

---

# Indonesian Physical Review

Volume 4 Issue 1, January 2021

P-ISSN: 2615-1278, E-ISSN: 2614-7904

---

## Gravitasi: Gaya vs. Geometri

Luh Putu Budi Yasmini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Pendidikan Fisika FMIPA, Universitas Pendidikan Ganesha, Indonesia.

E-mail: [budi.yasmini@undiksha.ac.id](mailto:budi.yasmini@undiksha.ac.id)

---

### INFO ARTIKEL

**Article History:**

Received: 26-12-2020

Revised: 22-01-2021

Accepted: 24-01-2021

**Kata Kunci :**

Gravitation, Force,  
Geometry

**Cara Sitasi :**

Yasmini, L P. B. (2021).

Gravitasi: Gaya vs.

Geometri. Indonesian

Physical Review, 4(1), 1-6

**DOI :**

[https://doi.org/10.29303/  
ipr.v4i1.69](https://doi.org/10.29303/ipr.v4i1.69)

### ABSTRAK

Perdebatan mengenai hakekat gravitasi masih banyak dibahas oleh para fisikawan hingga saat ini. Apakah gravitasi merupakan suatu medan gaya yang eksis dalam ruangwaktu atau suatu manifestasi geometri ruangwaktu. Di satu pihak, gravitasi dipandang sebagai suatu medan gaya yang dihasilkan oleh distribusi materi dan energi dalam ruang sebagai sumber medan tersebut. Di pihak lain, gravitasi dipandang sebagai manifestasi geometri ruangwaktu yang dibentuk oleh distribusi materi dan energi, dan sebaliknya, distribusi materi dan energi di dalam ruangwaktu dipengaruhi oleh geometri ruangwaktu itu. Salah dua dari banyak teori gravitasi yang ada, yakni: gravitasi Einstein dan gravitasi teleparalel. Dalam teori gravitasi Einstein, gravitasi dan inersia digabungkan menjadi satu entitas tunggal yang secara geometrik diidentifikasi dengan koneksi Levi-Civita. Sedangkan, dalam gravitasi teleparalel, gravitasi dan inersia terpisah dengan dua entitas yang berbeda dengan makna yang berbeda. Gravitasi dipandang sebagai medan gaya (interaksi) pada ruangwaktu, sedangkan inersia dipandang sebagai geometri ruangwaktu.

Copyright © 2021 IPR. All rights reserved.

---

### Pendahuluan

Salah satu gejala fisis atau kajian dalam fisika yang masih menjadi pembahasan para ilmuwan dalam memahami alam ini adalah gravitasi. Terdapat perdebatan panjang terkait dengan hakekat gravitasi, apakah gravitasi suatu medan gaya yang eksis dalam ruangwaktu atau suatu manifestasi geometri ruangwaktu [1]. Di satu pihak, gravitasi dipandang sebagai suatu medan gaya yang dihasilkan oleh distribusi materi dan energi dalam ruang sebagai sumber medan tersebut. Dalam pandangan ini, ruangwaktu dianggap sebagai latar yang tidak terpengaruh oleh semua proses fisis yang terjadi di dalamnya. Dua teori gravitasi yang sejalan dengan pandangan ini adalah teori gravitasi Newton dan gravitasi teleparalel [1-3]. Dalam kedua teori gravitasi tersebut, gravitasi dipandang sebagai suatu interaksi yang tidak mempengaruhi geometri ruangwaktu, yang berarti bahwa geometri ruangwaktu telah terbentuk sebelum interaksi tersebut ditinjau. Di pihak lain, gravitasi dipandang sebagai manifestasi geometri ruangwaktu yang dibentuk oleh distribusi materi dan energi, dan

