



**METODE PHYTAGORAS UNTUK MENYELESAIKAN PERSOALAN  
RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN**

**SKRIPSI**

**Oleh**

**Tutut Widyawati**

**NIM.150210102106**

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA  
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA  
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**



**METODE PHYTAGORAS UNTUK MENYELESAIKAN PERSOALAN  
RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Pendidikan Fisika (S1) dan mencapai gelar Sarjana Pendidikan

Oleh

**Tutut Widyawati**

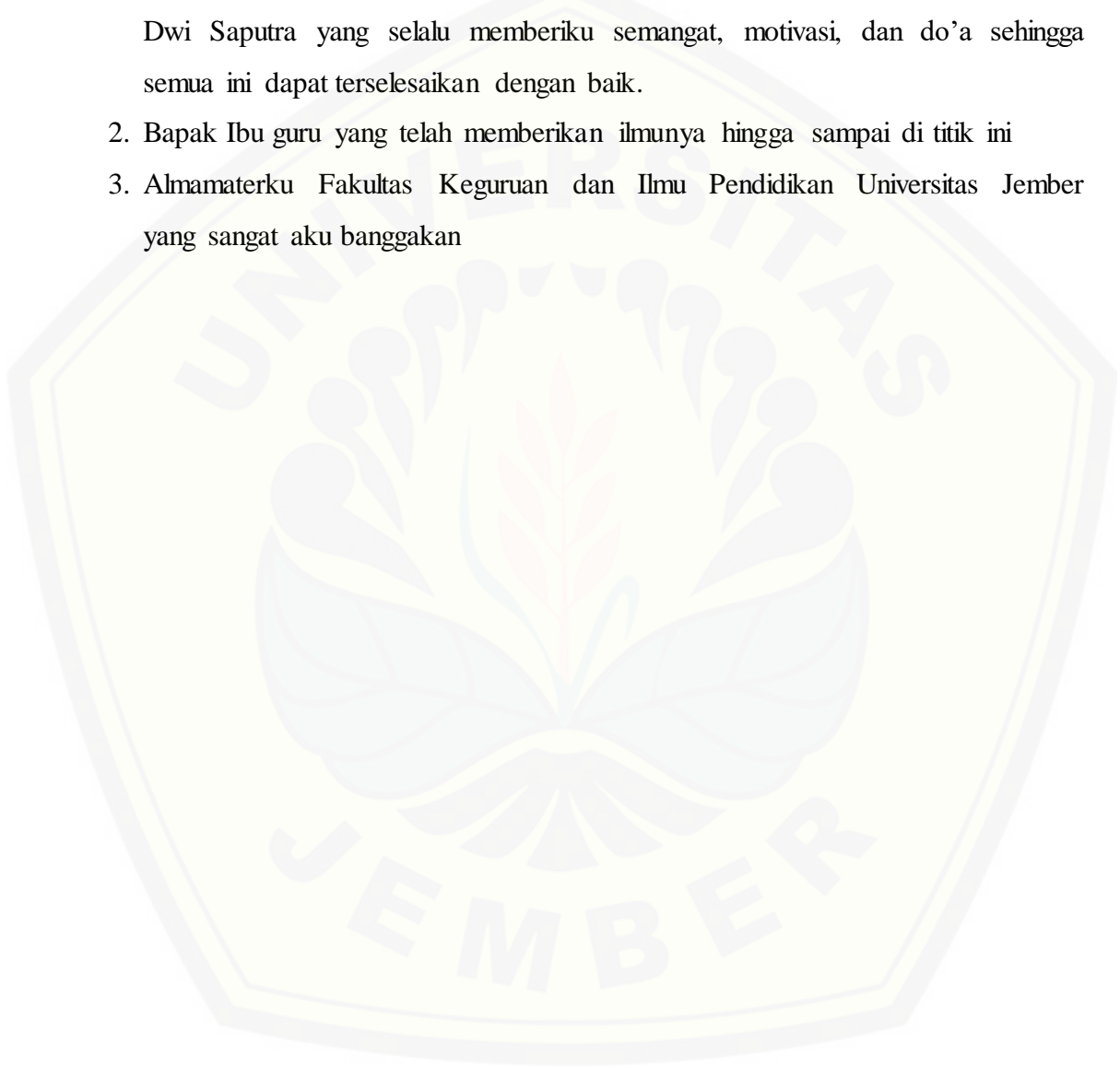
**NIM.150210102106**

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA  
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA  
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orangtuaku Bapak Trismanto dan Ibu Siti Mu'ayah dan adikku Rangga Dwi Saputra yang selalu memberiku semangat, motivasi, dan do'a sehingga semua ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Bapak Ibu guru yang telah memberikan ilmunya hingga sampai di titik ini
3. Almaterku Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember yang sangat aku banggakan



**MOTO**

Karena sesungguhnya dibalik kesuksesan seorang anak, ada orang tua yang begitu hebat dengan segala do'anya



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tutut Widyawati

NIM : 150210102106

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Metode Pythagoras untuk Menyelesaikan Persoalan Relativitas Khusus Einstein” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang telah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Desember 2018

Yang menyatakan,

Tutut Widyawati  
NIM. 150210102106

**SKRIPSI**

**METODE PHYTAGORAS UNTUK MENYELESIKAN PERSOALAN  
RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN**

Oleh :

Tutut Widyawati

NIM 150210102106

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Drs. Bambang Supriadi, M.Sc

Dosen Pembimbing Anggota : Drs. Alex Harijanto, M.Si

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Metode Phytagoras untuk Menyelesaikan Persoalan Relativitas Khusus Einstein” ini telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal :

Tempat : Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua,

Sekretaris,

Drs. Bambang Supriadi, M.Sc  
NIP. 196807101993021001

Drs. Alex Harijanto, M.Si  
NIP. 196411171991031001

Anggota I,

Anggota II,

Drs. Sri Handono Budi P., M.Si  
NIP. 195803181985031004

Dr. Yushardi, S.Si., M.Si  
NIP. 196504201995121001

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan  
Universitas Jember

Prof. Drs. Dafik, M.Sc, Ph.D.  
NIP. 196808021993031004



## RINGKASAN

**Metode Pythagoras untuk Menyelesaikan Persoalan Relativitas Khusus Einstein;** Tutut Widyawati, 150210102106; 2018; \_ Halaman; Program Studi Pendidikan Fisika Jurusan Pendidikan MIPA Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Materi relativitas khusus Einstein dalam ilmu fisika merupakan sebuah materi yang tergolong sulit. Kesulitan ini disebabkan karena relativitas khusus Einstein merupakan sebuah materi yang memiliki begitu banyak persamaan, serta dibutuhkan tingkat berfikir yang tinggi untuk menyelesaikan persoalannya. Oleh karena itu untuk mengatasi kesulitan tersebut dibutuhkan sebuah inovasi yang dapat menjadikan penyelesaian persoalan relativitas khusus Einstein yang sulit menjadi mudah. Teorema pythagoras dalam hal ini dapat dijadikan sebagai salah satu pilihan untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein tersebut.

Penelitian ini adalah sebuah penelitian yang bertujuan untuk menganalisis bagaimana hubungan antara teorema pythagoras dengan persamaan – persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein. Serta menunjukkan bagaimana pengguna dari metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein. Langkah – langkah penelitian yang akan dilakukan dalam hal ini yang pertama adalah mengumpulkan sebuah informasi terkait dengan materi tentang teorema pythagoras dan materi tentang relativitas khusus Einstein, langkah yang kedua adalah melakukan perhitungan terhadap persamaan dalam teorema pythagoras, langkah yang ketiga adalah melakukan perhitungan terhadap persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein. Langkah yang keempat adalah melakukan analisis bagaimana hubungan antara persamaan dalam teorema pythagoras dengan persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein. Langkah yang kelima adalah memasukkan data hasil penelitian kedalam tabel pengamatan.

Hasil yang diperoleh dari perhitungan tersebut adalah antara persamaan dalam teorema pythagoras dengan persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein memiliki bentuk persamaan yang sama. Kemudian dari bentuk



persamaan yang sama tersebut dapat menjadikan teorema pythagoras menjadi salah satu metode cepat dan solusi sederhana untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein.



## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Metode Pythagoras untuk Menyelesaikan Persoalan Relativitas Khusus Einstein”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Pendidikan Fisika, Jurusan pendidikan MIPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Drs. Dafik, M.Sc, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember yang telah memberikan fasilitas sehingga skripsi ini dapat terselesaikan;
2. Dr. Dwi Wahyuni, M.Kes. selaku Ketua Jurusan Pendidikan MIPA FKIP Universitas Jember yang telah memberikan fasilitas sehingga skripsi ini dapat terselesaikan;
3. Drs. Bambang Supriadi, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah membimbing penulis dalam segala aspek sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini;
4. Drs. Alex Harijanto, M.Si, selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan segala waktu, pikiran, dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
5. Drs. Sri Handono Budi Prastowo, M.Si, selaku Dosen Penguji Utama yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini;
6. Dr. Yushardi, S.Si, M.Si, selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini;
7. Prof. Dr. I Ketut Mahardika, M.Si, selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan selama penulis menjadi mahasiswa;

8. Segenap dosen Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jember yang telah ikhlas dan tulus dalam berbagi ilmu dan pengalaman kepada penulis selama ini;
9. Kedua orang tua, adikku, dan segenap keluarga besar yang telah memberi limpahan doa, motivasi, nasihat, sekaligus dukungan materi;
10. Reny Dwi Irfiana yang telah dengan sabar dan membantu dalam penyelesaian skripsi ini
11. Seluruh teman – teman pendidikan fisika yang telah memberikan motivasinya untuk bisa menyelesaikan skripsi ini;
12. Serta pihak – pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu – persatu yang telah memberikan kontribusi dan bantuannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan;

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis juga berharap mudah-mudahan skripsi ini dapat bermanfaat bagi semuanya.

Jember, Desember 2018

Penulis

**DAFTAR ISI**

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Transformasi Galileo .....	5
2.2 Ruang Mutlak dan Eter .....	7
2.2 Percobaan Michelson-Morley .....	8
2.3 Postulat Relativitas Khusus .....	10
2.4 Postulat Einstein .....	12
2.4.1 Dilatasi Waktu .....	13
2.4.2 Kontraksi Panjang .....	16
2.4.3 Massa Relativistik .....	18
2.4.4 Massa dan Energi .....	20

2.5 Teorema Pythagoras .....	21
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>24</b>
3.1 Jenis, Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.2 Definisi Operasional Variabel .....	24
3.3 Langkah Penelitian .....	26
3.4 Pengembangan Teori .....	27
3.5 Metode Analitik .....	28
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>30</b>
4.1 Hasil Penelitian.....	30
4.2 Pembahasan .....	34
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>42</b>
5.1 Kesimpulan .....	42
5.1 saran.....	42
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>43</b>

**DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 3.1</b> Analisis persamaan dilatasi waktu dan persamaan teorema phytagoras .....	28
<b>Tabel 3.2</b> Analisis persamaan kontraksi panjang dan persamaan teorema phytagoras .....	29
<b>Tabel 3.3</b> Analisis persamaan massa relativistik dan persamaan teorema phytagoras .....	29
<b>Tabel 3.4</b> Analisis persamaan energi relativistik dan persamaan teorema phytagoras .....	29
<b>Tabel 4.1</b> Hasil analisis persamaan dilatasi waktu dan persamaan teorema Phytagoras .....	31
<b>Tabel 4.2</b> Hasil analisis persamaan kontraksi panjang dan persamaan teorema phytagoras .....	32
<b>Tabel 4.3</b> Hasil analisis persamaan massa relativistik dan persamaan teorema Phytagoras .....	33
<b>Tabel 4.4</b> Hasil analisis persamaan energi relativistik dan persamaan teorema phytagoras .....	34

