

\Transformasi Pemikiran Einstein 1905-1921 dalam Relativitas dan Nobel Fisika

Veno Pebrian

Jurusan Pendidikan Sejarah
Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik
Universitas Negeri Surabaya
Email: 25040284035@mhs.unesa.ac.id

Nabil Achilla Yusuf

Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada
Email: nabilachillayusuf@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian ini secara mendalam membahas transformasi pemikiran Albert Einstein pada periode antara tahun 1905 hingga tahun 1921, yakni sejak publikasi *annus mirabilis* yang revolusioner hingga mendapatkan pengakuan prestisius berupa Penghargaan Nobel Fisika. Masalah utama yang diangkat dalam riset ini adalah bagaimana proses perubahan orientasi konseptual Einstein berlangsung; mulai dari kritiknya yang tajam terhadap konsep ruang-waktu klasik Newtonian, perumusan teori relativitas khusus, perluasan prinsip relativitas untuk mencakup fenomena gravitasi umum, hingga pengakuan institusional yang secara paradoks justru diberikan melalui penemuannya tentang hukum efek fotolistrik. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif historis dengan strategi studi pustaka yang komprehensif. Metodologi yang diterapkan secara ketat mencakup kritik sumber, periodisasi gagasan, dan interpretasi sejarah intelektual. Pengumpulan data utama bersumber dari karya primer Einstein tahun 1905, 1907, 1911, 1915, dan 1916, beserta dokumen resmi panitia Nobel. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari literatur kajian sejarah sains dan pendidikan sains mutakhir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi pemikiran Einstein tidak bersifat linear. Perjalanan intelektualnya bergerak secara dinamis melalui empat tahapan utama: perumusan prinsip dasar, operasionalisasi konsep teoretis, geometrisasi medan gravitasi, dan negosiasi pengakuan ilmiah. Pemberian Nobel Fisika 1921 memperlihatkan sebuah paradoks historis: meskipun Einstein secara luas diakui sebagai simbol relativitas, ia secara resmi dihargai atas kontribusinya pada hukum efek fotolistrik. Kesimpulannya, evolusi pemikiran Einstein periode 1905-1921 terbukti tidak hanya mencerminkan perubahan paradigma dalam sains fisika modern, tetapi juga memotret dinamika sosial dari sebuah pengakuan ilmiah.

Kata kunci: Albert Einstein; relativitas; efek fotolistrik; Nobel Fisika; sejarah sains

Abstract

*This study examines in depth the transformation of Albert Einstein's thought between 1905 and 1921, from the publication of his revolutionary *annus mirabilis* to his prestigious recognition in the form of the Nobel Prize in Physics. The main problem raised in this research is how the process of change in Einstein's conceptual orientation took place; starting from his sharp criticism of the classical Newtonian concept of space-time, the formulation of the special theory of relativity, the extension of the principle of relativity to encompass the phenomenon of general gravity, to the institutional recognition that paradoxically came through his discovery of the law of the photoelectric effect. To address this issue, this study uses a historical qualitative approach with a comprehensive literature study strategy. The methodology applied rigorously includes source criticism, periodization of ideas, and interpretation of intellectual history. Primary data collection comes from Einstein's primary works from 1905, 1907, 1911, 1915, and 1916, along with official documents of the Nobel committee. Meanwhile, secondary data is obtained from the literature on the history of science and recent science education. The results of the study indicate that the transformation of Einstein's thought was not linear. His intellectual journey dynamically progressed through four main stages: the formulation of fundamental principles, the operationalization of theoretical concepts, the geometrization of the gravitational field, and the negotiation of scientific recognition. The award of the 1921 Nobel Prize in Physics presents a historical paradox: although Einstein is widely recognized as the symbol of relativity, he was officially recognized for his contributions to the law of the photoelectric effect. In conclusion, the evolution of Einstein's thought from 1905 to 1921 proves not only to reflect a paradigm shift in modern physics but also to capture the social dynamics of scientific recognition.*

Keywords: Albert Einstein; relativity; photoelectric effect; Nobel Prize in Physics; history of science

PENDAHULUAN

Sejarah pemikiran Albert Einstein pada awal abad ke-20 tidak dapat dipahami hanya sebagai kisah seorang jenius yang menemukan rumus-rumus besar secara tiba-tiba. Di balik reputasi populer itu terdapat proses intelektual yang panjang, penuh revisi, dan berlangsung di tengah krisis konseptual fisika klasik. Periode 1905-1921 menjadi rentang yang sangat penting karena di dalamnya Einstein bergerak dari pegawai kantor paten yang menulis makalah-makalah radikal menuju ilmuwan dunia yang memperoleh Nobel Fisika. Namun, pengakuan Nobel tersebut menyimpan paradoks historis: publik mengenalnya terutama karena relativitas, sedangkan penghargaan resmi Nobel diberikan atas jasa teoretisnya, khususnya penemuan hukum efek fotolistrik.¹ Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengkaji teori, tetapi juga menempatkan pemikiran ilmiah dalam jaringan bukti, komunitas, reputasi, dan institusi penghargaan.

Tahun 1905 sering disebut *annus mirabilis* karena pada tahun itu Einstein menerbitkan beberapa karya yang mengubah wajah fisika modern. Makalah tentang kuanta cahaya memberi dasar baru bagi penjelasan efek fotolistrik, makalah tentang gerak Brown memperkuat status atom dan molekul, makalah tentang elektrodinamika benda bergerak merumuskan relativitas khusus, sedangkan makalah tentang kesetaraan massa-energi membuka jalan bagi pemahaman baru mengenai energi dan materi.² Keempat karya tersebut menunjukkan bahwa pemikiran Einstein tidak bergerak dalam satu bidang tunggal. Ia membongkar cara fisika klasik memahami cahaya, materi, ruang, waktu, dan energi melalui serangkaian intervensi konseptual yang saling berkaitan. Karena itu, pemikiran Einstein perlu dibaca sebagai transformasi epistemik, bukan sekadar akumulasi penemuan.

Dalam konteks pendidikan sejarah, kajian ini relevan karena sejarah sains sering diajarkan sebagai daftar tokoh, tahun, dan temuan. Pola demikian membuat siswa atau mahasiswa mudah mengingat nama Einstein, tetapi kurang memahami proses historis yang melahirkan relativitas dan pengakuan Nobel. Padahal, riwayat pemikiran Einstein menyediakan contoh kuat tentang bagaimana ilmu berubah melalui problem, perdebatan, instrumen, komunitas, bukti, dan kebijakan institusional. Dengan menempatkan Einstein sebagai objek sejarah intelektual, penelitian ini berupaya menunjukkan bahwa teori ilmiah tidak muncul dalam ruang kosong. Teori lahir dari kerja interpretatif terhadap masalah yang diwariskan, keberanian mengganti asumsi dasar, dan kemampuan mempertahankan konsekuensi logis di hadapan komunitas ilmiah.

Penelitian-penelitian terdahulu telah membahas Einstein dari berbagai sudut. Sebagian kajian menekankan

aspek fisika teoretis, terutama struktur relativitas khusus dan relativitas umum. Sebagian lain mengkaji konteks historis, misalnya relasi Einstein dengan Lorentz, Poincare, Minkowski, Grossmann, Hilbert, Dyson, dan Eddington. Kajian mutakhir oleh Darrigol menekankan perlunya kehati-hatian terhadap narasi autobiografis Einstein tentang lahirnya relativitas khusus, sedangkan kajian naratologi sains melihat teks ilmiah Einstein sebagai bentuk argumentasi yang memiliki strategi retorik dan epistemik.³ Artinya, sejarah Einstein tidak lagi cukup ditulis sebagai cerita linear dari inspirasi menuju kebenaran. Ia harus dibaca sebagai proses yang melibatkan pembentukan masalah, pilihan bahasa, konfigurasi bukti, dan pembingkai ulang konsep.