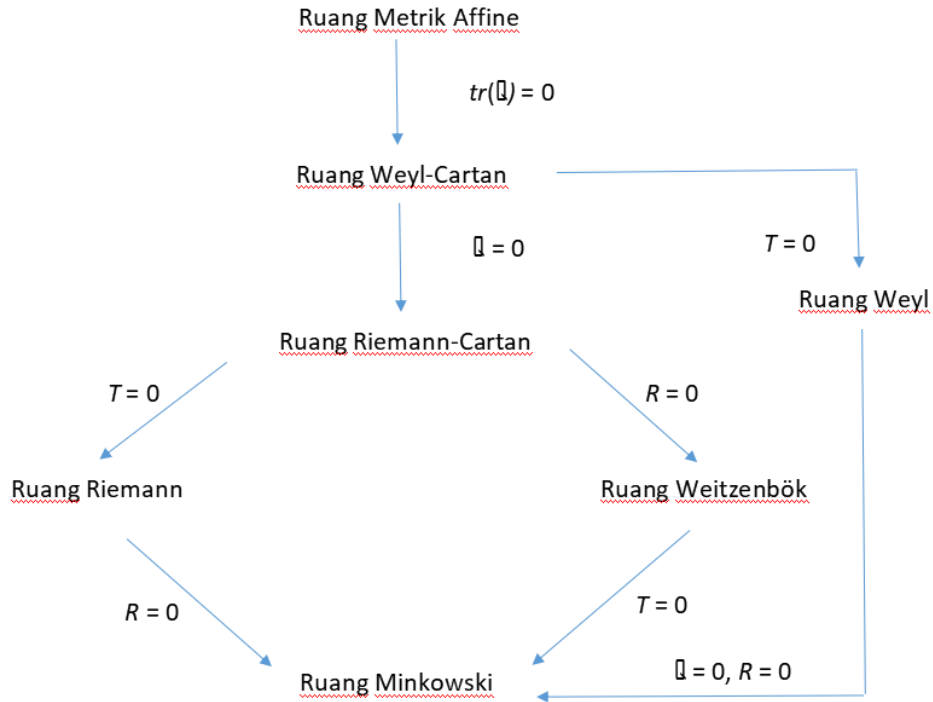
sebaliknya, distribusi materi dan energi di dalam ruangwaktu dipengaruhi oleh geometri ruangwaktu itu. Akan tetapi, ruangwaktu bagi pandangan ini tidak dapat ada secara bebas, tetapi ditentukan oleh proses fisis yang ada di dalamnya. Dua teori gravitasi yang ada pada posisi ini adalah teori gravitasi Newton-Cartan dan gravitasi Einstein [1,4]. Dalam pandangan dua teori gravitasi tersebut, gravitasi sangat terkait dengan geometri ruangwaktu atau lebih tegasnya, gravitasi adalah perwujudan geometri ruangwaktu. Selanjutnya, dalam artikel ini akan ditinjau kembali mengenai pengklasifikasian teori-teori gravitasi, teori gravitasi Einstein yang merupakan suatu teori yang memandang bahwa gravitasi sebagai suatu manifestasi geometri, dan gravitasi teleparallel yang merupakan suatu teori yang memandang gravitasi sebagai medan gaya.

### **Pengklasifikasian Teori-teori Gravitasi**

Pembahasan teori gravitasi selalu terkait dengan asumsi dasar konsep alamiah bagi ruang dan waktu, serta pandangan tentang hakekat gravitasi itu sendiri. Asumsi dasar konsep alamiah bagi ruang dan waktu berimplikasi pada cara (paradigma) kita memandang gravitasi itu sendiri.

Ruang dipahami sebagai suatu himpunan sekelumit tempat-tempat, yakni posisi-posisi tempat benda-benda mungkin dapat diletakkan yang selanjutnya disebut titik-titik pada ruang [5]. Selanjutnya, jika ruang dan waktu ditulis sebagai ruangwaktu, maka titik-titik dalam ruangwaktu tidak lagi hanya dapat dipahami sebagai posisi atau letak benda pada ruang, tetapi dalam waktu juga. Sehingga ruangwaktu dapat dipahami sebagai suatu himpunan peristiwa-peristiwa (*events*) yang tersusun menjadi suatu kesatuan [6]. Ruangwaktu dalam teori-teori gravitasi adalah keragaman (*manifold*) diferensiabel berdimensi-4 yang untuk setiap keragaman tersebut dilengkapi dengan dua objek matematika, yakni suatu koneksi dan suatu tensor metrik yang dibekalkan pada setiap keragaman tersebut. Kedua objek matematis tersebut menentukan kuantitas-kuantitas geometris bagi ruangwaktu. Objek-objek geometris lainnya yang secara umum diperoleh dari koneksi adalah *non-metricity* (Q), kelengkungan (R), torsi (T), dan kontorsi (K). Teori-teori gravitasi diklasifikasikan berdasarkan pemilihan koneksi dan tensor metrik untuk ruangwaktu terkait [3,7] sebagaimana pada Gambar 1.

Kategori teori-teori gravitasi paling umum terdiri atas semua teori gravitasi dengan ruangwaktu dikonstruksi dari keragaman-keragaman yang dilengkapi dengan koneksi dan tensor metrik affine dengan semua objek-objek geometris tersebut tidak lenyap. Ruangwaktu itu disebut ruangwaktu metrik-affine dan teori-teori gravitasi yang terkait disebut sebagai teori-teori gravitasimetrik-affine. Kategori teori-teori gravitasi selanjutnya berisikan teori-teori gravitasi Poincaré, yakni semua teori-teori gravitasi metrik-affine dengan ruangwaktu dikonstruksi dari keragaman-keragaman yang dilengkapi dengan *non-metricity* yang lenyap (Q=0).