DAFTAR GAMBAR

**Gambar 2.1** Kejadian dan Koordinat ..... 5

**Gambar 2.2** Skema percobaan mencari kecepatann bumi relatif terhadap eter... 8

**Gambar 2.3** Skema percobaan Michelson – Morley ..... 9

**Gambar 2.4** Sebuah lilin yang berada dalam sistem S, sementara umur lilin  
diamati oleh sistem S dan S' ..... 13

**Gambar 2.5** Jalannya sinar yang dipancarkan pada objek yang berada di dalam  
kendaraan supercepat ..... 14

**Gambar 2.6** Jalannya sinar yang dipancarkan pada objek yang berada di dalam  
kendaraan supercepat ..... 15

**Gambar 2.7** (Kerangka acuan pengamat S dan S')..... 19

**Gambar 2.8** (Segitiga siku – siku ) ..... 22

**Gambar 3. 1** Skema penelitian..... 26

**Gambar 3. 2** (Segitiga siku - siku)..... 27

**Gambar 4.1** Posisi variabel persamaan dilatasi waktu kedalam segitiga  
siku – siku ..... 36

**Gambar 4.2** Posisi variabel persamaan Kontraksi panjang kedalam segitiga  
siku – siku ..... 37

**Gambar 4.3** Posisi variabel persamaan massa relativistik kedalam segitiga  
siku – siku ..... 38

**Gambar 4.4** Posisi variabel persamaan energi relativistik kedalam segitiga  
siku – siku ..... 40



**DAFTAR LAMPIRAN**

<b>Lampiran A.</b> Matriks penelitian .....	45
<b>Lampiran B.</b> Perhitungan untuk mendapatkan nilai $\gamma$ .....	48
<b>Lampiran C.</b> Perhitungan untuk mendapatkan persamaan dilatasi waktu .....	53
<b>Lampiran D.</b> Perhitungan untuk mendapatkan persamaan kontraksi panjang .....	54
<b>Lampiran E.</b> Perhitungan untuk mendapatkan persamaan massa relativistik ..	55
<b>Lampiran F.</b> Perhitungan untuk mendapatkan persamaan energi relativistik ..	57
<b>Lampiran G.</b> Perhitungan pada persamaan relativitas khusus Einstein untuk mendapatkan persamaan baru .....	59

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Materi relativitas khusus merupakan sebuah materi yang dapat dikategorikan sebagai materi yang sulit dalam ilmu fisika. Terbentuknya teori relativitas khusus ini bermula dari penemuan seorang ilmuwan fisika yang bernama Albert Einstein. Kesulitan dalam fisika telah dijelaskan oleh Sugiyana di dalam artikelnya. Sugiana (2016), "Fisika merupakan salah satu mata pelajaran yang menimbulkan kesulitan kepada siswa. Hal ini terjadi karena fisika dianggap sebagai mata pelajaran yang banyak memiliki persamaan dan kompleks. kemampuan siswa yang terbatas, dan kurangnya minat terhadap fisika juga telah menambah kesulitan tersendiri dalam mempelajari ilmu fisika". Adapun persamaan – persamaan yang terdapat dalam materi relativitas khusus Einstein adalah persamaan dilatasi waktu, persamaan kontraksi panjang, persamaan massa relativistik, dan yang terakhir adalah persamaan energi relativistik.

Materi relativitas khusus Einstein adalah sebuah materi yang dikelompokkan kedalam fisika modern. Menurut sejarahnya, ilmu fisika adalah sebuah ilmu yang dapat dibagi sesuai dengan masanya yaitu sebelum awal abad 20 dan setelah abad 20. Fisika klasik adalah sebuah ilmu yang telah dibangun sebelum awal abad 20. Sedangkan fisika modern adalah sebuah ilmu yang telah dibangun setelah abad 20. "Ditinjau dari sejarah perkembangan fisika, fisika dibagi menjadi dua, yaitu fisika klasik dan fisika modern. Materi – materi yang dibahas dalam fisika klasik adalah mekanika klasik, optik, termodinamika, dan elektromagnet. Pada fisika modern dibagi menjadi 2 ilmu, yaitu fisika kuantum dan teori relativitas"(Anugraha, 2014). Secara spesifik materi yang dipelajari dari fisika modern terkait dengan teori relativitas sangatlah banyak. "Materi fisika modern meliputi teori relativitas klasik, percobaan Michelson-Morley, postulat relativitas khusus, transformasi Lorentz untuk koordinat, kontraksi panjang, dan dilatasi waktu "(Serway, 2014).

Untuk mengatasi kesulitan dalam memecahkan persoalan relativitas khusus Einstein perlu adanya sebuah inovasi yang dapat menjadikan penyelesaian

persoalan dalam materi relativitas khusus Einstein yang awalnya sulit menjadi sebuah persoalan yang dapat diselesaikan dengan cara mudah dan cepat. Teorema Pythagoras dapat menjadi salah satu pilihan untuk mengatasi kesulitan dalam menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein. Teorema Pythagoras adalah sebuah persamaan yang memiliki kaitan dengan segitiga siku – siku, yang pengertian dari persamaan Pythagoras tersebut adalah luas persegi pada sisi miring dalam segitiga siku – siku akan memiliki nilai yang sama dengan penjumlahan dari luas persegi dari sisi siku – siku yang lain. Teorema Pythagoras merupakan kuadrat dari panjang sisi miring sama dengan jumlah kuadrat dari panjang kaki - kakinya pada segitiga siku-siku (Rich, 2005).

Sebelumnya sudah dilakukan penelitian terkait dengan penyelesaian persoalan relativitas khusus Einstein menggunakan teorema Pythagoras yaitu, penelitian yang sudah dilakukan oleh S.D. Korkmaz dan L.B Okun. Hasil dari penelitian yang sudah dilakukan oleh S.D Korkmaz menjelaskan tentang penerapan dari teorema Pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein ke dalam dunia pendidikan (Korkmaz, 2016). Namun, penelitian yang telah dilakukan oleh Korkmaz tidak memberikan penjelasan yang begitu detail bagaimana penggunaan metode Pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein. Sedangkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan oleh L.B Okun menjelaskan tentang transmisi persamaan relativitas khusus Einstein ke dalam bentuk yang lebih sederhana (Okun, 2008). Namun, dalam penelitian tersebut persamaan yang dibahas hanyalah persamaan massa, energi, serta momentum saja. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya ditunjukkan dari persamaan dalam teorema Pythagoras yang diturunkan dari salah satu identitas trigonometri serta ditunjukkan dari bentuk persamaan dari hasil perhitungan yang sudah dilakukan terhadap persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein.

Oleh karena itu dalam penelitian ini peneliti membuat sebuah judul skripsi yang berjudul **“Metode Pythagoras untuk Menyelesaikan Persoalan Relativitas Khusus Einstein”** dengan tujuan untuk menjelaskan bagaimana hubungan antara persamaan dalam teorema Pythagoras dengan persamaan dalam

materi relativitas khusus Einstein dengan jelas serta menunjukkan bagaimana penggunaan dari metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein. Salah satu alasan lainnya yang juga mendasari tujuan dari penelitian ini adalah materi tentang teorema pythagoras yang sudah diajarkan sebelum materi tentang teori relativitas khusus Einstein, sehingga ketika penyelesaian persoalan relativitas khusus Einstein menggunakan metode pythagoras ini diajarkan akan lebih mudah diterima oleh siswa. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi tambahan sebuah alternatif jawaban untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein menjadi lebih mudah dan cepat. Selain hal tersebut terdapat juga sebuah buku yang didalamnya terdapat berbagai soal tentang relativitas khusus Einstein dan sudah disertai dengan pembahasannya menggunakan cara biasa dan menggunakan metode pythagoras sebagai cara cepatnya. Sehingga dengan adanya buku tersebut akan membantu siswa untuk memahami bagaimana penggunaan metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein.

### **1.2 Rumusan masalah**

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana aplikasi metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein ?
- b. Bagaimana solusi metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein ?

### **1.3 Batasan masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Relativitas merupakan sebuah materi yang memiliki banyak persamaan. Oleh karena itu perlu adanya batasan masalah dalam penelitian ini. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah materi tentang relativitas khusus Einstein dan pada materi tersebut terdapat sebuah persamaan yang akan dilakukan analisis dalam

penelitian ini. Persamaan relativitas khusus Einstein tersebut adalah persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa, serta energi.

#### 1.4 Tujuan

Berdasarkan uraian latar belakang yang ada, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menjelaskan aplikasi metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein.
- b. Menunjukkan solusi metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Berikut ini adalah manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini ialah diantaranya :

- a. Bagi peneliti, hasil dari penelitian ini dapat menambah wawasan tentang materi relativistik serta dapat dijadikan sebagai pemenuhan tugas untuk mendapatkan gelar sarjana.
- b. Bagi mahasiswa, penelitian ini dapat dijadikan sebagai solusi untuk mengerjakan persoalan relativitas khusus Einstein yang berhubungan dengan persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik
- c. Bagi guru, hasil dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan ajar untuk diajarkan kepada siswanya. Sehingga siswa dapat mengetahui bahwa ada solusi cepat dan mudah untuk mengerjakan persoalan relativitas khusus Einstein yang sulit. Dan persoalan relativitas khusus Einstein tersebut berhubungan dengan persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik.
- d. Bagi peneliti lain, penelitian ini dapat dijadikan sebagai acuan atau pedoman untuk diterapkan di sekolah.

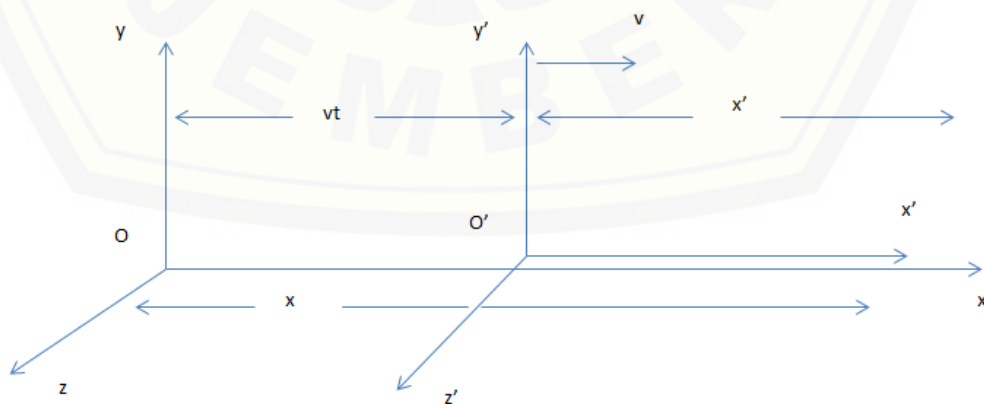


## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tranformasi Galilean

#### a. Kejadian dan koordinat

Jika meninjau sebuah sambaran kilat ke sebuah pohon. Peristiwa tersebut telah terjadi di sebuah titik yang berada di dalam ruang dan waktu yang sangat cepat. Untuk menyatakan peristiwa tersebut, seorang pengamat telah mengimplementasikan ke dalam empat buah koordinat, yaitu tiga koordinat posisi ( $x, y, z$ ) dan satu koordinat waktu ( $t$ ). Koordinat waktu digunakan oleh pengamat untuk menentukan berapa lama peristiwa tersebut terjadi. Meninjau dari dua orang pengamat yang dapat kita sebut dengan  $O$  dan  $O'$ . Kedua pengamat tersebut bergerak dengan kecepatan konstan ( $v$ ) terhadap  $O$  dan jaraknya adalah  $x - x'$  digambarkan dalam gambar 2.1. Agar kedua pengamat dapat mengukur berapa jarak dan waktunya, maka keduanya telah dilengkapi dengan alat ukur jarak dan waktu. Diasumsikan bahwa kedua pengamat telah menyesuaikan waktu mereka dan apabila kedua pengamat tersebut berpapasan di titik  $x = x' = 0$ , waktu yang terukur akan menunjukkan  $t = t' = 0$ . Setiap kejadian tersebut memiliki delapan besaran, yaitu empat buah koordiant yang dipusatkan di  $O$  ( $x, y, z, t$ ) dan empat buah koordinat yang dipusatkan di  $O'$  ( $x', y', z', t'$ ). Keduanya berada dalam kejadian yang sama. Berikut ini adalah gambar yang menggambarkan kejadian tersebut .



Gambar 2.1 Kejadian dan koordianat

#### b. Transformasi koordinat Galilean

Tranformasi koordinat Galilean dapat disebut dengan hasil dari hubungan antara pengukuran yang dipusatkan di O (x,y,z,t) dengan pengukuran yang dipusatkan di O' (x',y',z',t'). Hasil dari hubungan tersebut adalah sebagai berikut:

$$x' = x - vt \quad (2.1)$$

$$y' = y \quad (2.2)$$

$$z' = z \quad (2.3)$$

$$t' = t \quad (2.4)$$

keempat persamaan yang dihasilkan dari hubungan antara pengukuran yang dipusatkan di O dengan yang dipusatkan di O' itulah yang disebut dengan transformasi koordinat Galilean.

#### c. Transformasi kecepatan Galilean

Tranformasi kecepatan Galilean diperoleh dari hasil hubungan pengukuran kecepatan yang diukur oleh pengamat O ( $v_x, v_y, v_z$ ) dengan pengukuran kecepatan yang diukur oleh pengamat ( $v_x', v_y', v_z'$ ). Atau transformasi Galilean dapat disimpulkan dengan turunan dari hasil pengukuran pada transformasi koordinat Galilean. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$v_x' = v_x - v \quad (2.5)$$

$$v_y' = v_y \quad (2.6)$$

$$v_z' = v_z \quad (2.7)$$

#### d. Transformasi percepatan Galilean

Sama halnya dengan transformasi kecepatan Galilean yang diturunkan dari hasil pengukuran transformasi koordinat Galilean. Transformasi percepatan Galilean adalah hasil penurunan dari tranformasi kecepatan Galilean. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$a_x' = a_x \quad (2.8)$$

$$a_y' = a_y \quad (2.9)$$



$$a_z' = a_z \quad (2.10)$$

didapatkan bahwa  $t' = t$  dan  $v$  adalah konstan, sehingga komponen – komponen percepatan yang diukur sama untuk semua pengamat yang bergerak dengan kecepatan yang relatif sama (Gautreau, 1999).

