanjutnya, akan kita tentukan transformasi koordinat ruang dan waktu dari kerangka acuan diam ke kerangka acuan bergerak menggunakan transformasi Galileo. Untuk lebih jelasnya, kita dapat melihat ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar 1.4. Pada Gambar 1.4 (a) terlihat seorang pengamat di luar kereta (pengamat diam) dan seorang pengamat di dalam kereta (pengamat bergerak). Kita anggap pengamat diam sebagai kerangka acuan "diam" (kerangka acuan S) dengan koordinat X, Y, Z , dengan titik asal O . Sedangkan pengamat bergerak sebagai kerangka acuan "bergerak" (kerangka acuan S') dengan koordinat X', Y', Z' , dengan titik asal O' . Kedua kerangka acuan tersebut adalah kerangka acuan inersial.



Gambar 1. 4(a) Kerangka acuan diam dan kerangka acuan bergerak saling berimpit pada $t=0$ (b) Posisi kerangka acuan setelah selang waktu t

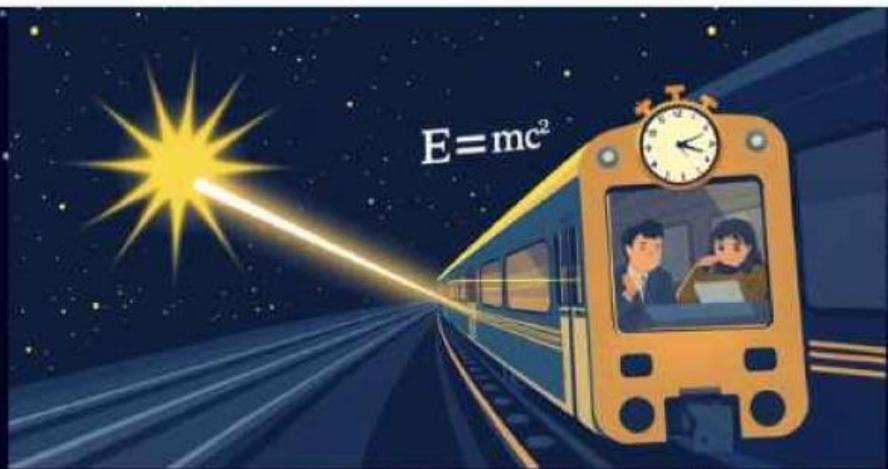


Relativitas Einstein

1.2. Relativitas Einstein

Relativitas Newton gagal menjelaskan relativitas yang berkaitan dengan kecepatan relativistik. Relativitas Einstein hadir untuk menutupi kegagalan tersebut melalui postulatnya mengenai batas kecepatan suatu partikel. Relativitas Einstein seringkali disebut sebagai relativitas khusus, karena relativitas Einstein ini hanya berlaku pada kerangka acuan inersial. Relativitas khusus, yang dipublikasikan oleh Einstein pada tahun 1905, mengakomodasi seluruh permasalahan yang berkaitan dengan kerangka acuan inersial. Sedangkan relativitas umum, yang dipublikasikan Einstein 10 tahun berikutnya, berhasil mendeskripsikan hubungan antara gravitasi dan struktur geometri antara ruang dan waktu.

Ada dua postulat yang disampaikan Einstein dalam teori relativitas khususnya. Postulat yang pertama yaitu **hukum-hukum fisika berlaku pada semua kerangka acuan inersial**. Postulat ini sebagai imbas dari ketiadaan kerangka acuan universal. Jika hukum fisika berbeda untuk pengamat yang berbeda dalam gerak relatif, pengamat-pengamat akan menemukan perbedaan antara objek yang "diam" dan yang "bergerak". Akan tetapi, perbedaan tersebut tidak ada dan prinsip relativitas mengekspresikan hal ini. Ilustrasi yang dapat digunakan untuk menjelaskan postulat ini yaitu yang ditunjukkan pada Gambar 1.5.





Dilasi Waktu



1.3. Dilasi Waktu

Pernahkah Anda menonton film Interstellar yang rilis pada tahun 2014? Film tersebut merupakan salah satu film bergenre *Sci-Fiction* yang cukup baik dalam menggambarkan fenomena dilasi waktu. Film tersebut menceritakan seorang astronaut yang memiliki seorang putri yang masih kecil. Sang ayah terlibat dalam misi pencarian planet baru yang memaksanya harus meninggalkan putrinya di Bumi. Singkat cerita, ketika kembali ke Bumi, ayah tersebut menemui putrinya yang ternyata telah menjadi nenek-nenek. Usianya melebihi usia sang ayah. Inilah dilasi waktu. Seseorang yang tinggal di Bumi dan di luar angkasa mengalami perbedaan selang waktu. Lalu apa yang dimaksud dengan dilasi waktu?

Dilasi waktu merupakan salah satu dampak dari relativitas Einstein. Waktu menjadi relatif bergantung pada gerak relatif antara pengamat dan kejadian yang diamati. Efeknya, sebuah jam yang bergerak terhadap pengamat berdetak lebih lambat daripada jam yang diam, dan seluruh proses kehidupan terjadi lebih lambat bagi pengamat ketika mereka berada dalam kerangka acuan inersial yang berbeda. Durasi antara dua kejadian yang sedang terjadi pada kerangka inersia pengamat disebut sebagai **waktu sesungguhnya**. Namun, ketika diamati oleh pengamat yang memiliki kerangka inersia berbeda, durasi waktu tersebut seolah-olah menjadi lebih lama daripada waktu sesungguhnya. Efek pemekaran waktu tersebut dinamakan **dilasi waktu**.