Selain itu, perkembangan studi sejarah relativitas menunjukkan bahwa penemuan Einstein merupakan gabungan antara kontinuitas dan disrupsi. Ia tidak menciptakan relativitas dari ketiadaan, sebab diskusi tentang elektrodinamika benda bergerak, eter, transformasi Lorentz, sinkronisasi waktu, dan eksperimen Michelson-Morley telah menjadi perdebatan sebelum 1905. Namun, keunikan Einstein terletak pada keberanian epistemologis untuk memperlakukan prinsip relativitas dan konstansi kecepatan cahaya sebagai dasar, lalu menurunkan konsekuensi kinematisnya tanpa mempertahankan eter sebagai medium mutlak.⁴ Di titik ini, transformasi pemikiran Einstein menjadi penting: ia tidak hanya menyelesaikan teka-teki teknis, tetapi mengubah perangkat konseptual untuk memahami ruang dan waktu.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: bagaimana transformasi pemikiran Albert Einstein pada tahun 1905-1921 dalam perumusan teori relativitas dan pengakuan Nobel Fisika? Rumusan tersebut dijabarkan ke dalam tiga pertanyaan turunan. Pertama, bagaimana fase 1905 membentuk dasar pemikiran Einstein tentang cahaya, atom, ruang, waktu, dan energi? Kedua, bagaimana pemikiran itu berkembang menuju relativitas umum melalui prinsip ekuivalensi, geometri gravitasi, dan persamaan medan tahun 1915? Ketiga, mengapa pengakuan Nobel Fisika 1921 diberikan bukan untuk relativitas, melainkan untuk efek fotolistrik, dan apa maknanya bagi sejarah penerimaan pemikiran Einstein?

Tujuan penelitian adalah mendeskripsikan secara analitis transformasi pemikiran Einstein pada periode 1905-1921, terutama dalam kaitannya dengan relativitas khusus, relativitas umum, dan pengakuan Nobel Fisika. Penelitian ini tidak menguji hipotesis kuantitatif, tetapi bekerja dengan proposisi kualitatif bahwa perubahan pemikiran Einstein bersifat bertahap, problematis, dan historis. Dengan kata

1 Nobel Prize Outreach. (2026). The Nobel Prize in Physics 1921. NobelPrize.org; lihat juga keterangan bahwa Einstein menerima hadiah 1921 pada 1922 dan penghargaan itu secara eksplisit dikaitkan dengan hukum efek fotolistrik.

2 Library of Congress. (2026). The 1905 papers - Annus mirabilis of Albert Einstein; Einstein, A. (1905a). On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light; Einstein, A.

(1905c). On the electrodynamics of moving bodies.

3 Darrigol, O. (2021). Can we trust Einstein's accounts of the genesis of special relativity? *Studies in History and Philosophy of Science*, 89, 138-154; Heydenreich, A. (2021). Epistemic narrativity in Albert Einstein's treatise on special relativity.

4 Kuhn, T. S. (2012). *The structure of scientific revolutions* (50th anniversary ed.); Renn, J. (2007). *The genesis of general relativity*.

lain, transformasi tersebut tidak hanya terdiri atas perubahan ide fisika, melainkan juga perubahan cara Einstein memandang konsep ilmiah, metode teori, hubungan matematika-fisika, bukti empiris, serta legitimasi ilmiah.

Kerangka teori yang digunakan adalah sejarah intelektual dan sejarah ilmu. Sejarah intelektual memandang gagasan sebagai produk yang memiliki konteks, bahasa, aktor, dan medan perdebatan. Sementara itu, sejarah ilmu membantu membaca transformasi teori sebagai perubahan paradigma, perubahan perangkat konseptual, dan proses stabilisasi pengetahuan. Konsep revolusi ilmiah Kuhn digunakan secara selektif untuk memahami pergeseran dari kerangka Newtonian menuju relativitas, tetapi penelitian ini tidak menyederhanakan kasus Einstein sebagai pergantian paradigma yang tiba-tiba. Sebaliknya, penelitian ini mengikuti pandangan historiografi baru yang melihat perubahan sains sebagai kerja bertahap, sering kali melalui krisis lokal, alat matematika, argumentasi, dan negosiasi sosial.⁵

Kontribusi penelitian ini terletak pada upaya menghubungkan dua hal yang sering dipisahkan: perkembangan internal pemikiran Einstein dan dinamika eksternal pengakuan Nobel. Banyak tulisan populer menyatakan bahwa Einstein memenangkan Nobel karena relativitas, sementara sebagian tulisan akademik menekankan bahwa ia menang karena efek fotolistrik. Penelitian ini mengambil posisi di antara keduanya: Nobel 1921 bukan sekadar anomali atau kesalahan populer, tetapi penanda bahwa reputasi ilmiah Einstein dibentuk melalui ketegangan antara keberanian teori dan kehati-hatian institusi. Dengan demikian, studi ini memberi pemahaman lebih utuh bagi kajian sejarah sains dan pendidikan sejarah, yaitu bahwa pemikiran ilmiah perlu dibaca bersama sejarah penerimaan dan legitimasi sosialnya.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penekanan terhadap istilah transformasi, bukan sekadar perkembangan. Perkembangan dapat memberi kesan bahwa pemikiran Einstein bergerak secara alami dari satu temuan menuju temuan berikutnya. Transformasi, sebaliknya, menekankan adanya perubahan cara memandang masalah. Dari sudut ini, tahun 1905 bukan hanya awal relativitas khusus, melainkan momen ketika Einstein mulai menata ulang konsep fisika melalui prinsip, operasionalisasi, dan keberanian meninggalkan entitas yang tidak diperlukan. Tahun 1915 bukan sekadar titik lahir persamaan medan, melainkan momen ketika persoalan gravitasi diselesaikan melalui sintesis antara intuisi fisik dan geometri. Tahun 1921 bukan sekadar penghargaan, melainkan momen ketika institusi ilmiah memilih cara tertentu untuk mengakui teori yang telah mengubah lanskap sains modern.⁶

Literatur historiografi juga memperlihatkan bahwa

narasi Einstein sering berada di antara dua ekstrem. Ekstrem pertama adalah narasi heroik yang menempatkan Einstein sebagai pencipta tunggal yang melampaui zamannya tanpa ketergantungan pada tradisi sebelumnya. Ekstrem kedua adalah narasi reduksionis yang menilai relativitas sebagai hasil nyaris lengkap dari Lorentz dan Poincare sehingga peran Einstein dianggap hanya merumuskan ulang. Penelitian ini mengambil posisi moderat: Einstein bekerja dalam problem yang sudah dibentuk oleh fisika abad ke-19, tetapi ia melakukan reorganisasi konseptual yang menentukan. Perubahan itu tampak dalam cara ia menafsirkan waktu, menolak eter, menyusun postulat, dan memandang gravitasi sebagai persoalan struktur ruang-waktu.⁷

Dalam kerangka pendidikan sejarah, posisi moderat tersebut penting karena membantu menghindari kultus tokoh. Einstein dapat tetap ditempatkan sebagai figur sentral tanpa memusnahkannya dari jaringan sejarah. Mahasiswa dapat melihat bahwa Lorentz, Poincare, Minkowski, Grossmann, Hilbert, Dyson, Eddington, dan komunitas Nobel memiliki peran berbeda dalam pembentukan dan pengakuan teori. Dengan demikian, sejarah pemikiran Einstein menjadi contoh bagaimana sejarah intelektual bekerja pada level individu dan kolektif sekaligus. Tokoh penting, tetapi tokoh selalu berada di dalam percakapan, tradisi, lembaga, dan standar bukti yang membentuk kemungkinan berpikir pada zamannya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan strategi penelitian historis. Pendekatan kualitatif dipilih karena objek penelitian berupa teks, gagasan, konteks, dan proses perubahan pemikiran, bukan data numerik. Strategi historis digunakan untuk menyusun kronologi, membandingkan sumber, serta menafsirkan perubahan konsep dalam rentang 1905-1921. Fokus penelitian bukan pada pembuktian matematis relativitas, melainkan pada transformasi pemikiran Einstein sebagai fenomena sejarah intelektual. Oleh karena itu, istilah, makalah, surat, pidato, dan penilaian institusional dibaca sebagai jejak historis yang menunjukkan bagaimana konsep dibangun dan diterima.⁸

Subjek kajian adalah Albert Einstein sebagai aktor intelektual, sedangkan objek kajian adalah transformasi pemikirannya dalam perumusan relativitas dan pengakuan Nobel Fisika. Karena penelitian ini merupakan studi pustaka historis, tidak digunakan responden atau narasumber lapangan. Unit analisisnya adalah sumber tertulis yang memenuhi kriteria relevansi, otoritas, dan keterlacakan. Sumber primer mencakup karya-karya Einstein tahun 1905

⁵ Einstein, A. (1905a). On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.

⁶ Staley, R. (2008). Einstein's generation: The origins of the relativity revolution; Miller, A. I. (1981). *Albert Einstein's special theory of*

relativity.

⁷ Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*; Stachel, J. (2002). *Einstein from B to Z*.

⁸ Kuntowijoyo. *Pengantar ilmu sejarah*. Tiara Wacana (2013)

tentang kuantum cahaya, gerak Brown, elektrodinamika benda bergerak, dan kesetaraan massa-energi; karya tahun 1907 dan 1911 tentang perluasan prinsip relativitas dan pengaruh gravitasi terhadap cahaya; karya 1915 tentang perihelion Merkurius dan persamaan medan gravitasi; karya 1916 tentang dasar relativitas umum; serta dokumen Nobel yang menjelaskan penghargaan 1921.