Gambar 1. Klasifikasi Teori Gravitasi (diadaptasi dari [3,7])

### Gravitasi Newton

Dalam tinjauan fisika klasik, gravitasi dipandang sebagai suatu interaksi yang selanjutnya disebut sebagai teori gravitasi Newton. Dalam kinematika Newtonian [6,8], partikel bergerak pada suatu ruang Euclidean berdimensi-3. Vektor posisi dengan panjang yang berhingga dapat diletakkan dimanapun dalam ruang yang terkait dengan pemilihan titik acuan. Dalam teori gravitasi ini, waktu bersifat universal dan absolut, bila seorang pengamat yang mengamati bahwa dua peristiwa atau lebih terjadi secara bersamaan, maka semua pengamat akan mengamati hal yang sama. Gravitasi dipandang sebagai salah satu medan gaya (interaksi) di alam. Konsep medan gaya muncul Ketika suatu benda bekerja pada benda lainnya, sehingga mengalami dua kemungkinan perubahan yakni: bentuk atau gerakannya. Massa ( $m$ ) dalam teori gravitasi Newton berperan sebagai sumber medan gravitasional,

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{e}_r, \tag{1}$$

dengan  $G$  adalah konstanta gravitasional Newtonian.

Peninjauan gravitasi sebagai suatu teori medan dapat digambarkan oleh persamaan gravitasi Newton yang dinyatakan sebagai:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g} = -m\nabla\Phi, \tag{2}$$

dengan  $g$  adalah medan gravitasional,  $m$  adalah massa gravitasional partikel uji, dan  $\Phi$  adalah potensial gravitasi di tempat partikel uji berada. Potensial gravitasi ditentukan dengan persamaan Poisson, yakni

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho, \quad (3)$$

dengan  $\rho$  adalah kerapatan materi gravitasi.

### Gravitasi Einstein

Pada artikel ini, teori gravitasi Einstein yang dimaksud adalah teori relativitas umum Einstein merujuk pada [6,8]. Teori gravitasi Einstein dibangun berdasarkan beberapa prinsip ekuivalensi, yakni: (i) prinsip ekuivalensi lemah bahwa semua benda yang merasakan medan gravitasional mengalami gerak yang sama; (ii) prinsip ekuivalensi Einstein, yakni tidak dapat dipisahkan antara inersia dan gravitasi; dan (iii) prinsip kovariansi umum bahwa semua hukum fisika kovarian atau tidak berubah terhadap transformasi koordinat.

Persamaan medan Einstein yang merupakan persamaan dinamika medan gravitasi diturunkan melalui prinsip variasional dengan fungsional berupa aksi Hilbert-Einstein, yakni

$$S_{GE} = \int \sqrt{-g}R d^4x, \quad (4)$$

dan rapat Lagrangian bagi gravitasi Einstein diberikan oleh

$$L_{GE} = \sqrt{-g}R, \quad (5)$$

dengan  $R$  adalah kelengkungan skalar terkait tensor Ricci, kelengkungan Riemann, dan tensor metrik ruangwaktu.

Dalam relativitas umum, potensial gravitasi dinyatakan dalam tensor Einstein

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R, \quad (6)$$

Sedangkan sumber gravitasi dinyatakan sebagai objek yang lebih umum yang disebut tensor energi-momentum  $T_{\mu\nu}$ . Kasus khusus untuk fluida ideal dapat dinyatakan sebagai

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + g_{\mu\nu}p, \quad (7)$$

dengan  $g_{\mu\nu}$  terkait dengan metrik ruangwaktu. Persamaan medan Einstein dapat dituliskan

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}. \quad (8)$$

Berdasarkan Pers. (8), gravitasi terkait dengan geometri ruangwaktu. Geometri ruangwaktu digambarkan oleh ruas kiri Pers. (8) yakni tensor Einstein yang di dalamnya termuat tensor metrik  $g_{\mu\nu}$  dan koneksi yang dipilih  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$ , serta turunan-turunan kedua objek-objek matematik tersebut. Sementara, materi dan energi digambarkan oleh ruas kanan dengan tensor energi-momentum.

Sebagian besar fisikawan memahami bahwa gravitasi Einstein menggeometrikan gravitasi atau mereduksi gravitasi menjadi sebagai geometri, sehingga geometri ruangwaktu yang terkait adalah geometri semi-Riemannian. Dalam teori gravitasi Einstein, gravitasi dan inersia digabungkan menjadi satu entitas tunggal yang secara geometrik diidentifikasi dengan koneksi Levi-Civita.