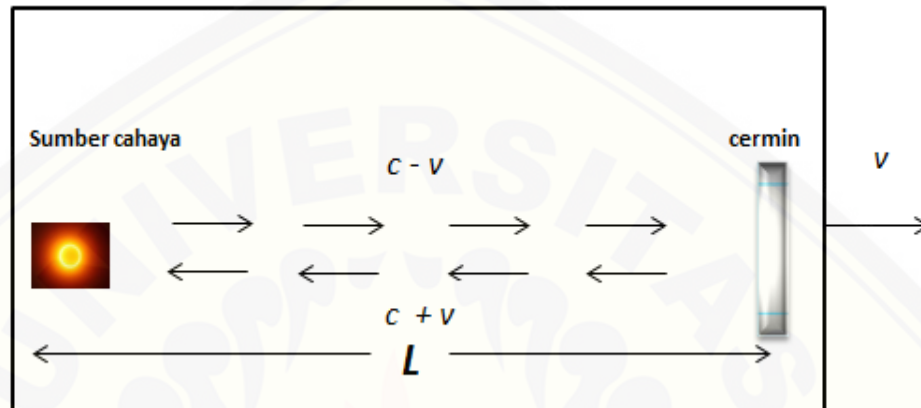
## 2.2 Ruang Mutlak dan Eter

Apabila meninjau dari sebuah sejarah fisika sebelumnya, persoalan tentang relativitas ternyata tidak hanya sebuah teori yang dimiliki oleh Einstein saja. Gagasan mengenai teori relativitas merupakan sebuah gagasan yang pernah disinggung oleh fisikawan yang berasal dari negara Italia, dan fisikawan tersebut bernama Galileo Galilei. Teori relativitas adalah sebuah teori yang baru pada masa itu, sehingga tidak begitu banyak kalangan yang mengerti tentang teori relativitas ini. Saat menyusun gagasan tentang teori relativitas, Einstein tidak mengetahui bahwa Michelson dan Morley telah melakukan percobaan pencarian eter. Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Michelson dan Morley itulah yang menyebabkan terbuktinya postulat kedua Einstein (Sugiyono, 2016).

Konsekuensi dari transformasi kecepatan Galilei adalah apabila seorang pengamat mengukur sebuah sinyal cahaya yang merambat dengan kecepatan cahaya ( $c = 3 \times 10^8$ ) m/det, maka pengamat lain yang bergerak relatif terhadapnya akan mengukur sinyal cahaya yang sama bergerak dengan suatu kecepatan yang bergerak dari  $c$ . Sebelum Einstein, telah diyakini bahwa pada umumnya pengamat istimewa adalah seorang pengamat sama dimana persamaan Maxwell berlaku. Persamaan Maxwell menggambarkan sebuah teori elektromagnet dan juga meramalkan bahwa gelombang elektromagnet akan merambat dengan laju cahaya. Ruang yang diam terhadap pengamat istimewa dapat disebut dengan “ruang mutlak”. pengamat lain yang bergerak terhadap ruang mutlak ini akan mendapati bahwa ada perbedaan laju cahaya dengan  $c$ . Karena cahaya adalah sebuah gelombang elektromagnet, maka menurut para fisikawan abad 19 harus terdapat satu medium yang di dalamnya cahaya merambat. Maka dipostulatkan bahwa “eter” berperan sebagai ruang mutlak (Gautreau, 1978).

### 2.3 Percobaan Michelson-Morley

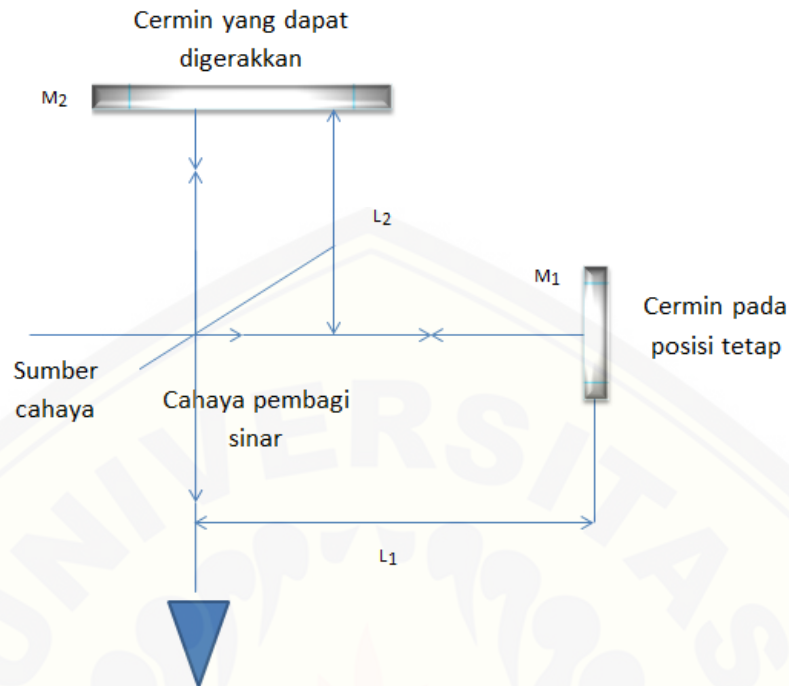
Percobaan untuk mencari kecepatan bumi relatif terhadap eter pertama kali dilakukan oleh seorang ilmuwan bernama Mischelson pada tahun 1881, kemudian dilanjutkan kembali oleh Michelson bersama – sama dengan Morley pada tahun 1887.



**Gambar 2.2** Skema percobaan mencari kecepatan bumi relatif terhadap eter.

Gambar 2.2 telah menggambarkan sumber cahaya dengan cermin yang terpisah oleh jarak sejauh  $L$ . Apabila kita menganggap keduanya (sumber cahaya dan cermin) bergerak dengan kecepatan  $v$  melalui eter, maka teori klasik telah memperkirakan sumber cahaya akan bergerak ke cermin dengan kecepatan  $(c - v)$  kemudian kembali lagi dengan kecepatan  $(c + v)$ . kedua kecepatan ini, yaitu kecepatan  $(c - v)$  dan kecepatan  $(c + v)$  relatif terhadap cermin dan sumber cahaya. Dalam percobaan ini diharapkan akan terjadi pola interferensi. Namun, pola interferensi yang diharapkan tidak terjadi, sehingga percobaan Michelson dan Morley ini tidak bisa membuktikan tentang adanya eter, yaitu medium merambatnya cahaya (Tipler 1996).

Kemudian pada tahun 1887, Michelson dan Morley melakukan percobaan mengukur kecepatan aliran eter menggunakan interferometer Michelson. Berikut ini adalah skema percobaan yang dilakukan oleh Michelson dan Morley.



**Gambar 2.3** Skema percobaan Michelson – Morley

Seberkas cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya. Kemudian, sumber cahaya itu dipisahkan menjadi dua berkas di titik pembagi sinar. Satu berkas dipantulkan oleh cermin M<sub>1</sub> (cermin posisi tetap) dan berkas yang lainnya dipantulkan oleh cermin M<sub>2</sub> (cermin yang dapat digerakkan). Kedua berkas itu dipadukan kembali sinarnya untuk diamati interferensinya di titik yang bergambar segitiga. Berdasarkan hasil pengamatan yang sudah dilakukan oleh Michelson dan Morley tidak terjadi pola interferensi. Dalam percobaan ini telah disimpulkan bahwa kecepatan cahaya tidak tergantung pada kerangka acuannya. Hasil yang demikian telah menunjukkan bahwa eter yang sebelumnya menjadi medium merambatnya cahaya dan gelombang elektromagnetik tidak ada (Rosana, 2000).

Percobaan Michelson- Morley merupakan sebuah percobaan yang dilakukan pada tahun 1887. Melalui percobaan itu Michelson-Morley mencoba membuktikan bahwa laju cahaya merupakan laju yang kecepatannya dipengaruhi oleh kecepatan kerangka acuannya. Michelson – Morley telah melakukan sebuah percobaan yang berkali – kali pada saat yang berlainan di sepanjang tahunnya dan lokasi yang berbeda – beda. Namun, Michelson-Morley selalu mendapatkan hasil

yang sama. Kesimpulan dari percobaan yang sudah dilakukan oleh Michelson-Morley adalah kecepatan cahaya merupakan sebuah kecepatan yang tidak bergantung kepada kerangka pengamatannya. Kerangka eter dari percobaan yang sudah dilakukan oleh Michelson-Morley ini ikut terseret dengan gerakan dari bumi sehingga pergeseran pola interferensi tidak terjadi. Akibat dari tidak menentukannya keadaan eter terhadap bumi, maka konsep ini selanjutnya telah ditinggalkan oleh kehadiran cahaya di ruang hampa tanpa hadirnya medium menjadi permasalahan yang tidak perlu dipikirkan (Kusminarto,2011)

Eksperimen yang dilakukan oleh Michelson yang bekerja sama dengan Edward Morley adalah sebuah eksperimen mengenai pengukuran gerak bumi melalui 'eter'. Pengertian dari eter adalah suatu medium yang membuat cahaya dapat merambat di alam semesta ini. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Michelson-Morley adalah tidak mendapatkan gerak bumi terhadap eter. Eksperimen Michelson-Morley ini pada hakekatnya adalah suatu eksperimen yang membandingkan kelajuan cahaya sejajar dan tegak lurus dengan gerak bumi mengelilingi matahari, eksperimen ini juga memperlihatkan bahwa kelajuan cahaya sama bagi semua pengamat. Eksperimen Michelson-Morley ini telah menjadi dasar dari teori relativitas khusus Einstein yang dikemukakan pada tahun 1905 (Beiser, 1987).

#### **2.4 Postulat Relativitas Khusus**

Pada dasarnya semua hal yang berhubungan dengan gerak merupakan sesuatu yang relatif. Dapat dikatakan bahwa kelajuan cahaya yang berada di dalam ruang hampa akan bernilai sama bagi semua pengamat. Contoh – contoh mengenai apa itu yang dimaksud dengan gerak relatif adalah seorang penumpang yang bergerak relatif terhadap kapal udara, kapal yang kemudian bergerak relatif terhadap bumi, kemudian bumi yang bergerak relatif terhadap matahari, dan selanjutnya matahari yang bergerak relatif terhadap galaksi Bimasakti. Berbagai contoh mengenai gerak relatif tersebut merupakan sebuah pengalaman atau sebuah pengetahuan yang masih terbatas. Kecepatan dari semua contoh mengenai gerak relatif tersebut merupakan sebuah kecepatan yang memiliki kelajuan gerak

relatif yang besarnya lebih kecil dari kecepatan cahaya, maka tinjauan fisika klasik Newton tidak bisa berlaku lagi. Dan permasalahan tersebut merupakan sebuah permasalahan yang hanya dapat dipecahkan menggunakan teori relativitas khusus Einstein. Dalam relativitas telah dijelaskan juga bahwa tidak ada sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan yang melebihi kecepatan cahaya (Wiyatmo, 2003).

Postulat relativitas khusus menyebutkan bahwa semua gerak adalah relatif, kelajuan cahaya yang ada di dalam ruang hampa adalah sama bagi semua pengamat. Kelajuan cahaya yang ada di dalam ruang hampa menurut Maxwell adalah  $3 \times 10^8$  dan dari hal tersebut dijelaskan bahwa tidak ada sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan yang melebihi kecepatan cahaya. Ketika variabel – variabel seperti panjang, waktu, dan massa yang ada pada bagian fisika pendahuluan, tidak bisa dijelaskan bagaimana variabel tersebut diukur. Hal ini dikarenakan terdapat satuan baku untuk variabel – variabel tersebut, yang seolah olah tidak menjadi persoalan siapa yang menentukan variabel tersebut . contohnya adalah ketika kita berada di dalam pesawat, lalu kita menjulurkan sebuah pita pengukur yang digunakan untuk mengukur panjang pesawat dari hidung hingga ekor pesawat. Jika kita berada pada suatu jarak tertentu untuk mengukur panjangnya pesawat dengan suatu perhitungan, maka kita akan mendapatkan nilai panjang pesawat yang sama. Namun, bagaimana jika kita berada di bumi, pasti akan sulit untuk melakukan perhitungan tersebut. Hasil perhitungan untuk seseorang yang berada di dalam kapal akan berbeda dengan hasil perhitungan seseorang yang ada di bumi. Untuk mengerti perbedaan tersebut, harus dilakukan sebuah analisis mengenai proses yang lebih rinci. Teori relativitas muncul sebagai hasil analisis konsep universal. Teori relativitas khusus dikembangkan oleh Albert Einstein pada tahun 1905, mempersoalkan kerangka acuan universal, kerangka acuan ini bergerak dalam kecepatan tetap terhadap kerangka lainnya (Beiser, 2003).