Sumber sekunder dipilih dari literatur sejarah sains, filsafat sains, sejarah fisika, dan pendidikan sains. Literatur tersebut mencakup karya klasik seperti Pais, Stachel, Miller, Norton, Renn, dan Staley, serta kajian mutakhir tahun 2020-2026 seperti Darrigol, Friedman, Gilmore dan Tausch-Pebody, Alstein, Simsek, dan Giacomini. Karya mutakhir digunakan untuk memperkuat posisi penelitian dalam diskusi historiografi terbaru, terutama mengenai narasi genesis relativitas, pembacaan ulang ekspedisi gerhana 1919, dan kesalahpahaman tentang Nobel Einstein. Sumber pendidikan sains digunakan secara terbatas untuk menegaskan relevansi narasi sejarah Einstein dalam pembelajaran konsep modern physics.⁹

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui dokumentasi. Data dikumpulkan dengan menelusuri karya primer Einstein, arsip Nobel, edisi terjemahan karya klasik, artikel jurnal sejarah sains, artikel pendidikan sains, buku akademik, dan sumber institusional kredibel. Setiap sumber dicatat berdasarkan identitas bibliografis, tahun terbit, jenis sumber, konteks produksi, dan relevansinya dengan periode 1905-1921. Untuk menjaga ketepatan historis, sumber populer hanya digunakan sebagai pendukung minor, sedangkan penjelasan utama bersandar pada sumber primer dan studi akademik.

Analisis data dilakukan melalui empat tahap. Pertama, kritik sumber eksternal dilakukan dengan menilai asal-usul sumber, tahun publikasi, institusi penerbit, dan otoritas penulis. Kedua, kritik sumber internal dilakukan dengan menilai isi, istilah, argumen, dan kemungkinan bias naratif. Ketiga, periodisasi dilakukan dengan membagi perkembangan pemikiran Einstein ke dalam fase 1905, 1907-1912, 1913-1915, 1916-1919, dan 1920-1921. Keempat, interpretasi dilakukan dengan menghubungkan perubahan konsep Einstein dengan konteks ilmiah dan sosialnya. Teknik triangulasi digunakan dengan membandingkan sumber primer, kajian historiografi, dan dokumen institusional Nobel.

Kriteria validitas dalam penelitian ini meliputi konsistensi kronologis, kesesuaian antara klaim dan sumber, serta keterhubungan argumentatif antarbagian. Konsistensi kronologis diperlukan karena kesalahan tanggal dapat mengubah makna sejarah, misalnya membedakan hadiah Nobel 1921, penerimaan hadiah pada 1922, dan kuliah Nobel yang disampaikan pada 1923. Kesesuaian klaim dan sumber diperlukan agar pembahasan tidak jatuh pada mitos populer. Keterhubungan argumentatif diperlukan agar naskah tidak hanya memaparkan peristiwa, tetapi menunjukkan pola

transformasi pemikiran Einstein.

Dalam menafsirkan sumber, penelitian ini membedakan antara pernyataan Einstein tentang proses kreatifnya dan rekonstruksi sejarawan terhadap proses tersebut. Perbedaan ini penting karena ingatan tokoh sering disusun setelah peristiwa terjadi, sehingga dapat dipengaruhi oleh kebutuhan menjelaskan diri, menyederhanakan konflik, atau menonjolkan prinsip yang baru dipahami kemudian. Oleh sebab itu, keterangan Einstein dalam kuliah atau tulisan retrospektif tidak diperlakukan sebagai data yang berdiri sendiri, melainkan dibandingkan dengan makalah sezaman, korespondensi, catatan kerja, dan interpretasi historiografis.

Penelitian ini juga membedakan antara sejarah internal dan sejarah eksternal ilmu. Sejarah internal berhubungan dengan masalah, konsep, persamaan, dan konsistensi teori. Sejarah eksternal berhubungan dengan jaringan ilmuwan, lembaga, media, politik, dan penghargaan. Keduanya tidak dipisahkan secara kaku karena perkembangan relativitas memperlihatkan keterkaitan erat antara kedalaman teori dan penerimaan sosial. Persamaan medan 1915 tidak akan memiliki makna sejarah yang sama tanpa pengujian 1919, sementara pengujian 1919 tidak akan menjadi peristiwa publik besar tanpa reputasi teoretis yang telah dibangun Einstein sejak 1905.

Batasan penelitian perlu ditegaskan. Artikel ini tidak berupaya menurunkan persamaan relativitas secara matematis, tidak membahas seluruh kontribusi Einstein setelah 1921, dan tidak menjadikan perdebatan prioritas Lorentz-Poincare-Einstein sebagai fokus utama. Perdebatan prioritas tetap disinggung sejauh membantu memahami konteks kelahiran relativitas khusus. Dengan batasan tersebut, artikel ini diarahkan pada pemahaman historis mengenai perubahan cara berpikir Einstein dan makna pengakuan Nobel, bukan pada pembuktian teknis teori fisika.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Krisis Fisika Klasik dan Posisi Einstein Menjelang 1905

Transformasi pemikiran Einstein berangkat dari krisis konseptual fisika klasik pada akhir abad ke-19. Mekanika Newtonian menyediakan kerangka yang sangat berhasil untuk menjelaskan gerak benda, sementara elektrodinamika Maxwell berhasil menjelaskan fenomena listrik, magnet, dan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Masalah muncul ketika kedua kerangka itu dipertemukan dalam kasus benda bergerak. Jika cahaya dipahami sebagai gelombang, maka secara klasik dibayangkan harus ada medium perambatan yang disebut eter. Namun, berbagai upaya mendeteksi gerak bumi terhadap eter tidak memberikan hasil yang sesuai dengan

⁹ Alstein, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., & van Joolingen, W. R. (2021). Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. *Physical Review*

Physics Education Research, 17(2), 023101; Prado, X., et al. (2020). Learning and teaching Einstein's theory of special relativity: State of the art.

harapan. Di sisi lain, transformasi Lorentz dan gagasan Poincare telah menunjukkan bahwa struktur matematika elektrodinamika membutuhkan pembacaan baru terhadap waktu, panjang, dan simultanitas.

Einstein memasuki problem tersebut bukan dari posisi profesor mapan, melainkan sebagai pegawai kantor paten di Bern. Kondisi ini sering dibaca secara romantis, tetapi secara metodologis penting karena pekerjaan paten membuat Einstein akrab dengan persoalan sinkronisasi jam, transmisi sinyal, dan definisi operasional waktu. Ia tidak hanya bertanya tentang apa itu waktu secara metafisik, melainkan bagaimana waktu diukur oleh pengamat yang berbeda. Pertanyaan ini menjadi pusat relativitas khusus. Dengan memusatkan perhatian pada prosedur pengukuran, Einstein memindahkan diskusi dari dugaan medium absolut menuju operasi fisik yang dapat didefinisikan.

Pada tahap awal ini, transformasi pemikiran Einstein dapat disebut sebagai transformasi dari substansi ke relasi. Fisika klasik cenderung mengandaikan ruang dan waktu sebagai wadah absolut tempat benda bergerak. Einstein justru menempatkan hubungan antarperistiwa, sinyal cahaya, dan pengamat sebagai titik mula. Akibatnya, konsep simultanitas tidak lagi dipahami sebagai sesuatu yang universal, melainkan bergantung pada prosedur sinkronisasi dalam kerangka acuan tertentu. Transformasi ini tampak sederhana, tetapi konsekuensinya radikal: jika simultanitas relatif, maka waktu dan panjang juga harus dipahami relatif terhadap keadaan gerak pengamat.

B. Annus Mirabilis 1905: Kuantum, Atom, Relativitas Khusus, dan Massa-Energi

Makalah pertama tahun 1905 tentang produksi dan transformasi cahaya memperlihatkan keberanian Einstein menafsirkan energi cahaya secara diskret. Ia mengusulkan bahwa dalam kondisi tertentu radiasi dapat diperlakukan seolah-olah terdiri atas paket energi. Gagasan ini tidak sepenuhnya sejalan dengan teori gelombang klasik, tetapi memberikan penjelasan yang kuat terhadap efek fotolistrik, yakni pelepasan elektron dari permukaan logam ketika dikenai cahaya dengan frekuensi tertentu. Dalam konteks transformasi pemikiran, makalah ini menunjukkan bahwa Einstein tidak hanya mengubah konsep ruang-waktu, tetapi juga cara memahami cahaya dan energi.