### Gravitasi Teleperallel

Gravitasi teleparallel merupakan salah satu teori gravitasi yang membawa teori gravitasi Einstein ke dalam skenario tera (grup tera translasi). Seperti teori gravitasi lainnya, geometri bagi gravitasi teleparallel adalah untingan singgung ( $TQ$ ) bagi suatu keragaman dasar (ruangwaktu)  $Q$ , dengan untuk setiap  $p \in Q$  disematkan ruang singgung  $T_pQ$ . Ruang singgung  $T_pQ$  untuk setiap  $p \in Q$  dilengkapi dengan metrik Minkowski [2]. Koneksi bagi ruangwaktu pada gravitasi teleparallel adalah suatu koneksi Weitzenböck  $(\Gamma_{\mu\nu}^\lambda)_{Wz}$ . Koneksi ini merupakan suatu koneksi yang memiliki kelengkungan sama dengan nol dan torsi tidak sama dengan nol, yang merupakan koneksi metrik relatif terhadap metrik yang dikonstruksi dari tetrad. Secara umum, suatu koneksi Weitzenböck dibangun dari medan tetrad  $(e_a^\mu)$  dan suatu koneksi spin  $\omega_{ab}^c$  [9].

Kesetaraan antara gravitasi teleparallel dan gravitasi Einstein dapat dilihat berdasarkan kesamaan bentuk aksi kedua teori gravitasi tersebut yang berbeda hanya pada suku permukaan. Rapat Lagrangian bagi gravitasi teleparallel [2,9] dapat dinyatakan sebagai

$$L = \frac{e}{2\kappa} \left( \frac{1}{4} T_{\mu\nu}^\rho T_\rho^{\mu\nu} + \frac{1}{2} T_{\mu\nu}^\rho T_\rho^{\nu\mu} - T_{\mu\rho}^\nu T_\nu^{\mu\rho} \right), \quad (9)$$

dengan  $\kappa = 8\pi G$  dan  $T_{\mu\nu}^\rho$  adalah tensor torsi.

Semangat awal perumusan gravitasi teleparallel adalah untuk membawa gravitasi sebagai suatu interaksi tera (gravitasi dipandang sebagai suatu medan gaya). Geometri ruangwaktu bagi gravitasi teleparallel adalah geometri Weitzenböck dengan koneksi Weitzenböck. Dalam gravitasi teleparallel, gravitasi dan inersia terpisah dengan dua entitas yang berbeda dengan makna yang berbeda. Gravitasi dipandang sebagai medan gaya (interaksi) pada ruangwaktu, sedangkan inersia dipandang sebagai geometri ruangwaktu.

### Simpulan

Berdasarkan uraian tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa pembahasan teori gravitasi selalu terkait dengan asumsi dasar konsep alamiah bagi ruang dan waktu, serta pandangan tentang hakekat gravitasi itu sendiri. Asumsi dasar konsep alamiah bagi ruang dan waktu berimplikasi pada cara (paradigma) kita memandang gravitasi itu sendiri. Salah dua dari banyak teori gravitasi yang ada, yakni: gravitasi Einstein dan gravitasi teleparallel. Gravitasi Einstein menggeometrikan gravitasi atau mereduksi gravitasi menjadi sebagai geometri, sehingga geometri ruangwaktu yang terkait adalah geometri semi-Riemannian. Dalam teori gravitasi Einstein, gravitasi dan inersia digabungkan menjadi satu entitas tunggal yang secara geometrik diidentifikasi dengan koneksi Levi-Civita. Sedangkan, geometri

ruangwaktu bagi gravitasi teleparallel adalah geometri Weitzenböck dengan koneksi Weitzenböck. Dalam gravitasi teleparallel, gravitasi dan inersia terpisah dengan dua entitas yang berbeda dengan makna yang berbeda. Gravitasi dipandang sebagai medan gaya (interaksi) pada ruangwaktu, sedangkan inersia dipandang sebagai geometri ruangwaktu.

### Daftar Pustaka

- [1] E. Knox. (2011). Newton-Cartan Theory and Teleparallel Gravity: The Force of a Formulation. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **42**, 264-275.
- [2] R. Aldrovandi dan J. G. Pereira. (2013). Teleparallel Gravity: An Introduction. New York: Springer.
- [3] K. Hayashi dan T. Shirafuji. (1979). New General Relativity. *Physical Review D* **19**(12), 3524-3553.
- [4] J. Garecki. (2010). Teleparallel Equivalent of General Relativity: A Critical Review. *arXiv:1010.2654v3[gr-qc]*.
- [5] J. O. Weatherall. (2017). Classical Spacetime Structure. *arXiv: 1707.05887v1[physics.hist-ph]*.
- [6] R. Wald. (1984). General Relativity. Chicago: The University of Chicago Press.
- [7] M. A. Wright. (2017). Teleparallel Gravity and Its Modifications. PhD thesis, Department of Mathematics, University College London.
- [8] O. Gron dan A. Næss. (2011). Einstein's Theory: A Rigorous Introduction for the Mathematically Untrained. London: Springer.
- [9] A. Sousa, J. Moura, dan R. Pereira. (2010). Energy in an Expanding Universe in the Teleparallel Geometry. *Brazilian Journal of Physics* **40**(1).