## 2.5 Postulat Einstein

Teori relativitas merupakan sebuah teori yang muncul sebagai suatu hasil dari analisis konsekuensi fisis yang tersirat oleh ketiadaan kerangka acuan universal. Teori relativitas khusus merupakan sebuah teori yang dikembangkan oleh ilmuwan fisika yang bernama Albert Einstein, dan teori relativitas khusus ini ditemukan pada tahun 1905. Kerangka acuan universal merupakan sebuah kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap terhadap kerangka yang lainnya. Teori relativitas khusus merupakan sebuah teori yang bersandar pada dua buah postulat. Postulat yang pertama adalah prinsip relativitas, menyatakan hukum fisika merupakan sebuah hukum yang dapat dinyatakan dengan bentuk persamaan yang memiliki bentuk yang sama dalam semua kerangka acuan, yang bergerak dengan kecepatan tetap.

Postulat pertama menyatakan bahwa tidak adanya kerangka acuan universal. Apabila sebuah hukum fisika memiliki perbedaan untuk pengamat yang berbeda, maka dapat ditentukan mana yang diam dan mana yang bergerak. Tetapi dikarenakan tidak adanya kerangka acuan universal tersebut, perbedaan mengenai sebuah keadaan itu tidak ada. Sehingga muncullah postulat yang pertama. Postulat yang kedua adalah kecepatan cahaya yang berada di dalam ruang hampa memiliki nilai yang sama besar untuk semua pengamat, tidak bergantung waktu dari keadaan pengamat tersebut. Postulat kedua merupakan sebuah postulat yang mengikuti hampir semua konsep intuitif mengenai waktu dan ruang yang dibentuk berdasarkan pengalaman sehari – hari (Wiyatmo, 2003).

Gagasan penuntun Einstein, yang disebut asas relativitas (principle of Relativity) adalah semua pengamat yang tidak mengalami suatu percepatan seharusnya dapat diperlakukan setara dalam berbagai hal, meskipun semua pengamat tersebut bergerak relatif terhadap yang lainnya. Postulat Einstein mengenai relativitas khusus adalah sebagai berikut :

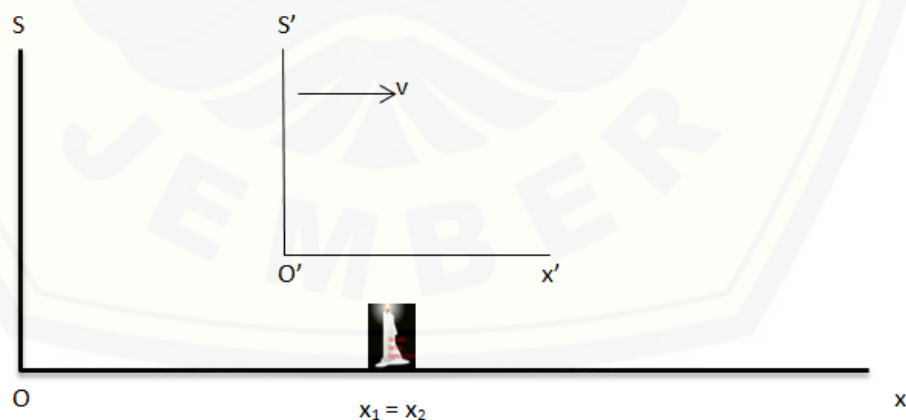
Postulat 1 : hukum – hukum fisika adalah invarian bagi semua pengamat inersial (yang tidak mengalami percepatan).

Postulat 2 : dalam ruang hampa, laju cahaya yang diukur semua pengamat inersial adalah  $c = 3 \times 10^8$  m/det tidak bergantung pada sumbernya mutlak.

Postulat yang ke-1 memiliki makna bahwa hukum – hukum fisika adalah hukum – hukum yang memiliki bentuk dan persamaan yang sama bagi semua pengamat yang diam atau pengamat yang bergerak dengan kecepatan konstan. Untuk postulat yang ke-2 memiliki makna bahwa dalam ruang hampa, kecepatan cahaya yang diukur oleh pengamat diam dan pengamat yang bergerak dengan kecepatan konstan akan mendapatkan nilai yang sama dan tidak bergantung pada gerak pengamat maupun gerak sumber cahayanya (Gautreau, 1978).

### 2.5.1 Dilatasi Waktu

Apabila ada dua buah kerangka S dan S', kedua kerangka tersebut saling bergerak relatif pada lintasan sepanjang x dan memiliki kelajuan sebesar v. dan selanjutnya jam (waktu) kedua kerangka tersebut telah disamakan. Tinjau gambar 2.4 untuk mempermudah pembahasan mengenai dua buah peristiwa yang terjadi dalam kerangka S. Digambarkan sebuah peristiwa menyalanya suatu lilin dan matinya lilin tersebut karena telah habis terbakar.



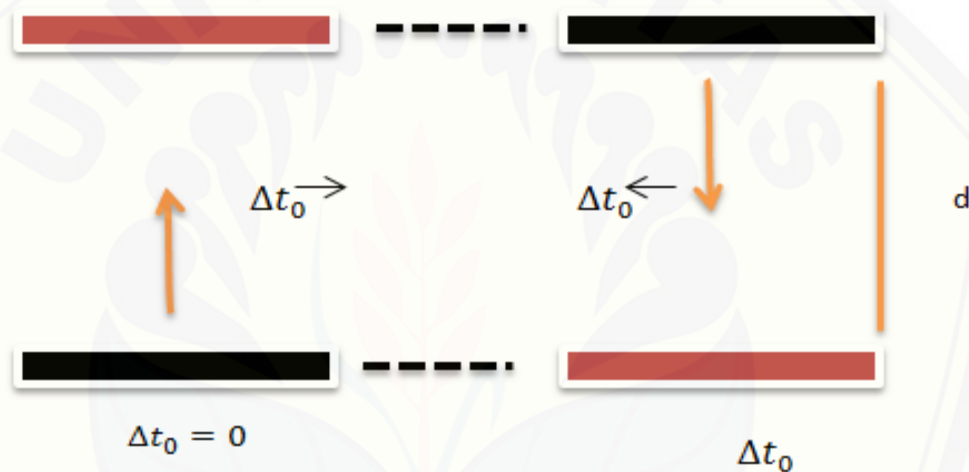
**Gambar 2. 4** Sebuah lilin yang berada dalam sistem S, sementara umur lilin diamati oleh sistem S dan S'

Oleh pengamat yang berada di S kedua peristiwa tersebut (menyala dan matinya lilin karena habis terbakar) diamati terjadi saat  $t_1$  dan  $t_2$ . Dikarenakan lilin yang



berada di S tidak berubah posisinya terhadap waktu yang sudah diukur di posisi S maka  $x_1 = x_2$ . Pengamat yang berada di dalam posisi S' melihat bahwa kedua peristiwa terjadi pada saat  $t_1'$  dan  $t_2'$  di posisi yang berbeda, posisi tersebut adalah sebuah posisi yang berada di  $x_1'$  dan  $x_2' \neq x_1'$ . Kedua hasil pengamatan tersebut dihubungkan dengan kaidah alih bentuk Lorentz. Dan dari peristiwa tersebut akan diperoleh sebuah persamaan dilatasi waktu (Kusminarto, 2011).

Sebuah objek (berada dalam kendaraan supercepat). Menembakkan sinar ke atas, kemudian sinar tersebut memantul ke bawah. (objek yang berada di dalam kendaraan supercepat tersebut dimisalkan dengan ( $\Delta t_0$ )).

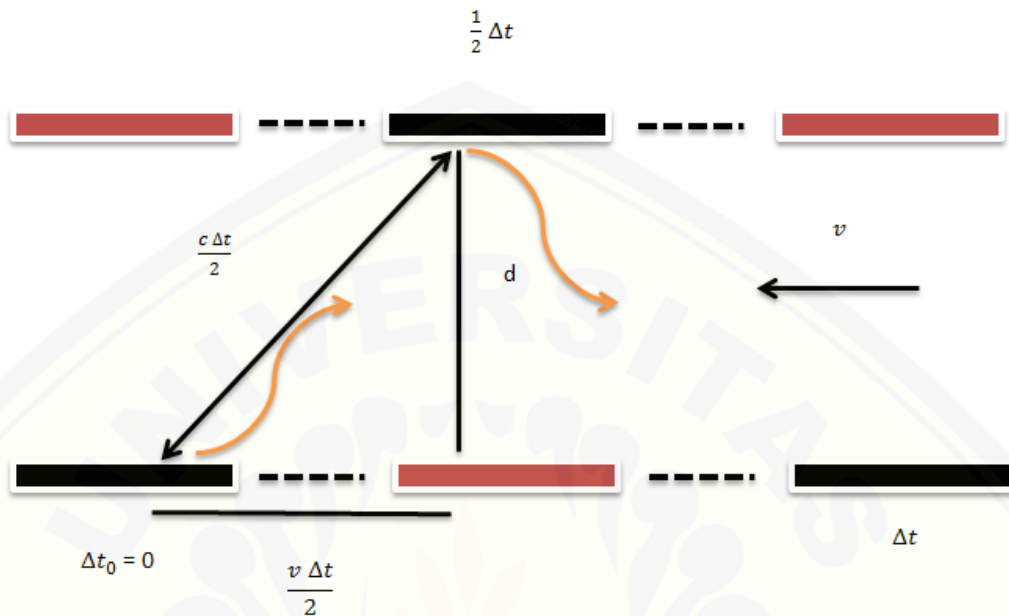


**Gambar 2.5** Jalannya sinar yang dipancarkan pada objek yang berada di dalam kendaraan yang berjalan supercepat

Bagi objek yang berada di dalam kendaraan supercepat tersebut ( $\Delta t_0$ ). Waktu yang dibutuhkan sinar dari ketika sinar memancarkan sinarnya kemudian memantul ke bawah adalah :

$$\begin{aligned} \Delta t_0 &= \Delta t_0 \rightarrow + \leftarrow \Delta t_0 \\ &= \frac{d}{c} + \frac{d}{c} \\ \Delta t_0 &= \frac{2d}{c} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Kemudian bagi pengamat yang diam (berada diluar kendaraan supercepat), digambarkan sebagai berikut :



**Gambar 2.6** Jalannya sinar yang dipancarkan pada objek yang berada di luar kendaraan yang berjalan supercepat

Waktu yang dibutuhkan sinar untuk memancar keatas kemudian dipantulkan ke bawah adalah :

$$\left(c \frac{\Delta t}{2}\right)^2 = \left(v \frac{\Delta t}{2}\right)^2 + d^2 \quad (2.12)$$

$$\left(c \frac{\Delta t}{2}\right)^2 - \left(v \frac{\Delta t}{2}\right)^2 = d^2$$

$$(c \Delta t)^2 - (v \Delta t)^2 = 2^2 d^2$$

$$\Delta t^2 (c^2 - v^2) = 2^2 d^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{2^2 d^2}{(c^2 - v^2)}$$

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{(c^2 - v^2)}}$$

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

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.13)$$

(Sugiyono,2016),

Pengukuran dilatasi waktu dipengaruhi oleh gerak relatif antara pengamat dan benda yang diamati. Akibatnya, waktu yang bergerak relatif terhadap pengamat akan menunjukkan lebih lambat dari pada waktu yang dimiliki oleh benda yang diamati. Dan semua proses (termasuk proses kehidupan) akan lebih lambat dirasakan oleh pengamat ketika pengamat dengan benda yang diamati terjadi dalam kerangka inersia yang berbeda (Beiser, 2003).