Makalah tentang gerak Brown memberikan dimensi lain dari transformasi pemikiran Einstein. Di sini, ia menggunakan analisis statistik untuk menunjukkan bahwa gerak partikel kecil dalam cairan dapat dijelaskan melalui tumbukan molekul. Makalah ini memperkuat realitas atom dan molekul pada saat keberadaan atom masih diperdebatkan oleh sebagian ilmuwan. Signifikansinya bagi sejarah pemikiran Einstein adalah bahwa ia tidak

memisahkan teori abstrak dari bukti empiris. Ia justru menggunakan teori untuk menghasilkan konsekuensi terukur, sehingga konsep yang semula diperdebatkan dapat memperoleh landasan observasional.¹⁰

Makalah relativitas khusus, *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, menjadi pusat transformasi 1905. Einstein memulai dari dua postulat: hukum-hukum fisika berlaku sama dalam semua kerangka inersial, dan kecepatan cahaya dalam ruang hampa sama bagi semua pengamat inersial. Dari dua postulat itu ia menurunkan konsekuensi tentang simultanitas, dilatasi waktu, kontraksi panjang, transformasi kecepatan, dan dinamika elektrodinamika. Yang menentukan bukan hanya hasil matematisnya, melainkan metode konseptualnya. Einstein menghapus kebutuhan terhadap ruang absolut dan eter sebagai acuan istimewa. Ia membuat prinsip relativitas bukan sekadar koreksi teknis, tetapi fondasi baru bagi pemahaman ruang dan waktu.¹¹

Makalah massa-energi pada akhir 1905 melengkapi perubahan tersebut. Dengan menunjukkan bahwa perubahan energi suatu benda berkaitan dengan perubahan massanya, Einstein membuka jalan bagi rumusan kesetaraan massa dan energi. Rumusan populer $E = mc^2$ kemudian menjadi ikon abad ke-20, meskipun pada saat itu makalah tersebut lebih merupakan konsekuensi singkat dari relativitas khusus daripada pernyataan teknologi energi nuklir. Penting dicatat bahwa transformasi pemikiran Einstein pada tahun 1905 tidak berhenti pada satu teori, melainkan membentuk pola baru: masalah klasik dibaca ulang melalui prinsip sederhana, kemudian prinsip itu menghasilkan konsekuensi luas bagi berbagai konsep dasar fisika.¹²

Tahun 1905 memperlihatkan setidaknya tiga ciri pemikiran Einstein. Pertama, ia menggunakan eksperimen pikiran untuk menguji konsistensi konsep. Kedua, ia lebih tertarik pada prinsip umum daripada model mekanis yang terlalu spesifik. Ketiga, ia bersedia menerima konsekuensi logis yang bertentangan dengan intuisi sehari-hari. Ketiga ciri ini penting bagi sejarah pendidikan karena memperlihatkan bahwa kreativitas ilmiah bukan sekadar kemampuan menghitung, tetapi kemampuan mengubah pertanyaan. Einstein tidak bertanya bagaimana benda bergerak melalui eter, melainkan apakah eter perlu dipertahankan jika hukum fisika dapat dirumuskan tanpa acuan absolut.

Tabel 1. Periodisasi Transformasi Pemikiran Einstein 1905-1921

Period e	Fokus Pemikiran	Bentuk Transformasi	Makna Historis
----------	-----------------	---------------------	----------------

10 Einstein, A. (1905b). On the motion of small particles suspended in stationary liquids required by the molecular-kinetic theory of heat. *Annalen der Physik*, 17, 549-560.

11 Einstein, A. (1905c). On the electrodynamics of moving

bodies. *Annalen der Physik*, 17, 891-921; Darrigol, O. (2021). Can we trust Einstein's accounts of the genesis of special relativity?

12 Einstein, A. (1905d). Does the inertia of a body depend upon its energy content? *Annalen der Physik*, 18, 639-641.

1905	Kuanta cahaya, atom, relativitas khusus, massa-energi	Dari ruang-waktu absolut menuju konsep relasional dan operasional	Fondasi fisika modern dan dasar reputasi awal Einstein
1907-1912	Prinsip ekuivalensi, gravitasi, geometri	Dari kerangka inersial menuju teori gravitasi relativistik	Awal perluasan relativitas khusus menjadi relativitas umum
1913-1915	Entwurf, argumen lubang, persamaan medan	Dari teori sementara menuju sintesis geometri-fisika	Puncak perumusan relativitas umum
1916-1919	Sistematisasi teori dan pengujian gerhana	Dari teori abstrak menuju pengakuan komunitas dan publik	Relativitas menjadi simbol revolusi ilmiah
1920-1921	Kontroversi, Nobel, efek fotolistrik	Dari reputasi publik menuju legitimasi institusional	Pengakuan Nobel terjadi melalui kontribusi kuantum, bukan relativitas

C. Dari Relativitas Khusus ke Prinsip Ekuivalensi, 1907-1912

Setelah 1905, tantangan terbesar Einstein adalah memperluas relativitas dari kerangka inersial menuju gerak dipercepat dan gravitasi. Fase ini memperlihatkan perubahan penting dari relativitas khusus menuju embrio relativitas umum. Pada 1907, Einstein merumuskan apa yang kemudian dikenal sebagai prinsip ekuivalensi: pengalaman fisik dalam sistem yang dipercepat dapat setara dengan pengalaman dalam medan gravitasi homogen. Contoh klasiknya adalah orang dalam lift tertutup yang

tidak dapat membedakan apakah gaya yang dirasakannya berasal dari percepatan lift atau dari medan gravitasi. Prinsip ini membuka jalan untuk memahami gravitasi bukan sebagai gaya Newtonian biasa, tetapi sebagai sesuatu yang terkait dengan struktur ruang-waktu.¹³

Prinsip ekuivalensi mengubah arah pemikiran Einstein. Relativitas khusus masih bekerja dalam ruang-waktu datar dan kerangka inersial. Gravitasi menuntut teori yang mampu menangani kerangka non-inersial dan medan yang berubah dari satu tempat ke tempat lain. Einstein mulai menyadari bahwa cahaya harus terpengaruh oleh gravitasi, dan pada 1911 ia memprediksi pembelokan cahaya oleh matahari. Prediksi awalnya belum sama dengan hasil akhir relativitas umum, sebab ia belum memiliki kerangka geometri yang matang. Namun, gagasan bahwa gravitasi mempengaruhi cahaya menunjukkan lompatan konseptual penting: jika cahaya yang tidak bermassa secara klasik dapat dibelokkan, maka gravitasi harus dipahami lebih dalam daripada gaya antar massa.¹⁴

Fase 1907-1912 juga menandai masuknya matematika geometri ke dalam pemikiran Einstein. Ia membutuhkan alat yang dapat menggambarkan ruang-waktu yang tidak datar. Di sinilah Marcel Grossmann berperan penting dengan memperkenalkan perangkat geometri diferensial, kalkulus tensor, dan gagasan dari Riemann, Ricci, dan Levi-Civita. Perkembangan ini menunjukkan transformasi metodologis: Einstein yang pada 1905 tampak mengandalkan analisis prinsip dan definisi operasional, kini harus berhadapan dengan struktur matematika yang lebih kompleks. Namun, ia tidak langsung menerima matematika sebagai penentu akhir. Ia tetap menuntut agar matematika memiliki makna fisik dan dapat kembali ke batas Newtonian pada medan lemah.

Relasi Einstein dengan matematika dalam periode ini sering disalahpahami. Ia bukan anti-matematika, tetapi berhati-hati terhadap formalisme yang kehilangan makna fisik. Pada saat yang sama, ia semakin menyadari bahwa teori gravitasi relativistik tidak mungkin dibangun hanya dengan intuisi fisik sederhana. Kebutuhan akan geometri menandai pendewasaan pemikiran Einstein. Ia bergerak dari relativitas khusus yang relatif ramping secara matematis menuju teori umum yang membutuhkan bahasa tensor. Transformasi ini tidak berlangsung mulus, karena Einstein harus menyeimbangkan tuntutan kovariansi umum, konservasi energi-momentum, batas Newtonian, dan interpretasi fisik gerak.

D. Teori Entwurf, Argumen Lubang, dan Jalan Berliku Menuju 1915

Pada 1913, Einstein dan Grossmann menerbitkan Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation, sebuah rancangan teori relativitas

¹³ Einstein, A. (1907). On the relativity principle and the conclusions drawn from it. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4, 411-462.