Persamaan dalam dilatasi waktu adalah sebagai berikut :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.14)$$

keterangan :

$\Delta t$  : selang waktu menurut pengamat yang bergerak terhadap kejadian

$\Delta t_0$  : selang waktu menurut pengamat yang diam terhadap kejadian

### 2.5.2 Kontraksi Panjang Relativistik

Kontraksi panjang merupakan sebuah fenomena relativistik dimana panjang objek (yang melaju dengan kecepatan yang kecepataannya tersebut mendekati kecepatan cahaya) seakan – akan memiliki nilai lebih pendek apabila dibandingkan dengan panjang yang sebenarnya (atau bisa juga panjang diamnya) menurut pengamat yang diam. Namun, hal ini perlu dicermati kembali bahwa panjang diam objek harus berada dalam posisi yang sejajar dengan sumbu geraknya. Besar panjang objek yang sebenarnya atau panjang yang sudah teramati

oleh objek dalam keadaan diam dapat dinyatakan ke dalam sebuah persamaan sebagai berikut :

$$L_0 = v \Delta t \quad (2.15)$$

Sedangkan bagi seorang pengamat yang diam, besar panjang objek yang sedang bergerak dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya dapat dinyatakan kedalam persamaan sebagai berikut :

$$L = v \Delta t_0 \quad (2.16)$$

Apabila kedua persamaan tersebut digabungkan akan didapatkan besar panjang objek yang telah teramati oleh seorang pengamat yang diam adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} L &= v \Delta t_0 \\ &= v (\Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}) \\ &= (v \Delta t) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \end{aligned}$$

Dengan demikian kontraksi panjang objek yang sedang bergerak dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya dapat dinyatakan kedalam persamaan sebagai berikut :

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.17)$$

(Sugiyono,2016)

Apabila sebuah benda berada pada suatu keadaan diam terhadap seorang pengamat, maka panjang dari benda tersebut dapat ditentukan dengan mengukur perbedaan koordinat – koordinat spasial ruang di ujung – ujung benda tersebut. Apabila benda tidak bergerak, pengukuran terhadap benda ini dapat dilakukan

kapan saja dan panjang yang sudah ditentukan untuk benda tersebut dapat disebut sebagai panjang diam atau panjang sesungguhnya. Untuk benda yang bergerak, prosedurnya akan lebih rumit lagi, yaitu apabila koordinat – koordinat spasial di titik – titik ujung benda tersebut harus diukur pada waktu yang sama. Perbedaan koordinat – koordinat ini dapat disebut dengan panjang benda (Gautreau, 1999).

Persamaan dalam kontraksi panjang adalah sebagai berikut :

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.18)$$

Keterangan :

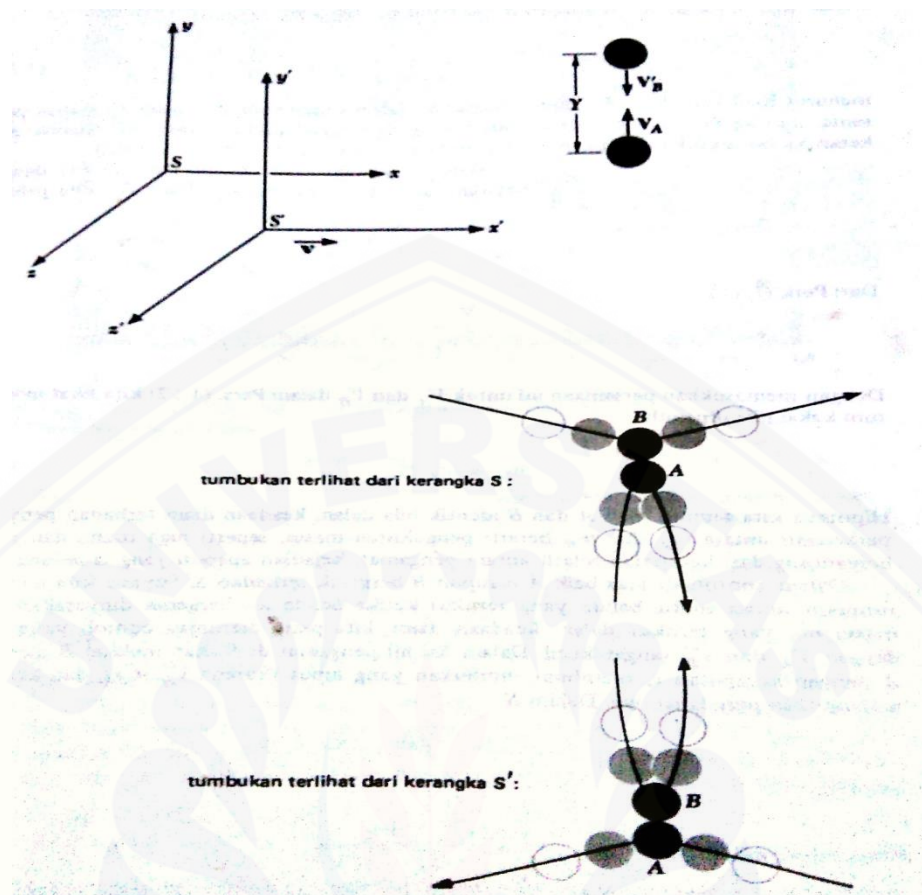
$L$  = panjang menurut pengamat yang bergerak relatif terhadap benda.

$L_0$  = panjang benda menurut pengamat yang diam relatif terhadap benda.

### 2.5.3 Massa Relativistik

Hal yang sudah ditinjau dari relativitas khusus sampai saat ini adalah aspek kinematiknya, padahal akibat dinamis dari relativitas khusus sama menariknya dengan aspek kinematiknya. Yang termasuk dalam kasus ini adalah perubahan massa terhadap kecepatan dan kesetaraan massa dan energi.

Semua ini dimulai dengan meninjau tumbukan elastis antara dua buah partikel, yaitu partikel A dan partikel B, yang sedang diamati oleh pengamat dengan kerangka acuan S dan S' yang berada dalam gerak relatif yang sama. Sifat partikel A dan B adalah sejenis jika ditentukan terhadap kerangka acuan tempat dimana sebuah partikel tersebut diam. Kerangka S dan S' sudah tergambarkan dalam gambar 2.4



**Gambar 2.7** ( Kerangka acuan pengamat S dan S')

Dalam gambar tersebut S' bergerak dalam arah +x terhadap S dengan kecepatan  $v$ . sebelum terjadi tumbukan, partikel A dalam keadaan diam terhadap kerangka S kemudian B diam terhadap S'. Dan kemudian kedua partikel ini dilemparkan secara bersamaan. A dilempar ke arah +y dengan kecepatan  $V_A$ , B dilempar ke arah  $-y'$  dengan kecepatan  $V_B'$ . Dalam hal ini  $V_A = V_B'$ , peristiwa yang teramati oleh pengamat S yang mengamati partikel A memiliki kesamaan dengan peristiwa yang teramati oleh pengamat S' yang mengamati partikel B. Ketika kedua partikel tersebut bertumbukan, partikel A akan memantul ke arah  $-y$  dengan kecepatan  $V_A$ , sedangkan partikel B memantul ke arah  $+y'$  dengan kecepatan  $V_B'$ . Dari analisis contoh peristiwa tersebut hasil akhir yang akan diperoleh adalah massa benda yang bergerak dengan kecepatan relatif terhadap



pengamat menjadi lebih besar daripada massa ketika benda diam terhadap pengamat dengan faktor  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  (Beiser, 1990).

#### 2.5.4 Massa dan Energi

Einstein menunjukkan bahwa semua pengamat akan menemukan ketepatan prinsip – prinsip momentum klasik jika massa sebuah benda memiliki variasi terhadap kecepatannya, yang besarnya adalah sebagai berikut :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.19)$$

dengan  $m$  dapat diartikan sebagai massa diam. Pengertian dari massa diam adalah massa benda yang diukur pada saat massa tersebut berada dalam keadaan diam relatif terhadap pengamat.

Hubungan massa dan energi digambarkan oleh energi kinetik. Dalam mekanika klasik energi kinetik sebuah benda sama dengan usaha yang dilakukan oleh gaya luar untuk menaikkan suatu kecepatan benda dari nol sampai kepada nilai tertentu. Energi kinetik menunjukkan perbedaan antara energi total  $E$ , dari suatu partikel yang bergerak dengan energi diam  $E_0$  dari sebuah partikel yang diam, sehingga pesamaannya adalah sebagai berikut :

$$E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 \quad (2.20)$$

Jika energi diam dipisahkan maka  $E_0 = m_0c^2$ . Sehingga akan didapatkan persamaan Einstein yang begitu terkenal yaitu

$$E = mc^2 \quad (2.21)$$

(Gautreau, 1999).

Berikut ini adalah penurunan rumus dari energi kinetik yang dapat digunakan untuk menjelaskan hubungan massa dan energi yang terdapat dalam persamaan (2.8).

$$K = \int_0^s F ds \quad (2.22)$$

$F$  menyatakan komponen gaya yang beraksi dalam arah perpindahan  $ds$  dan  $s$  yang menyatakan besarnya jarak selama gaya tersebut beraksi.

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (2.23)$$

Substitusi persamaan (2.23) ke dalam persamaan (2.22)

$$K = \int_0^s \frac{d(mv)}{dt} ds = \int_0^{mv} v d(mv) \quad (2.24)$$

Substitusi persamaan (2.19) ke dalam persamaan (2.24)

$$K = \int_0^{mv} v d\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) \quad (2.25)$$

Lakukan perhitungan menggunakan integral parsial terhadap persamaan (2.25)

$$K = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \int_0^v \frac{v dv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.26)$$

$$K = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} + [m_0 c^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}]_0^v$$

$$K = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \quad (2.27)$$

$$K = mc^2 - m_0 c^2 \quad (2.28)$$

Energi total

$$E = mc^2 \quad (2.29)$$

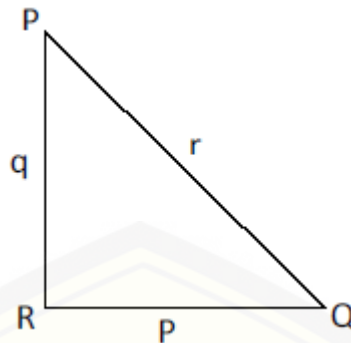
Substitusi persamaan 2.19 ke persamaan 2.29

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.30)$$

(Beiser,1990).

## 2.6 Teorema Pythagoras

Teorema Pythagoras merupakan salah satu cara yang dapat digunakan dalam menyelesaikan berbagai permasalahan matematika yang berhubungan dengan bangun datar dan bangun ruang. Menurut Rich (2005:66) pengertian dari teorema Pythagoras adalah kuadrat dari panjang sisi miring sama dengan jumlah kuadrat dari tinggi suatu segitiga siku – siku dengan alasnya.



**Gambar 2. 8** ( Segitiga siku – siku )

$$PQ^2 = RQ^2 + PR^2 \quad (2.31)$$

$$r^2 = p^2 + q^2 \quad (2.32)$$

Teorema Pythagoras di dalamnya berlaku bahwa pada setiap sembarang segitiga siku - siku, jika digambarkan persegi-persegi pada ketiga sisinya, maka luas persegi pada hipotenusa (sisi di depan sudut siku-siku) akan sama dengan jumlah luas daerah persegi pada dua sisi yang lain (Skemp, 1971).

Teorema pythagoras adalah sebuah teori yang telah berhasil ditemukan oleh seorang ilmuwan matematika yang berasal dari bangsa Yunani yang bernama Phytagoras dan phytagoras adalah seorang ilmuwan yang hidup di abad ke-enam masehi. Theorema phytagoras menyatakan bahwa untuk setiap segitiga siku – siku jumlah kuadrat pada dua sisi siku – sikunya akan memiliki nilai yang sama dengan kuadrat pada sisi di depan sudut siku – sikunya. Jika ABC merupakan sebuah segitiga siku – siku, dan kemudian a dan b merupakan panjang dari sisi siku – sikunya akan berlaku sebuah persamaan sebagai berikut :

$$AB^2 = BC^2 + AC^2 \quad (2.33)$$

Atau juga dapat dinyatakan dalam persamaan

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (2.34)$$

$$a^2 = c^2 - b^2$$

$$b^2 = c^2 - a^2 \text{ (Hasanah,2016).}$$

Pada sebuah segitiga siku – siku , sisi yang terletak dihadapan sudut siku – siku dapat disebut dengan sisi miring atau bisa juga disebut dengan hipotenusa. Berikut ini adalah pernyataan – pernyataan terkait dengan teorema pythagoras :

- a. Di dalam segitiga siku – siku akan berlaku jumlah kuadrat sisi siku – siku akan memiliki nilai yang sama dengan kuadrat hipotenusanya.
- b. Jika  $a, b, c$  disebut sebagai panjang sisi – sisi segitiga siku – siku dengan  $a, b, c$  adalah suatu bilangan real, maka  $a, b, c$  dapat dikatakan sebagai bilangan tripel pythagoras.
- c. Jika  $a, b, c$  adalah suatu panjang sisi – sisi suatu segitiga yang telah memenuhi persamaan  $a^2 + b^2 = c^2$  dengan  $c$  menyatakan hipotenusanya, maka segitiga tersebut adalah segitiga siku – siku (Hidayati, 2016).

Menurut Sefrida (2016) menyatakan bahwa kuadrat sisi miring atau bisa disebut dengan hipotenusanya suatu segitiga siku – siku akan bernilai sama dengan jumlah kuadrat panjang kedua sisinya. Dari pernyataan tersebut telah diperoleh suatu kebalikan dari dalil pythagoras yaitu sebagai berikut :

- a. Jika kuadrat sisi miring atau sisi terpanjang sebuah segitiga sama dengan jumlah kuadrat panjang kedua sisinya, maka segitiga tersebut merupakan segitiga siku – siku, atau
- b. Jika pada suatu segitiga berlaku  $a^2 + b^2 = c^2$ , maka segitiga ABC tersebut merupakan segitiga siku – siku dengan besar dari salah satu sudutnya bernilai  $90^\circ$ .

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Jenis, Waktu dan Tempat Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis penelitian non eksperimen, penelitian ini akan dilaksanakan pada saat semester 7. Tempat yang akan digunakan untuk melaksanakan penelitian ini adalah di Laboratorium Fisika, Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember.

### 3.2 Definisi Operasional Variabel

Variabel – variabel yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### a. Persamaan dalam Teorema Phytagoras

Metode phytagoras adalah sebuah metode yang menyatakan bahwa pada setiap segitiga siku – siku jumlah kuadrat pada dua siku – sikunya akan memiliki nilai yang sama dengan kuadrat pada sisi di depan siku – sikunya. Dalam penelitian ini akan diteliti bagaimana hubungan antara persamaan – persamaan relativitas khusus Einstein dengan persamaan dalam teorema phytagoras. Perlakuan yang akan diberikan berupa melakukan perhitungan terhadap persamaan dalam teorema phytagoras.

#### b. Persamaan dalam materi Relativitas Khusus

Persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein dalam penelitian ini berperan sebagai variabel yang akan dianalisis terkait hubungannya dengan persamaan dalam teorema phytagoras. Persamaan relativitas khusus Einstein yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### 1. Dilatasi waktu

Salah satu persamaan yang termasuk bagian dari materi relativitas khusus Einstein adalah persamaan dilatasi waktu. Dalam materi relativitas khusus Einstein persamaan dilatasi waktu adalah sebuah persamaan yang memiliki bentuk sebagai berikut :

$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Persamaan dilatasi waktu ini adalah sebuah persamaan yang akan

diteliti dalam penelitian ini. Apakah ada hubungan antara persamaan dilatasi waktu dengan persamaan dalam teorema pythagoras.

## 2. Kontrasi panjang

Kontrasi panjang adalah bagian dari materi relativitas khusus Einstein yang memiliki bentuk persamaan sebagai berikut :

$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Persamaan kontrasi panjang adalah sebuah persamaan yang

akan diteliti dalam penelitian ini. Hal yang akan diteliti dalam penelitian ini terkait dengan hubungan persamaan kontrasi panjang dengan persamaan dalam teorema pythagoras.

## 3. Massa Relativistik

Dalam relativitas khusus Einstein massa relativistik adalah materi yang memiliki sebuah bentuk persamaan sebagai berikut :

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Persamaan massa relativistik adalah sebuah persamaan yang akan

diteliti dalam penelitian ini. Apakah ada hubungan antara persamaan massa relativistik dengan persamaan dalam teorema pythagoras.

## 4. Massa dan energi

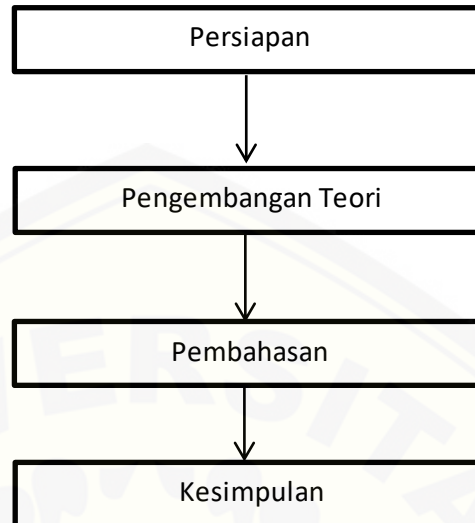
Dari hubungan massa energi akan didapatkan sebuah persamaan baru tentang energi. persamaan tersebut memiliki bentuk persamaan sebagai berikut:

$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Persamaan energi adalah sebuah persamaan yang akan diteliti dalam

penelitian ini. Apakah ada hubungan antara persamaan energi relativistik dengan persamaan dalam teorema pythagoras.



### 3.3 Langkah Penelitian



**Gambar 3. 1** Skema penelitian

a. Persiapan

Pada tahap persiapan adalah tahap dimana peneliti mempersiapkan segala sesuatu yang dibutuhkan dalam penelitian. Dalam penelitian ini hal – hal yang dibutuhkan adalah materi, kertas, bolpoin. Materi yang digunakan untuk penelitian ini adalah materi tentang relativitas khusus Einstein dan materi tentang teorema pythagoras. Hal – hal yang berkaitan dengan materi relativitas khusus Einstein yang digunakan dalam penelitian ini adalah persamaan – persamaannya yaitu, persamaan dilatasi waktu, kontrasi panjang, massa relativistik, serta energi relativistik. Kertas dan bolpoin dalam penelitian ini adalah sebuah alat digunakan untuk melakukan proses perhitungan.

b. Pengembangan Teori

Tahap pengembangan teori adalah sebuah tahap dimana peneliti dalam hal ini mengembangkan sebuah teori dari teori yang sudah ada. Teori yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah persamaan dalam teorema pythagoras. sehingga dengan pengembangan teori ini persoalan dalam materi relativitas khusus yang sebelumnya diselesaikan dengan menggunakan banyak persamaan hingga menimbulkan kesulitan, menjadi sebuah persoalan yang mudah dan sederhana untuk diselesaikan.

c. Pembahasan

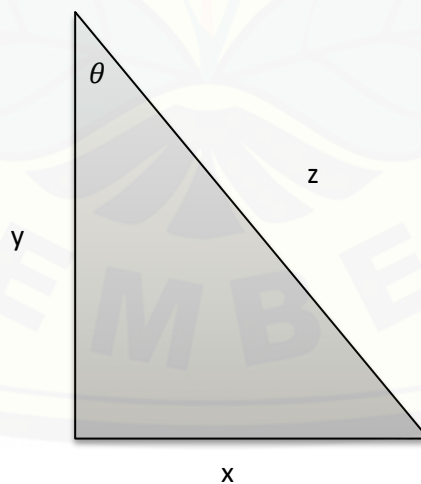
Tahap pembahasan adalah tahap untuk membahas tentang bagaimanakah hubungan antara persamaan – persamaan relativitas khusus Einstein dengan persamaan dalam teorema pythagoras. Pada tahap pembahasan ini terdapat proses perhitungan persamaan – persamaan relativitas khusus Eintein, yaitu persamaan dilatasi waktu, kontrasi panjang, massa relativistik, serta energi relativistik. Dimana perhitungan ini berguna untuk memperoleh sebuah persamaan baru yang kemudian dianalisis hubungannya dengan persamaan dalam teorema pythagoras.

d. Kesimpulan

Pada tahap kesimpulan ini adalah tahap dimana hubungan antara persamaan – persamaan relativitas khusus Einstein dengan persamaan dalam teorema pythagoras sudah diperoleh. Sehingga dari semua proses yang dilakukan dalam penelitian ini telah disimpulkan hasilnya pada tahap kesimpulan.

### 3.4 Pengembangan Teori

Teori yang telah digunakan di dalam penelitian ini adalah teori tentang teorema pythagoras. Persamaan yang ada dalam teorema pythagoras adalah sebagai berikut



Gambar 3. 2 (Segitiga siku - siku)

1.  $z^2 = x^2 + y^2$
2.  $x^2 = z^2 - y^2$
3.  $y^2 = z^2 - x^2$

(3.1)

Persamaan dalam teorema pythagoras dapat diperoleh dari hasil penjumlahan suatu bentuk trigonometri yaitu,  $\sin \theta$  dan  $\cos \theta$  yang tergambar dalam sebuah segitiga siku – siku. Hasil yang didapatkan dari perhitungan terhadap persamaan dalam teorema pythagoras adalah sebagai berikut :

Dari gambar tersebut akan didapatkan bahwa :

$$\sin \theta = \frac{\text{depan}}{\text{miring}} = \frac{x}{z} \quad (3.2)$$

$$\cos \theta = \frac{\text{samping}}{\text{miring}} = \frac{y}{z} \quad (3.3)$$

Diketahui suatu identitas dari fungsi trigonometri.

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (3.4)$$

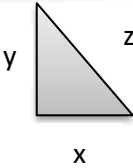
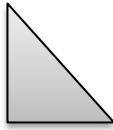
Sehingga fungsi tersebut akan bernilai sama jika dituliskan kedalam bentuk.

$$\frac{x^2}{z^2} + \frac{y^2}{z^2} = 1 \quad (3.5)$$

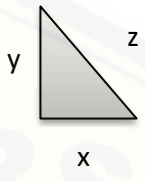
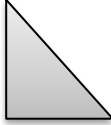
### 3.5 Metode Analitik

Berikut ini adalah tabel analisis data menggunakan metode analitik untuk menentukan hubungan antara teorema pythagoras dengan persamaan – persamaan dalam relativitas khusus Einstein :

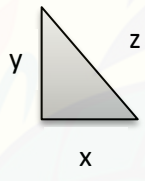
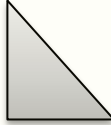
**Tabel 3.1** Analisis Persamaan Dilatasi Waktu dengan Persamaan Teorema Phytgoras

Persamaan Dilatasi Waktu	Persamaan Phytgoras	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Phytgoras )	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Dilatasi Waktu)
	$\frac{x^2}{z^2} + \frac{y^2}{z^2} = 1$		

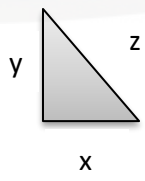
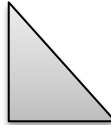
**Tabel 3.2** Analisis Persamaan Kontraksi Panjang dengan Persamaan Teorema Phytgoras

Persamaan Kontraksi Panjang	Persamaan Phytgoras	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Phytgoras )	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Kontraksi Panjang)
	$\gamma^2 - \beta^2 = 1$		

**Tabel 3.3** Analisis Persamaan Massa Relativistik dengan Persamaan Teorema Phytgoras

Persamaan Massa Relativistik	Persamaan Phytgoras	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Phytgoras )	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Massa Relativistik)
	$\gamma^2 - \beta^2 = 1$		

**Tabel 3.4** Analisis Persamaan Energi Relativistik dengan Persamaan Teorema Phytgoras

Persamaan Energi Relativistik	Persamaan Phytgoras	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Phytgoras )	Gambar Segitiga Siku - Siku (Persamaan Energi Relativistik)
	$\gamma^2 - \beta^2 = 1$		

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- a. Aplikasi dari metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein adalah sebagai solusi cepat dan sederhana untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein yang didapatkan dari hubungan antara persamaan dalam materi relativitas khusus Einstein dengan persamaan dalam teorema pythagoras.
- b. Solusi metode pythagoras untuk menyelesaikan persoalan relativitas khusus Einstein adalah persoalan relativitas khusus Einstein yang sebelumnya memiliki banyak persamaan sehingga dalam penyelesaiannya menjadi lama dan cukup sulit untuk dikerjakan, maka dengan menggunakan metode pythagoras persoalan relativitas khusus Einstein tersebut dapat dikerjakan dengan cepat dan mudah.

### 5.2 Saran

Penelitian ini adalah sebuah penelitian tentang sebuah alternatif penyelesaian persoalan relativitas khusus Einstein menggunakan metode pythagoras. Saran yang bisa diberikan untuk peneliti selanjutnya adalah hasil dari penelitian yang sudah dilakukan ini dapat diterapkan ke dalam pembelajaran. Peneliti selanjutnya juga dapat menemukan sebuah alternatif penyelesaian persoalan dalam materi fisika yang lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anugraha, Rinto. 2014. *Teori Relativitas dan Aplikasinya pada Elektrodinamika, Lubang Hitam, dan Jagat Raya*. Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.
- Beiser, Arthur. 1990. *Concept of Modern Physics*. Fourth edition. North America : The Mc Graw – Hill, Inc. Terjemahan oleh Liong. The Houw. 2003. *Konsep fisika modern*. Jakarta : PT Erlangga.
- Beiser, Arthur. 2003. *Concepts of Modern Physics*. Sixth edition. North America : The Mc Graw – Hill, Inc.
- Gautreau , Ronald , dan Savin William. 1978. *Modern Physics*. New Jersey : The Mc Graw – Hill Companies. Terjemahan oleh Wopspakirk. Hans J. 1995. *Fisika Modern*. Jakarta : PT Erlangga.
- Gautreau, Ronald, dan Savin William. 1999. *Modern Physics*. Second edition. New Jersey : The Mc Graw – Hill Companies. Terjemahan oleh Astranto. Soni . 2006. *Fisika modern*. Jakarta : PT Erlangga.
- Hasanah, Uswatun. 2016. Analisis Kesulitan Belajar Siswa Tunanetra Dalam Memahami Konsep Terema Phytagoras Di SMPLB-A TPA. *Skripsi*. Jember : Program Pendidikan Fisika Universitas Jember.
- Hidayati, Arina. 2016. Pengembangan Lembar Kerja Siswa (LKS) Dan Rencana Pelaksanaan Pembelajaran (RPP) Materi Phytagoras Berbasis Scientific Approach Berorientasi Discovery Learning Untu Siswa Kelas VII. *Skripsi*. Jember : Program Pendidikan Fisika Universitas Jember.
- Korkmaz, S.D., E.C. Aybek., M. Örucü. 2016. Special relativity theorem and Pythagoras magic. *IOPscience*: 9120
- Kusminarto. 2011. *Fisika Modern*. Yogyakarta : ANDI
- Okun, L.B. 2008. The theory of relativity and the Pythagoras theorem. *Physica – Uspheki*. 622 (51)
- Rich, Barnet. 2005. *Geometri*. Jakarta : Erlangga.
- Rosana, Dadan., Sukardiono. dan Supriadi. 2000. *Konsep Dasar Fisika Modern*. Yogyakarta : Universitas Negeri Yogyakarta.