¹⁴ Einstein, A. (1911). On the influence of gravitation on the propagation of light. *Annalen der Physik*, 35, 898-908.

umum dan gravitasi. Teori Entwurf telah mengandung banyak unsur yang kelak penting bagi relativitas umum, tetapi persamaan medannya belum memiliki kovariansi umum penuh. Einstein pada saat itu menolak bentuk persamaan yang lebih umum karena ia menganggapnya bermasalah secara fisik. Salah satu hambatan konseptual yang terkenal adalah argumen lubang, yaitu kekhawatiran bahwa kovariansi umum akan merusak determinisme jika titik-titik ruang-waktu diperlakukan secara substantif. Belakangan Einstein menyadari bahwa kekhawatiran ini berangkat dari pemahaman yang belum tepat tentang makna koordinat dan peristiwa fisik.¹⁵

Periode 1913-1915 memperlihatkan bahwa transformasi pemikiran tidak selalu bergerak maju secara linear. Einstein pernah mempertahankan teori yang kemudian ia tinggalkan. Ia pernah menolak jalan yang kemudian terbukti benar. Ia juga bekerja dalam tekanan persaingan intelektual, terutama dengan David Hilbert, yang pada 1915 mengembangkan pendekatan variational terhadap teori gravitasi. Namun, justru melalui ketegangan inilah Einstein memperbaiki pemahamannya tentang hubungan antara kovariansi, koordinat, dan makna fisik. Historiografi mutakhir menekankan bahwa persamaan medan 1915 tidak muncul sebagai lompatan tunggal, tetapi sebagai hasil penggunaan kerangka Entwurf sebagai perancah untuk membangun lengkungan akhir teori.¹⁶

Pada November 1915, Einstein menyampaikan empat komunikasi kepada Akademi Ilmu Pengetahuan Prusia. Rangkaian itu menunjukkan intensitas transformasi yang luar biasa. Pada 4 November ia mengajukan persamaan medan dengan kovariansi yang lebih luas; pada 11 November ia memodifikasi pendekatan itu; pada 18 November ia berhasil menjelaskan anomali perihelion Merkurius sebesar sekitar 43 detik busur per abad; dan pada 25 November ia menyampaikan persamaan medan gravitasi dalam bentuk yang menjadi dasar relativitas umum. Penjelasan perihelion Merkurius menjadi titik penting karena teori baru bukan hanya elegan, tetapi juga mampu menjelaskan deviasi kecil yang tidak memuaskan dalam kerangka Newtonian.¹⁷

Komunikasi 25 November 1915 tentang persamaan medan gravitasi merupakan salah satu momen paling menentukan dalam sejarah sains modern. Persamaan itu menghubungkan geometri ruang-waktu dengan distribusi energi dan momentum. Dengan demikian, gravitasi tidak lagi dipahami sebagai gaya yang bekerja dalam ruang dan waktu absolut, melainkan sebagai manifestasi

kelengkungan ruang-waktu. Transformasi pemikiran Einstein mencapai tahap sintesis: prinsip relativitas, ekuivalensi, geometri diferensial, batas Newtonian, dan bukti astronomis dipadukan dalam satu kerangka teoretis.¹⁸

Pada 1916, Einstein mempublikasikan uraian sistematis tentang dasar relativitas umum. Publikasi ini penting karena memberi bentuk yang lebih stabil bagi teori yang pada 1915 masih muncul dalam rangkaian komunikasi singkat. Dalam naskah 1916, relativitas umum dipresentasikan sebagai teori yang menggeneralisasi relativitas khusus, mengganti konsep gravitasi Newtonian, dan membuka cara baru memahami ruang, waktu, dan gerak. Di sinilah transformasi Einstein tidak hanya menjadi hasil matematis, tetapi menjadi kerangka konseptual yang dapat dipelajari, dikritik, dan dikembangkan oleh komunitas ilmiah.¹⁹

E. Relativitas Umum, Prediksi, dan Pengakuan Publik 1916-1919

Setelah 1916, tantangan relativitas umum adalah penerimaan. Teori ini sangat abstrak, sulit secara matematis, dan muncul dalam konteks Eropa yang dilanda Perang Dunia I. Dalam kondisi demikian, penyebaran gagasan Einstein tidak hanya bergantung pada kualitas teori, tetapi juga pada perantara intelektual yang mampu membacanya dan menghubungkannya dengan komunitas ilmiah lain. Arthur Eddington di Inggris menjadi tokoh kunci dalam proses ini. Sebagai astronom dan Quaker yang memiliki komitmen internasionalis, Eddington memandang relativitas tidak hanya sebagai teori fisika, tetapi juga sebagai jembatan ilmiah melampaui permusuhan perang.

Ujian empiris paling terkenal terhadap relativitas umum adalah pembelokan cahaya bintang di dekat matahari saat gerhana total 29 Mei 1919. Ekspedisi yang berkaitan dengan Dyson, Eddington, dan Davidson melakukan pengamatan di Sobral, Brasil, dan Principe, Afrika Barat. Hasilnya diumumkan pada November 1919 dan dianggap mendukung prediksi relativitas umum. Secara historis, peristiwa ini sangat penting karena mengubah Einstein dari ilmuwan yang dikenal dalam komunitas terbatas menjadi figur publik global. Surat kabar menyajikan hasil itu sebagai runtuhnya pandangan Newtonian dan lahirnya teori baru tentang alam semesta.²⁰

Namun, historiografi gerhana 1919 juga menunjukkan bahwa penerimaan bukti tidak sederhana. Ada perdebatan

15 Einstein, A., & Grossmann, M. (1913). Outline of a generalized theory of relativity and of a theory of gravitation; Norton, J. D. (1984). How Einstein found his field equations, 1912-1915.

16 Janssen, M., & Renn, J. (2015). Arch and scaffold: How Einstein found his field equations. *Physics Today*, 68(11), 30-36.

17 Einstein, A. (1915a). Explanation of the perihelion motion of Mercury from the general theory of relativity. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 831-839.

18 Einstein, A. (1915b). The field equations of gravitation.

Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, 844-847.

19 Einstein, A. (1916). The foundation of the general theory of relativity. *Annalen der Physik*, 49, 769-822.

20 Will, C. M. (2015). The 1919 measurement of the deflection of light. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12), 124001; Gilmore, G., & Tausch-Pebody, G. (2022). The 1919 eclipse results that verified general relativity and their later detractors.

tentang kualitas data, pemilihan pelat fotografi, dan kemungkinan bias Eddington. Kajian ulang modern oleh Will, Kennefick, Gilmore, dan Tausch-Pebody menunjukkan bahwa kritik populer yang menuduh data 1919 sekadar dipilih untuk memenangkan Einstein terlalu menyederhanakan persoalan. Data saat itu memang tidak sempurna, tetapi penilaian astronomisnya memiliki dasar metodologis dalam konteks teknologi observasi masa itu. Hal ini penting untuk pembacaan sejarah sains: bukti ilmiah tidak hadir sebagai kepastian mutlak, melainkan sebagai hasil pengukuran, interpretasi, standar komunitas, dan perbandingan model.²¹

Pengakuan publik terhadap Einstein setelah 1919 melahirkan dua konsekuensi. Pertama, relativitas menjadi simbol revolusi ilmiah. Nama Einstein melewati batas komunitas fisika dan masuk ke budaya populer. Kedua, popularitas itu justru menimbulkan resistensi. Sebagian ilmuwan menganggap relativitas terlalu spekulatif, terlalu matematis, atau belum cukup teruji. Dalam iklim politik pascaperang dan meningkatnya antisemitisme di Jerman, kritik terhadap Einstein tidak selalu murni ilmiah. Relativitas pernah diserang sebagai 'fisika Yahudi' oleh kelompok tertentu. Karena itu, penerimaan relativitas harus dibaca bukan hanya dari sisi kebenaran teori, tetapi juga dari kondisi sosial-politik penerimaan ilmu.

Dalam sejarah pemikiran Einstein, 1919 bukan akhir transformasi, melainkan titik ketika teori memasuki ruang publik. Sebelum 1919, relativitas umum terutama merupakan pencapaian teoretis yang dipahami oleh lingkaran terbatas. Setelah 1919, relativitas menjadi narasi publik tentang runtuhnya kepastian lama. Ini mengubah posisi Einstein. Ia tidak lagi hanya menghasilkan teori, tetapi menjadi representasi modernitas ilmiah. Reputasi ini kemudian berpengaruh pada proses Nobel, meskipun komite Nobel tetap berhati-hati terhadap relativitas.

F. Nobel Fisika 1921: Paradoks Pengakuan Einstein

Nobel Fisika 1921 memperlihatkan paradoks dalam sejarah pengakuan ilmiah Einstein. Secara resmi, penghargaan itu diberikan kepada Einstein atas jasanya bagi fisika teoretis, khususnya penemuan hukum efek fotolistrik. Hadiah 1921 tidak diberikan pada tahun itu, melainkan dicadangkan dan diserahkan kepada Einstein pada 1922. Keputusan ini penting karena menunjukkan bahwa lembaga Nobel mengakui kebesaran Einstein, tetapi memilih dasar penghargaan yang dianggap lebih aman secara empiris daripada relativitas umum yang masih diperdebatkan. Dengan demikian, Nobel bukan sekadar penghargaan terhadap penemuan, tetapi juga keputusan institusional yang mempertimbangkan kepastian, reputasi, dan risiko

kontroversi.²²

Mengapa bukan relativitas? Pertanyaan ini sering muncul karena publik mengasosiasikan Einstein dengan relativitas. Jawabannya terletak pada kombinasi faktor ilmiah dan institusional. Efek fotolistrik lebih mudah dikaitkan dengan hasil eksperimental yang kuat, terutama setelah pengukuran Robert Millikan memberikan dukungan terhadap persamaan Einstein meskipun Millikan sendiri semula skeptis terhadap interpretasi kuantum cahaya. Relativitas, sebaliknya, dipandang masih terlalu baru, terlalu teoretis, dan belum cukup stabil menurut sebagian anggota komite. Selain itu, Allvar Gullstrand, salah satu tokoh dalam proses penilaian Nobel, sangat kritis terhadap relativitas. Kajian Friedman menegaskan bahwa penjelasan populer tentang 'kesalahan Gullstrand' saja tidak cukup; keputusan Nobel lahir dari jaringan penilaian yang lebih kompleks.²³

Paradoks Nobel menjadi lebih menarik karena kuliah Nobel Einstein tidak membahas efek fotolistrik secara substansial, melainkan gagasan dasar dan masalah teori relativitas. Kuliah itu disampaikan di Gothenburg pada 1923 dan kemudian diterima sebagai kuliah Nobel, meskipun tidak diberikan tepat pada upacara penghargaan. Fakta ini menunjukkan ketegangan antara dasar formal penghargaan dan identitas ilmiah Einstein di mata publik. Secara administratif, ia diberi Nobel karena efek fotolistrik; secara simbolik, ia hadir sebagai pembawa relativitas.²⁴

Pengakuan Nobel tahun 1921 juga memperlihatkan bagaimana transformasi pemikiran Einstein bergerak pada dua jalur. Jalur pertama adalah jalur teori, yaitu perubahan dari kuantum cahaya, relativitas khusus, hingga relativitas umum. Jalur kedua adalah jalur legitimasi, yaitu cara komunitas dan institusi menilai penemuan mana yang layak diakui. Kedua jalur ini tidak selalu sinkron. Teori yang paling terkenal belum tentu menjadi dasar penghargaan resmi. Sebaliknya, efek fotolistrik yang tampak lebih sempit justru menjadi pintu pengakuan institusional karena memiliki hubungan lebih langsung dengan bukti eksperimental dan perkembangan awal mekanika kuantum.

Dalam perspektif sejarah sains, Nobel 1921 bukan bukti bahwa relativitas kurang penting. Sebaliknya, keputusan tersebut menunjukkan kehati-hatian institusi penghargaan terhadap teori yang mengubah fondasi konseptual. Lembaga penghargaan cenderung membutuhkan stabilitas bukti, konsensus, dan formulasi kontribusi yang dapat diterima secara luas. Einstein telah memperoleh reputasi global karena relativitas, tetapi Nobel memilih efek fotolistrik sebagai dasar yang lebih terukur. Maka,

21 Kennefick, D. (2019). No shadow of a doubt: The 1919 eclipse that confirmed Einstein's theory of relativity.

22 Friedman, R. M. (2022). The 100th anniversary of Einstein's Nobel Prize: Facts and misconceptions. *Annalen der Physik*, 534, 2200305.

23 Einstein, A. (1923). Fundamental ideas and problems of the

theory of relativity. Nobel Lecture; Nobel Prize Outreach. (2026). Albert Einstein - Nobel Lecture.

24 Howard, D. (2014). Einstein and the development of twentieth-century philosophy of science. In M. Janssen & C. Lehner (Eds.), *The Cambridge companion to Einstein*.

pengakuan Nobel harus dipahami sebagai kompromi antara reputasi, bukti, dan konservatisme institusional.

G. Sintesis Transformasi Pemikiran Einstein 1905-1921

Berdasarkan uraian di atas, transformasi pemikiran Einstein dapat disintesis ke dalam empat tahap. Tahap pertama adalah transformasi problematik pada 1905. Einstein membaca krisis fisika klasik bukan sebagai kegagalan kecil, melainkan sebagai tanda bahwa konsep dasar perlu ditinjau ulang. Ia mengganti pertanyaan tentang medium absolut dengan pertanyaan tentang prinsip dan pengukuran. Tahap kedua adalah transformasi operasional dan prinsipial, yakni penggunaan definisi waktu, simultanitas, dan sinyal cahaya untuk membangun relativitas khusus. Pada tahap ini, ruang dan waktu tidak lagi absolut, tetapi terkait dengan kerangka acuan dan prosedur pengukuran.

Tahap ketiga adalah transformasi geometris pada 1907-1915. Einstein memperluas relativitas ke gravitasi melalui prinsip ekuivalensi, kemudian mencari bahasa matematika yang memadai. Fase ini menunjukkan bahwa perubahan ilmiah tidak hanya terjadi melalui ide fisik, tetapi juga melalui adopsi alat representasi baru. Geometri diferensial memungkinkan gravitasi dipahami sebagai kelengkungan ruang-waktu. Namun, jalan menuju persamaan medan penuh dengan revisi, kesalahan, dan perdebatan. Hal ini memperlihatkan bahwa teori besar bukan produk kepastian langsung, melainkan hasil kerja korektif yang panjang.²⁵

Tahap keempat adalah transformasi sosial-institusional pada 1919-1921. Setelah gerhana 1919, relativitas menjadi peristiwa publik. Einstein memperoleh otoritas simbolik sebagai ilmuwan yang mengguncang Newton. Namun, pengakuan Nobel menunjukkan bahwa reputasi publik dan penilaian institusional tidak identik. Hadiah Nobel diberikan melalui efek fotolistrik, bukan relativitas. Dalam tahap ini, pemikiran Einstein memasuki medan pengakuan, kontroversi, dan legitimasi. Sains tidak hanya diproduksi di meja kerja, tetapi juga disahkan melalui komunitas, jurnal, observatorium, media, dan lembaga penghargaan.

Temuan ini memperlihatkan bahwa transformasi pemikiran Einstein tidak tepat jika digambarkan sebagai perjalanan lurus dari relativitas khusus menuju relativitas umum lalu Nobel. Alur yang lebih akurat adalah jejaring perubahan: kuantum cahaya memberi dasar Nobel, relativitas khusus mengubah ruang-waktu, prinsip ekuivalensi membuka jalan ke gravitasi, matematika tensor memungkinkan teori umum, gerhana 1919 memperluas reputasi, dan Nobel 1921 menginstitusikan pengakuan melalui kontribusi yang dianggap lebih aman. Dengan demikian, Einstein bukan hanya tokoh relativitas, tetapi tokoh perubahan epistemik yang bergerak di antara fisika kuantum, fisika statistik, teori ruang-waktu, dan politik pengakuan ilmiah.

Analisis ini juga memiliki implikasi bagi pendidikan sejarah. Mengajarkan Einstein hanya melalui rumus $E = mc^2$ atau kisah gerhana 1919 akan menyederhanakan sejarah sains. Narasi yang lebih produktif adalah menampilkan bagaimana pertanyaan, konsep, metode, dan bukti berubah dari waktu ke waktu. Dengan cara itu, mahasiswa dapat memahami bahwa sains bersifat historis: ia memiliki konteks, kontroversi, dan proses validasi. Pembelajaran sejarah sains dapat membantu peserta didik melihat ilmu sebagai kegiatan manusia yang rasional sekaligus sosial, bukan sekadar kumpulan kebenaran jadi.

Dari sisi substansi, periode 1905-1921 juga menunjukkan perubahan kedudukan konsep eksperimen pikiran. Pada 1905, eksperimen pikiran berfungsi untuk menajamkan definisi simultanitas dan menguji konsistensi antara prinsip relativitas dan kecepatan cahaya. Pada fase relativitas umum, eksperimen pikiran seperti lift dipercepat membantu merumuskan prinsip ekuivalensi. Akan tetapi, Einstein tidak berhenti pada imajinasi konseptual. Ia selalu menuntut agar eksperimen pikiran menghasilkan konsekuensi yang dapat dihubungkan dengan pengukuran, seperti pembelokan cahaya, pergeseran perihelion Merkurius, dan pergeseran merah gravitasi. Hal ini menunjukkan bahwa imajinasi dalam sains bekerja bersama disiplin bukti.