- Sefrida, Risqi Dwi. 2018. Analisis Keterampilan Metakognitif Siswa Dalam Pembelajaran Model Collaborative Learning Pokok Bahasan Teorema Pythagoras. *Skripsi*. Jember : Program Pendidikan Fisika Universitas Jember.
- Serway, R. A., dan Jewett, J. W. 2014. *Physics for scientists and engineers*. ninth edition. Boston, MA : Brooks/Cole.
- Skemp, R. R. (1971). *The Psychology of Learning mathematics*. Ringwood, Victoria : Pinguin Books Ltd.
- Sugiana , Nyoman ., Ahmad . Harjono, Hairunnisyah. Syaidu , Gunawan. 2016. Pengaruh model pembelajaran generatif berbantuan media laboratorium virtual terhadap penguasaan konsep. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*. 2(2) : 61 – 65.
- Sugiyono, Vani. 2016. *Mekanika kuantum*. Jakarta : CAPS (Center for Academic Publishing Service).
- Tipler, Paul A. 1991. *Physics for Scientist and Engineers*. California: Worth Publisher. Terjemahan oleh Soegijono. Bambang. 1996. *Fisika untuk Sains dan Tehnik*. Jakarta: Erlangga.
- Wiyatmo, Kusuma. 2003. *Fisika Modern*. Yogyakarta : Pustaka Belajar

## Lampiran A. Matriks penelitian

## Matrik Penelitian

NAMA : TUTUT WIDYAWATI

NIM : 150210102106

RG : 3

JUDUL	TUJUAN PENELITIAN	VARIABEL	DATA DAN TEKNIK PENGAMBILAN DATA	METODE PENELITIAN
METODE PHYTAGHORAS UNTUK MENYELESAIKAN PERSOALAN RELATIVITAS KHUSUS EINSTEIN	Penelitian ini bertujuan untuk menemukan sebuah pengaruh metode pythagoras terhadap persoalan – persoalan relativitas khusus Einstein. Persoalan – persoalan relativitas khusus Einstein tersebut yang berkaitan dengan persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu,	Variabel bebas : metode pythagoras variabel terikat : persamaan relativitas khusus Einstein, yaitu persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik. Variabel kontrol : Materi relativitas	Data : persamaan metode pythagoras yang sudah dikaitkan dengan persamaan relativitas khusus Einstein, yaitu persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik. Teknik pengambilan data : Melakukan perhitungan terhadap persamaan	1. Mengumpulkan dan membaca sumber yang berkaitan dengan relativitas khusus Einstein, khususnya persamaan – persamaan pada relativitas khusus Einstein. 2. Melakukan analisis

	<p>massa relativistik, serta energi relativistik.</p>	<p>husus Einstein.</p>	<p>relativitas khusus Einstein yaitu persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik sampai menemukan sebuah persamaan baru. Dan persamaan baru yang sudah didapat dari perhitungan tersebut dikaitkan dengan metode pythagoras</p>	<p>terhadap persamaan – persamaan relativitas khusus Einstein, yaitu persamaan kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, serta energi relativistik</p> <p>3. Melakukan perhitungan terhadap persamaan – persamaan relativitas khusus Einstein.</p> <p>4. Mengkaitkan hasil perhitungan terhadap persamaan relativitas khusus Einstein dengan metode pythagoras.</p>
--	---	------------------------	--	--

Menyetujui,

Dosen Pembimbing Utama

Drs. Bambang Supriadi, M.Sc

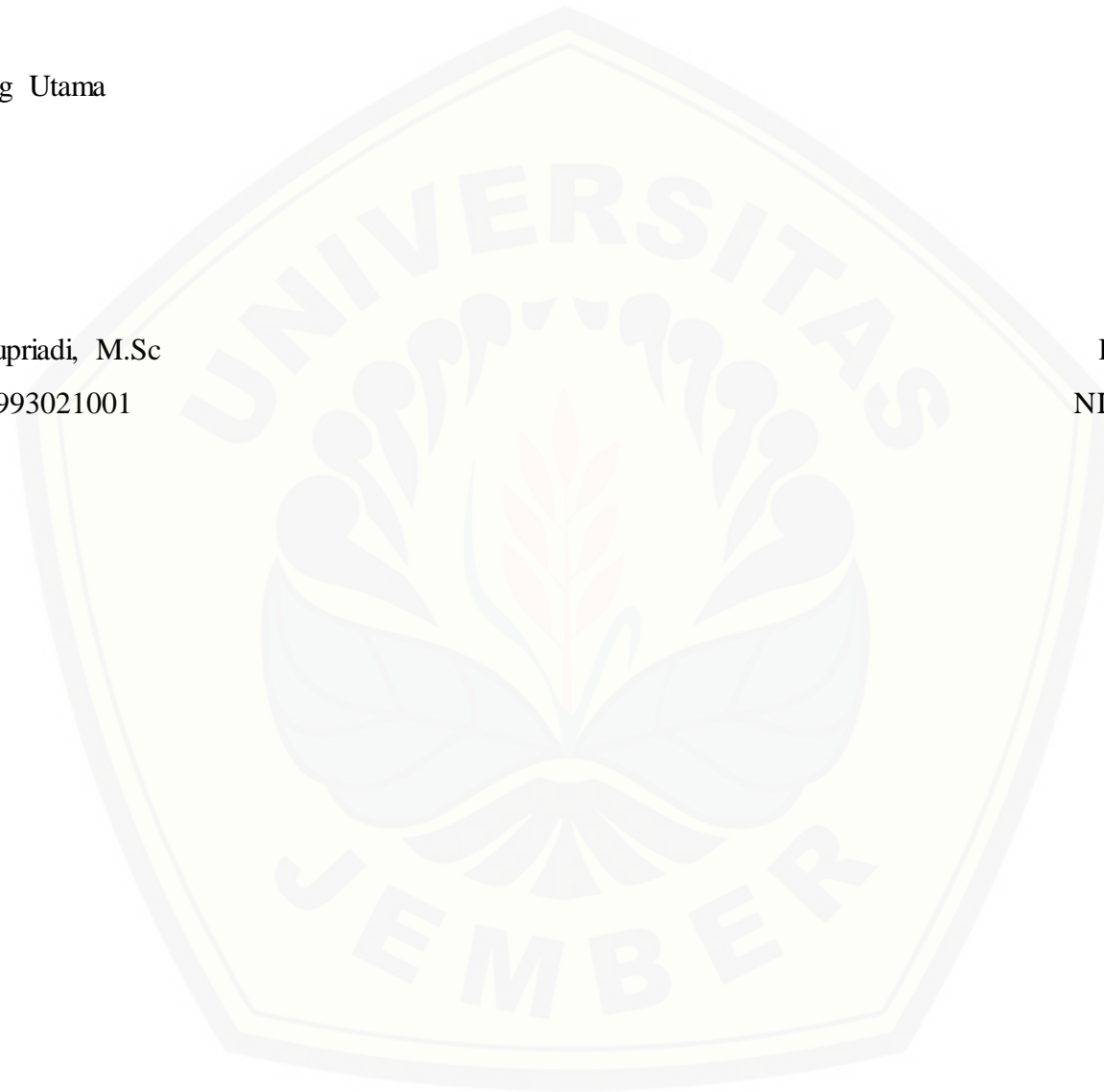
NIP. 196807101993021001

Menyetujui,

Dosen Pembimbing  
Anggota

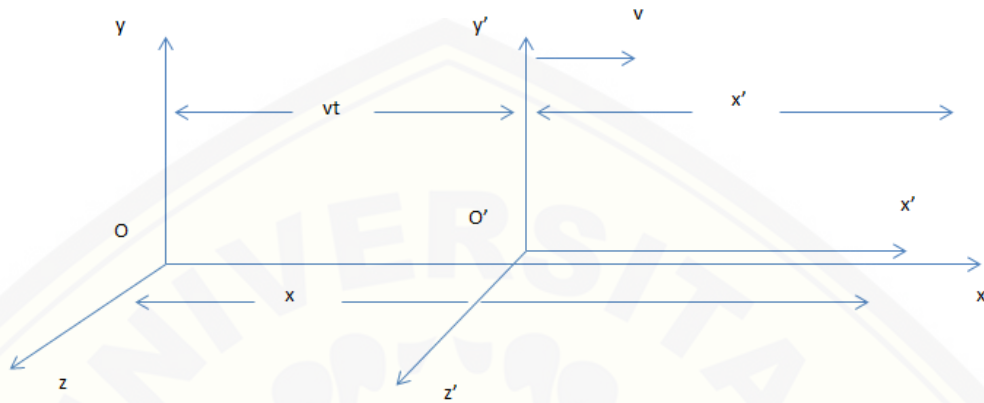
Drs. Alex Harijanto, M.Si

NIP. 196411171991031001



**Lampiran B.** Perhitungan untuk mendapatkan nilai  $\gamma$

**PERHITUNGAN UNTUK MENDAPATKAN NILAI  $\gamma$**



Dari transformasi Galilean diperoleh bahwa :

$$y' = y \quad z' = z$$

cahaya yang bergerak sebagai gelombang digambarkan oleh :

$$c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

persamaan tersebut juga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0$$

kecepatan cahaya dari seorang pengamat yang berada di F' adalah :

$$c^2 t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0$$

dan akan bernilai sama, sehingga

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2 t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$$

sebelumnya telah diketahui bahwa ,  $y' = y$  dan  $x' = x$ . sehingga

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2 t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$$

$$c^2 t^2 - x^2 = c^2 t'^2 - x'^2 \quad (2)$$

transformasi tersebut akan linear dengan,

$$\begin{aligned}x' &= Px + Qct \\ ct' &= Rx + Sct\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}x'^2 &= (Px + Qct)^2 \\ &= (Px + Qct)(Px + Qct) \\ &= p^2x^2 + PxQct + PxQct + Q^2c^2t^2 \\ &= p^2x^2 + 2PxQct + Q^2c^2t^2 \\ x'^2 &= p^2x^2 + 2PQctx + Q^2c^2t^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}ct'^2 &= (Rx + Sct)^2 \\ &= (Rx + Sct)(Rx + Sct) \\ &= R^2x^2 + RxSct + RxSct + S^2c^2t^2 \\ &= R^2x^2 + 2RxSct + S^2c^2t^2 \\ ct'^2 &= R^2x^2 + 2RSctx + S^2c^2t^2\end{aligned}$$

dari persamaan (3) dapat diperoleh bahwa :

$$\begin{aligned}ct'^2 - x'^2 &= R^2x^2 + 2RSctx + S^2c^2t^2 - \{p^2x^2 + 2PQctx + Q^2c^2t^2\} \\ &= 2RSctx - 2PQctx + R^2x^2 - p^2x^2 + S^2c^2t^2 - Q^2c^2t^2 \\ &= S^2c^2t^2 - Q^2c^2t^2 + R^2x^2 - p^2x^2 + 2RSctx - 2PQctx \\ ct'^2 - x'^2 &= c^2(S^2 - Q^2)t^2 - (P^2 - R^2)x^2 + 2(RS - PQ)ctx\end{aligned}$$

sisi kiri harus memiliki nilai yang sama seperti pada persamaan (2) , sehingga dari hal tersebut diperoleh,

$$RS - PQ = 0$$

$$RS = PQ$$

$$S^2 - Q^2 = 1$$

$$P^2 - R^2 = 1$$



Solusi dari persamaan hiperbolik adalah sebagai berikut :

$$\cos^2 \emptyset x - \sin^2 \emptyset y = 1$$

sehingga dari hal tersebut, dapat dibuat identifikasi berikut ini :

$$S = P = \cos \emptyset \tag{4}$$

$$x' = \cos \emptyset x + (-\sin \emptyset y)$$

$$= \cos \emptyset x - \sin \emptyset y$$

$$= x \cos \emptyset - y \sin \emptyset$$

$$y' = -\sin \emptyset x + \cos \emptyset y$$

$$= -x \sin \emptyset + y \cos \emptyset$$

Agar persamaan (3) memiliki bentuk yang serupa ,maka

$$Q = R = -\sinh \emptyset \tag{5}$$

Ketika  $x' = 0$  kita akan mendapatkan  $x = vt$ .