Dengan membaca pola itu, transformasi Einstein dapat dipahami sebagai keseimbangan antara keberanian spekulatif dan disiplin empiris. Ia berani menolak ruang-waktu absolut, tetapi tidak menolak tuntutan prediksi. Ia berani mengadopsi matematika abstrak, tetapi tetap menuntut makna fisik. Ia berani mengajukan gagasan kuantum cahaya, tetapi justru gagasan itulah yang kemudian dianggap cukup kuat oleh Nobel. Keseimbangan ini menjelaskan mengapa pemikiran Einstein bertahan melampaui kontroversi awal: ia bukan hanya radikal, tetapi juga produktif dalam menghasilkan konsekuensi yang dapat diuji.

Studi pendidikan sains mutakhir juga menunjukkan bahwa relativitas sulit dipahami jika hanya diajarkan sebagai formula. Siswa dan mahasiswa sering mengalami kesulitan memahami kerangka acuan, postulat cahaya, simultanitas, dan efek relativistik. Karena itu, pendekatan historis dapat menjadi jembatan konseptual. Dengan menelusuri mengapa Einstein perlu merumuskan ulang waktu dan ruang, pembelajar lebih mudah memahami masalah yang diselesaikan teori tersebut. Sejarah pemikiran tidak menggantikan penjelasan fisika, tetapi memberi konteks masalah sehingga konsep tidak tampak datang secara tiba-tiba.

Dari sisi historiografi, penelitian ini menegaskan perlunya membedakan Einstein sebagai tokoh historis dan Einstein sebagai ikon budaya. Einstein sebagai ikon sering

²⁵ Lehmkuhl, D. (2019). General relativity as a hybrid theory: The genesis of Einstein's work on the problem of motion. *Studies in History*

and Philosophy of Modern Physics, 67, 176-190.

disederhanakan menjadi simbol kecerdasan, relativitas, dan Nobel. Einstein sebagai tokoh historis lebih kompleks: ia berdebat dengan tradisi klasik, menggunakan dan menolak alat matematika, salah langkah dalam beberapa argumen, mengalami resistensi politik, serta memperoleh Nobel melalui dasar penghargaan yang tidak sepenuhnya sama dengan citra publiknya. Perbedaan ini penting agar penulisan sejarah tidak berubah menjadi hagiografi.

Kajian terbaru tentang kuliah Kyoto 1922, naskah Habicht, dan pembacaan ulang sumber-sumber awal menunjukkan bahwa historiografi Einstein masih berkembang. Penelitian baru tidak selalu mengganti fakta pokok, tetapi sering memperhalus pemahaman tentang proses, jaringan, dan narasi genesis teori. Hal ini membuka peluang bagi penelitian pendidikan sejarah untuk menggunakan kasus Einstein sebagai contoh bagaimana historiografi bekerja: fakta yang tampak mapan tetap dapat ditafsirkan ulang ketika sumber, konteks, dan pertanyaan penelitian berubah.^{26,27}

H. Jaringan Aktor, Media, dan Institusi dalam Pembentukan Otoritas Einstein

Transformasi pemikiran Einstein tidak dapat dilepaskan dari jaringan aktor yang membantu, mengkritik, atau memediasi gagasannya. Pada fase awal, Max Planck merupakan salah satu fisikawan penting yang melihat signifikansi relativitas khusus. Minkowski kemudian memberi bentuk geometris pada relativitas khusus melalui konsep ruang-waktu empat dimensi. Meskipun Einstein pada awalnya tidak segera menerima sepenuhnya gaya matematis Minkowski, formalisasi tersebut kelak sangat berguna bagi relativitas umum. Grossmann membantu menyediakan alat tensor ketika Einstein berupaya mengembangkan teori gravitasi. Hilbert, melalui pendekatan matematisnya, menjadi rekan sekaligus pesaing dalam atmosfer intelektual 1915. Jaringan ini menunjukkan bahwa transformasi pemikiran Einstein merupakan proses personal dan kolektif sekaligus.²⁸

Media juga memainkan peran penting setelah 1919. Pengumuman hasil gerhana di London menjadi berita besar karena ia menawarkan narasi dramatis: teori baru menggantikan Newton. Narasi media tentu menyederhanakan kompleksitas teknis, tetapi ia memperluas jangkauan relativitas ke masyarakat luas. Pada titik ini, Einstein memperoleh status budaya yang melampaui fisika. Ia dipandang sebagai lambang modernitas, kecerdasan, dan perubahan pandangan dunia. Status ini membantu memperkuat otoritas simboliknya, tetapi juga membuatnya rentan terhadap kritik ideologis dan

kesalahpahaman populer. Dengan demikian, sejarah relativitas tidak hanya berlangsung dalam jurnal ilmiah, melainkan juga dalam surat kabar, ceramah publik, dan perdebatan politik.

Institusi Nobel berada pada posisi berbeda dari media. Jika media cenderung mencari narasi revolusi, komite Nobel cenderung mencari dasar penghargaan yang dapat dipertanggungjawabkan secara institusional. Perbedaan logika ini menjelaskan mengapa relativitas dapat menjadi pusat reputasi publik Einstein, sementara efek fotolistrik menjadi dasar penghargaan resmi. Dalam hal ini, Nobel 1921 mencerminkan cara lembaga ilmiah mengelola risiko epistemik. Teori yang paling radikal tidak selalu langsung dijadikan dasar penghargaan, terutama bila komunitas penilai masih melihat adanya kontroversi atau keterbatasan verifikasi. Karena itu, Nobel Einstein tidak boleh dipahami sebagai penyangkalan terhadap relativitas, tetapi sebagai bentuk pengakuan yang dinegosiasikan melalui kontribusi yang dianggap lebih stabil.²⁹

I. Makna Epistemologis bagi Kajian Pendidikan Sejarah

Bagi pendidikan sejarah, kasus Einstein menunjukkan bahwa sejarah pemikiran dapat dipakai untuk melatih cara berpikir historis. Mahasiswa tidak hanya diminta mengetahui bahwa relativitas khusus terbit pada 1905 dan relativitas umum selesai pada 1915. Mahasiswa perlu diajak bertanya mengapa konsep waktu absolut dipersoalkan, bagaimana prinsip ekuivalensi muncul, mengapa matematika tensor diperlukan, mengapa data gerhana 1919 menjadi penting, serta mengapa Nobel memilih efek fotolistrik. Pertanyaan-pertanyaan itu melatih pemahaman kronologis, kausalitas, perubahan dan kesinambungan, serta hubungan antara bukti dan interpretasi.

Pembelajaran sejarah sains juga dapat membantu menempatkan sains sebagai kebudayaan intelektual. Sains memang memiliki prosedur rasional dan bukti empiris, tetapi ia juga dibentuk oleh bahasa, komunitas, instrumen, institusi, dan situasi sosial. Menjelaskan Einstein melalui dimensi ini tidak berarti melemahkan objektivitas ilmu, melainkan menunjukkan bagaimana objektivitas dibangun. Objektivitas tidak turun dari langit; ia dihasilkan melalui kritik, pengujian, komunikasi, dan konsensus bertahap. Dengan pendekatan demikian, siswa dan mahasiswa dapat memahami bahwa ilmu pengetahuan bersifat dinamis, tetapi bukan relativistik dalam arti sembarang. Perubahan teori tetap harus melewati standar argumentasi dan bukti.

26 Simsek, E. (2025). Einstein's Kyoto Lecture, or the unofficial Nobel Prize speech. *Annalen der Physik*, 537(5), 2500090.

27 Giacomini, H. (2025). Lorentz, Poincare, Einstein, and the genesis of the theory of special relativity; Giacomini, H. (2026). Conrad Habicht 1914 manuscript on special relativity and Einstein 1907 reframing of the 1905 theory.

28 O'Raifeartaigh, C., O'Keeffe, M., Nahm, W., & Mitton, S.

(2017). Einstein's 1917 static model of the universe: A centennial review. *European Physical Journal H*, 42, 431-474.

29 Kurnia, A. (2021). Konsep pemahaman teori relativitas khusus Einstein tentang pemuai waktu. *TEDC*, 15(2), 173-180. Referensi nasional ini dipakai secara terbatas untuk konteks pembelajaran dan penerimaan konsep relativitas di Indonesia.

Dalam konteks artikel ini, transformasi Einstein dapat dijadikan model naratif untuk menghubungkan sejarah Eropa-Amerika, sejarah ilmu, dan pendidikan modern. Relativitas lahir dari ruang intelektual Eropa, diuji melalui jejaring observasi internasional, dibingkai oleh media Inggris, dan diakui oleh institusi Nobel Swedia. Perjalanan ini menunjukkan bahwa sains modern bersifat transnasional. Ia melibatkan pertukaran gagasan lintas bahasa, negara, disiplin, dan lembaga. Untuk mahasiswa pendidikan sejarah, aspek ini penting karena memperluas pengertian sejarah dari politik dan perang menuju sejarah pengetahuan, teknologi, dan budaya ilmiah.

PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa transformasi pemikiran Albert Einstein pada tahun 1905-1921 berlangsung melalui proses bertahap, tidak linear, dan terkait erat dengan krisis konseptual fisika klasik. Pada 1905, Einstein membangun fondasi transformasi melalui gagasan kuantum cahaya, pembuktian statistik tentang atom, relativitas khusus, dan kesetaraan massa-energi. Fase ini memperlihatkan perubahan dari konsep absolut menuju konsep relasional dan operasional. Pada 1907-1912, pemikirannya berkembang melalui prinsip ekuivalensi dan pencarian teori gravitasi yang sesuai dengan relativitas. Pada 1913-1915, Einstein mengalami fase koreksi dan pematangan melalui teori Entwurf, argumen lubang, kerja tensor, hingga formulasi persamaan medan gravitasi. Pada 1916-1919, relativitas umum memperoleh bentuk sistematis dan pengakuan publik melalui pengujian gerhana. Pada 1921, pengakuan Nobel menginstitusikan kebesaran Einstein, tetapi melalui efek fotolistrik, bukan relativitas.

Jawaban terhadap tujuan penelitian adalah bahwa transformasi pemikiran Einstein tidak hanya berupa perkembangan teori dari relativitas khusus ke relativitas umum. Transformasi tersebut mencakup perubahan cara berpikir tentang konsep ilmiah, metode pembuktian, peran matematika, dan hubungan teori dengan institusi pengakuan. Einstein bergerak dari perumus prinsip yang mengkritik ruang-waktu klasik menjadi pembangun teori geometri gravitasi, lalu menjadi simbol publik sains modern. Namun, Nobel 1921 memperlihatkan bahwa pengakuan ilmiah tidak selalu mengikuti citra populer. Efek fotolistrik dipilih karena dianggap memiliki dasar empiris yang lebih dapat diterima, sedangkan relativitas masih berada dalam medan kontroversi dan kehati-hatian institusional.

Secara teoretis, temuan ini memperkuat pandangan bahwa sejarah sains harus membaca gagasan ilmiah bersama konteks penerimaan dan legitimasi sosialnya. Secara praktis, kajian ini dapat digunakan dalam pendidikan sejarah dan sejarah sains untuk menunjukkan bahwa teori

besar lahir melalui proses problematis, bukan melalui inspirasi tunggal. Einstein penting bukan hanya karena menghasilkan relativitas, tetapi karena menunjukkan bagaimana ilmu modern bertransformasi ketika konsep dasar seperti cahaya, waktu, ruang, massa, energi, dan gravitasi didefinisikan ulang. Dengan demikian, periode 1905-1921 merupakan laboratorium historis untuk memahami dinamika perubahan ilmu pengetahuan modern.

Referensi

DAFTAR PUSTAKA

A. JURNAL:

- Alstein, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., & van Joolingen, W. R. (2021). Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 023101.
- Cassini, A., & Levinas, M. L. (2019). Einstein's reinterpretation of the Fizeau experiment: How it turned out to be crucial for special relativity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 65, 55-72.
- Darrigol, O. (2021). Can we trust Einstein's accounts of the genesis of special relativity? *Studies in History and Philosophy of Science*, 89, 138-154.
- Muhammad Yazid Al Busthomi dan Dziki Haniful Ichsan. "Dinamika Sosial, Organisasi, dan Advokasi Hak Homoseksual di Indonesia (1983): Analisis Historis Dokumen Majalah G: Gaya Hidup Ceria," *AVATARA, e-Journal Pendidikan Sejarah*, Vol. 17, No. 3 (2026), hlm. 75.
- Friedman, R. M. (2022). The 100th anniversary of Einstein's Nobel Prize: Facts and misconceptions. *Annalen der Physik*, 534, 2200305.
- Gilmore, G., & Tausch-Pebody, G. (2022). The 1919 eclipse results that verified general relativity and their later detractors: A story re-told. *Notes and Records: The Royal Society Journal of the History of Science*, 76(1), 155-190.
- Hentschel, K. (1992). Einstein's attitude towards experiments: Testing relativity theory 1907-1927. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 23(4), 593-624.
- Janssen, M., & Renn, J. (2015). Arch and scaffold: How Einstein found his field equations. *Physics Today*, 68(11), 30-36.
- Kurnia, A. (2021). Konsep pemahaman teori relativitas khusus Einstein tentang pemuatan waktu. *TEDC*, 15(2), 173-180.
- Lehmkuhl, D. (2019). General relativity as a hybrid theory: The genesis of Einstein's work on the problem of motion. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 67, 176-190.

- Lemos, J. P. S., Herdeiro, C. A. R., & Cardoso, V. (2019). Einstein and Eddington and the consequences of general relativity: Black holes and gravitational waves. *International Journal of Modern Physics D*, 29(11), 2041014.
- Norton, J. D. (1984). How Einstein found his field equations, 1912-1915. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 14(2), 253-316.
- Norton, J. D. (2007). What was Einstein's principle of equivalence? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(3), 436-464.
- O'Raifeartaigh, C., O'Keefe, M., Nahm, W., & Mitton, S. (2017). Einstein's 1917 static model of the universe: A centennial review. *European Physical Journal H*, 42, 431-474.
- Simsek, E. (2025). Einstein's Kyoto Lecture, or the unofficial Nobel Prize speech. *Annalen der Physik*, 537(5), 2500090.
- Will, C. M. (2015). The 1919 measurement of the deflection of light. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12), 124001.
- B. BUKU:**
- Einstein, A. (1920). *Äther und Relativitätstheorie*. Springer. (Buku)
- Einstein, A., & Grossmann, M. (1913). *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Teubner. (Buku/Monograf)
- Heydenreich, A. (2021). Epistemic narrativity in Albert Einstein's treatise on special relativity. Dalam *Physics and literature: Concepts - Transfer - Aestheticization*. De Gruyter. (Bab Buku)
- Howard, D. (2014). Einstein and the development of twentieth-century philosophy of science. Dalam *The Cambridge companion to Einstein*. Cambridge University Press. (Bab Buku)
- Kennefick, D. (2019). *No shadow of a doubt: The 1919 eclipse that confirmed Einstein's theory of relativity*. Princeton University Press. (Buku)
- Kuhn, T. S. (2012). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press. (Buku)
- Miller, A. I. (1981). *Albert Einstein's special theory of relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*. Addison-Wesley. (Buku)
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press. (Buku)
- Renn, J. (Ed.). (2007). *The genesis of general relativity* (Vols. 1-4). Springer. (Buku multi-volume)
- Stachel, J. (2002). *Einstein from B to Z*. Birkhäuser. (Buku)
- Staley, R. (2008). *Einstein's generation: The origins of the relativity revolution*. University of Chicago Press. (Buku)
- Kuntowijoyo. (2013). *Pengantar ilmu sejarah*. Tiara Wacana. (Buku)
- C. WEBSITE:**
- Library of Congress. (2026). *The 1905 papers - Annus mirabilis of Albert Einstein*. <https://guides.loc.gov/einstein-annus-mirabilis/1905-papers>
- Nobel Prize Outreach. (2026). *The Nobel Prize in Physics 1921*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/su/mmary/>
- D. LAINNYA:**
- Einstein, A. (1923).** *Fundamental ideas and problems of the theory of relativity*. Nobel Lecture. Nobel Prize Outreach. (Teks Pidato Nobel)
- Giacomini, H. (2025).** *Lorentz, Poincare, Einstein, and the genesis of the theory of special relativity*. arXiv. (Artikel Preprint)
- Giacomini, H. (2026).** *Conrad Habicht 1914 manuscript on special relativity and Einstein 1907 reframing of the 1905 theory*. arXiv. (Artikel Preprint)
- Kennefick, D. (2007).** *Not only because of theory: Dyson, Eddington and the competing myths of the 1919 eclipse expedition*. arXiv. (Artikel Preprint)
- Prado, X., Domínguez, J. M., Area, I., Edelstein, J., Mira, J., & Paredes, Á. (2020).** *Learning and teaching Einstein's theory of special relativity: State of the art*. arXiv. (Artikel Preprint)