$$x' = Px + Qct$$

dengan menggunakan persamaan 3,4, dan 5 dapat diperoleh :

$$x' = 0 = \cosh \emptyset x + (-\sinh \emptyset ct)$$

$$= \cosh \emptyset x - \sinh \emptyset ct$$

$$= \cosh \emptyset vt - \sinh \emptyset ct$$

$$= t (\cosh \emptyset v - \sinh \emptyset c)$$

Sehingga diperoleh,

$$v \cosh \emptyset - c \sinh \emptyset = 0$$

$$v \cosh \emptyset = c \sinh \emptyset$$

$$\frac{v}{c} = \frac{\sinh \emptyset}{\cosh \emptyset}$$

$$\frac{v}{c} = \tanh \phi \quad (6)$$

Sebelumnya kita memiliki bahwa

$$x' = Px + Qct$$

sehingga,

$$x' = \cosh \phi x - \sinh \phi ct$$

$$ct' = Rx + Sct$$

$$ct' = -\sinh \phi x + \cosh \phi ct$$

$$ct' = -\sinh \phi x + \cosh \phi ct$$

$$= \cosh \phi \left( \frac{-\sinh \phi}{\cosh \phi} x + ct \right)$$

$$= \cosh \phi (-\tanh \phi x + ct)$$

$$= \cosh \phi (ct - \tanh \phi x)$$

$$= \cosh \phi \left( ct - \frac{v}{c} x \right)$$

$$ct' = \cosh \phi c \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

$$= c \cosh \phi \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

$$t' = \cosh \phi \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

$$x' = \cosh \phi x - \sinh \phi ct$$

$$= \cosh \phi \left( x - \frac{\sinh \phi}{\cosh \phi} ct \right)$$

$$= \cosh \phi (x - \tanh \phi ct)$$

$$= \cosh \phi \left( x - \frac{v}{c} ct \right)$$

$$x' = \cosh \phi (x - vt)$$

dengan menggunakan fungsi hiperbolik, maka akan didapatkan.

$$\cosh \phi = \frac{\cosh \phi}{1}$$

$$= \frac{\cosh \phi}{\sqrt{1}}$$

$$\cosh \phi = \frac{\cosh \phi}{\sqrt{\cosh^2 \phi - \sinh^2 \phi}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\cosh \phi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\cosh^2 \phi - \sinh^2 \phi}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\cosh^2 \phi} (\cosh^2 \phi - \sinh^2 \phi)}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{\cosh^2 \phi}{\cosh^2 \phi} - \frac{\sinh^2 \phi}{\cosh^2 \phi}}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - \tanh^2 \phi}}$$

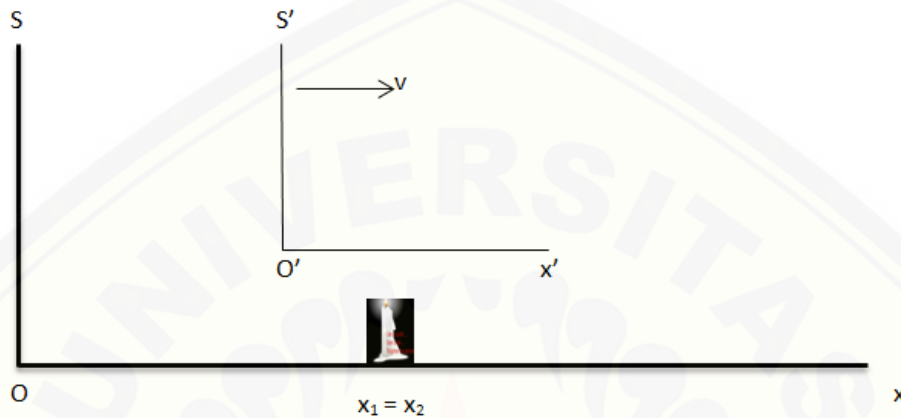
$$\cosh \phi = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

sehingga diperoleh bahwa :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7)$$

Lampiran C. Perhitungan untuk mendapatkan persamaan dilatasi waktu

**PERHITUNGAN UNTUK MENDAPATKAN PERSAMAAN DILATASI WAKTU**



Pengamat (s) : lilin yang berada dalam kerangka s tidak berubah posisinya terhadap waktu, maka  $x_1 = x_2$ . Pengamat (s') melihat kedua peristiwa terjadi pada saat  $t_1'$  dan  $t_2'$  di posisi yang berbeda. yaitu, pada  $x_1'$  dan  $x_2' \neq x_1'$ . Kedua hasil pengamatan dihubungkan dengan kaidah alih bentuk Lorentz.

$$t_1' = \gamma \left( t_1 - \frac{v}{c^2} x_1 \right)$$

$$t_2' = \gamma \left( t_2 - \frac{v}{c^2} x_2 \right)$$

$$t_2' - t_1' = \gamma \left( t_2 - \frac{v}{c^2} x_2 \right) - \gamma \left( t_1 - \frac{v}{c^2} x_1 \right)$$

$$t_2' - t_1' = \gamma \left( t_2 - \frac{v}{c^2} x_1 - t_1 + \frac{v}{c^2} x_2 \right)$$

$$t_2' - t_1' = \gamma (t_1 - t_2)$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

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

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

**Lampiran D.** Perhitungan Untuk Mendapatkan Persamaan Kontraksi Panjang

**PERHITUNGAN UNTUK MENDAPATKAN PERSAMAAN KONTRAKSI PANJANG**

Panjang yang terukur menurut pengamat yang diam adalah.

$$L_0 = v \cdot \Delta t$$

Penjang yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya adalah.

$$L = v \cdot \Delta t_0$$

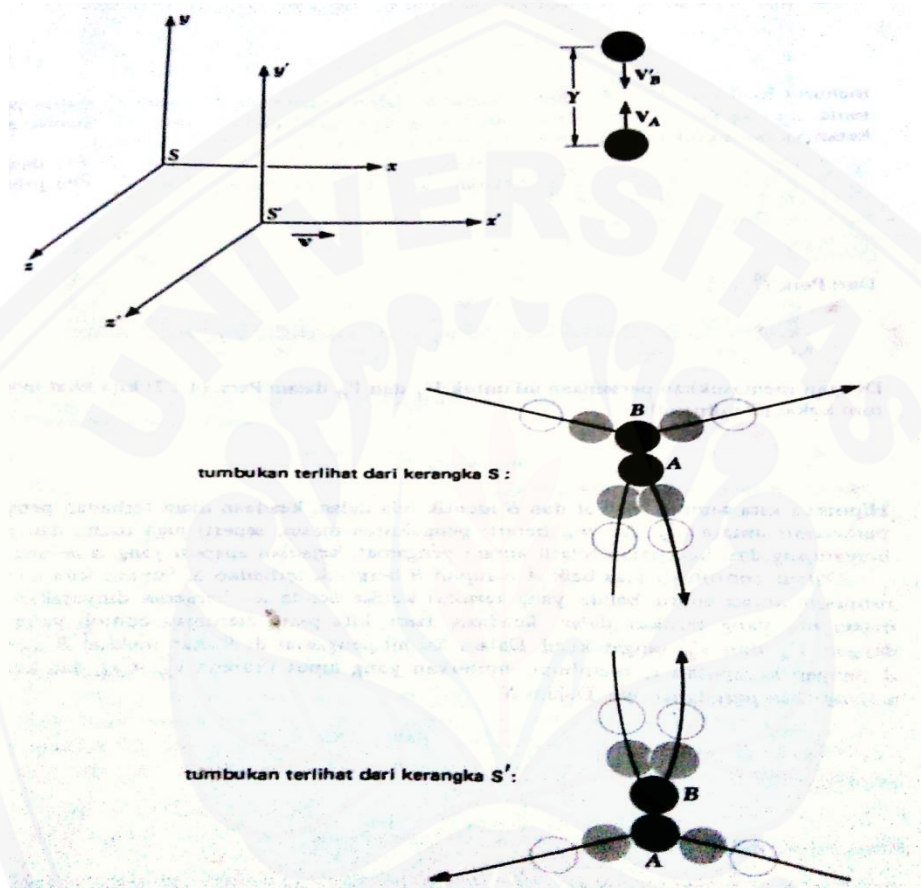
$$L = v \left( \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v}{c^2}} \right)$$

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

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

Lampiran E. Perhitungan untuk mendapatkan persamaan massa relativistik

**PERHITUNGAN UNTUK MENDAPATKAN PERSAMAAN MASSA RELATIVISTIK**



Tumbukan antar partikel

- Sebelum tumbukan, partikel A dan B dalam keadaan diam terhadap s dan B terhadap s'. Kemudian pada saat yang sama partikel A dilemparkan ke arah + y dengan kecepatan  $v_A$  . partikel B ke arah - y dengan kecepatan  $v'_B$ .  
 $v_A = v'_B$ .
- Ketika kedua partikel bertumbukan. Partikel A memantul ke arah -y dengan kecepatan  $v'_B$ .
- Jika kedua partikel dilemparkan dari kedudukan yang berjarak  $y$ , pengamat di s menemukan tumbukan berada di  $y = \frac{1}{2} Y$  sedangkan di sisi s'  $y' = \frac{1}{2} Y$



- Waktu pulang - pergi untuk partikel A di s

$$T_0 = \frac{Y}{v_A}$$

- Waktu pulang - pergi partikel B di s'

$$T_0 = \frac{Y}{v_B}$$

- Jika momentum kekal dalam kerangka s, harus berlaku bahwa

$$P_A = P_B$$

- Dalam kerangka s,  $v_B$  didapatkan dari

$$v_A = \frac{Y}{T_0}$$

$$v_B = \frac{Y}{T}$$

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Diketahui bahwa

$$v_B = \frac{Y}{T}$$

$$v_B = \frac{\frac{Y}{T_0}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$v_B = Y \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{T_0}$$

$$v_A = \frac{Y}{T_0}$$

- $P_A = P_B$

$$m_A v_A = m_B v_B$$

$$m_A \frac{Y}{T_0} = m_B Y \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{T_0}$$

$$m_A \frac{Y}{T_0} = m_B \frac{Y}{T_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

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

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

**Lampiran F.** Perhitungan massa dan energi untuk mendapatkan persamaan energi relativistik.

**PERHITUNGAN MASSA DAN ENERGI UNTUK  
MENDAPATKANKAN PERSAMAAN ENERGI RELATIVISTIK**

$$F = \frac{dp}{dt}$$

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

$$F = \frac{d(\gamma m_0 v)}{dt}$$

$$- F = \frac{d(mv)}{dt}$$

$$F = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}$$

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

$$F = m a$$

$$- K = \int_0^x F dx$$

$$K = \int_0^x \frac{d(mv)}{dt} dx$$

$$K = \int_0^x \frac{dx}{dt} d(mv)$$

$$K = \int_0^x v (\gamma m_0 v)$$

$$K = m_0 \int_0^x v (d\gamma v)$$

$$- d\gamma = d \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$d\gamma = \frac{v}{c^2} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{3}{2}} dv$$

$$- d(\gamma v) = \gamma dv + v d\gamma$$

$$d(\gamma v) = \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} dv + \frac{v^2}{c^2} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{3}{2}} dv$$

$$d(\gamma v) = \frac{dv}{\left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$- \lim_{\frac{v}{c} \ll 1} K = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

$$- \lim_{\frac{v}{c} \ll 1} K = m_0 c^2 \left( \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right)$$

$$\lim_{\frac{v}{c} \ll 1} K = m_0 c^2 \left( \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right) \cong \left[ \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right) - 1 \right]$$

$$\lim_{\frac{v}{c} \ll 1} K = \frac{1}{2} m_0 c^2$$

$$- K = \Delta m c^2$$

$$K = m c^2 - m_0 c^2$$

$$K = (m - m_0) c^2$$

$$- E = m c^2$$

$$= K + E_0$$

$$= \gamma m_0 c^2$$

$$= \gamma E_0$$

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**Lampiran G.** Perhitungan pada persamaan relativitas khusus Einstein untuk mendapatkan bentuk persamaan baru

**PERHITUNGAN PADA PERSAMAAN RELATIVITAS KHUSUS  
EINSTEIN UNTUK MENDAPATKAN BENTUK PERSAMAAN  
BARU**

❖ Persamaan Dilatasi Waktu

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

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

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

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

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

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

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

❖ Persamaan Kontraksi Panjang

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

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

$$\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 = \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2$$

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

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

❖ Persamaan Massa Relativistik

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

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

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

$$\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2 = \left(\frac{m_0}{m}\right)^2$$

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

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

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

## ❖ Persamaan Energi Relativistik

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = E_0$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{E_0}{E}$$

$$\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2 = \left(\frac{E_0}{E}\right)^2$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{E_0^2}{E^2}$$

$$1 = \frac{E_0^2}{E^2} + \frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{E_0^2}{E^2} + \frac{v^2}{c^2} = 1$$