



Peran Analogi dan Metafora dalam Memahami Konsep Abstrak Fisika Modern: A Systematic Review

Mey Lani Farisky^{1*}, Azmi Aufa Ibti Samah², Tamara Nissa Saputri³, M. Arif Rahman Hakim⁴

^{1,2,3,4}Pendidikan Fisika, Universitas Jambi, Indonesia

lanifarisky@gmail.com

ABSTRACT

Keywords:

Analogical Representation;
Metaphorical Representation;
Modern Physics;
Conceptual Understanding;
Systematic Review.

Abstract: Modern physics, with its abstract concepts such as those found in quantum mechanics and relativity presents significant cognitive challenges for learners. This systematic review aims to analyze the role of analogical and metaphorical representations in facilitating conceptual understanding of modern physics material. The PRISMA method was used, involving the stages of identification, screening, eligibility, and inclusion of articles obtained from the Scopus, Google Scholar, and ERIC databases within the years 2005–2025. Inclusion criteria included empirical and theoretical articles discussing the use of analogies or metaphors in modern physics learning, available in full text, and written in English or Indonesian, while off-topic and irrelevant articles were excluded. From this process, 40 articles were obtained for analysis. Data analysis was conducted using a thematic approach to identify patterns in research findings and bibliometric analysis to map publication trends. The results indicate that the effectiveness of using analogies and metaphors is measured by the proportion of studies reporting improved conceptual understanding, with the highest values in the topics of Quantum Mechanics (85%) and Cosmology (80%).

Kata Kunci:

Analogi;
Metafora;
Fisika Modern;
Pemahaman Konsep;
Tinjauan Sistematis.

Abstrak: Fisika modern dengan konsep-konsep abstraknya, seperti dalam mekanika kuantum dan relativitas, menghadirkan tantangan kognitif yang signifikan bagi pembelajar. Tinjauan sistematis ini bertujuan untuk menganalisis peran representasi analogis dan metaforis dalam memfasilitasi pemahaman konseptual pada materi fisika modern. Metode PRISMA digunakan dengan tahapan identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi terhadap artikel yang diperoleh dari database Scopus, Google Scholar, dan ERIC dalam rentang tahun 2005–2025. Kriteria inklusi meliputi artikel empiris dan teoretis yang membahas penggunaan analogi atau metafora dalam pembelajaran fisika modern, tersedia dalam full-text, serta ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, sedangkan artikel di luar topik dan tidak relevan dieliminasi. Dari proses tersebut diperoleh 40 artikel yang dianalisis. Analisis data dilakukan melalui pendekatan tematik untuk mengidentifikasi pola temuan penelitian serta analisis bibliometrik untuk memetakan tren publikasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa efektivitas penggunaan analogi dan metafora diukur berdasarkan proporsi studi yang melaporkan peningkatan pemahaman konseptual, dengan nilai tertinggi pada topik Mekanika Kuantum (85%) dan Kosmologi (80%).

Article History:

Received : 12-02-2026
Revised : 18-03-2026
Accepted : 31-03-2026
Online : 01-04-2026



<https://doi.org/10.31764/pendekar.v9i1.37667>



This is an open access article under the **CC-BY-SA** license

A. LATAR BELAKANG

Perkembangan fisika modern sebagai cabang ilmu yang lahir dari mekanika kuantum dan relativitas merepresentasikan pergeseran paradigma fundamental dalam memahami fenomena alam yang berada di luar jangkauan pengalaman sehari-hari (Ahmad et al., 2020; Sari & Putra, 2022; Lee, 2021). Ruang lingkup fisika modern yang mencakup relativitas, mekanika kuantum, struktur atom, fisika nuklir, fisika partikel, dan kosmologi menegaskan tingkat kompleksitas konseptual yang tinggi akibat ketergantungannya pada representasi matematis formal (Nugroho, 2023; Hartono & Dewi, 2021; Kim, 2020). Karakteristik abstrak tersebut menjadikan banyak fenomena fisika modern

tidak dapat diamati secara langsung, sehingga sulit diakses secara intuitif oleh mahasiswa (Rahmawati et al., 2024; Tan & Choi, 2022; Prasetyo, 2021).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sifat abstrak fisika modern berdampak signifikan terhadap proses pembelajaran. Mahasiswa kerap mengalami kesulitan dalam memahami konsep-konsep kunci karena tingginya tuntutan kemampuan berpikir konseptual dan representasional (Wibowo et al., 2023; Lestari & Yunus, 2020; Chang, 2021). Dalam mekanika kuantum, misalnya, pemahaman terhadap fungsi gelombang, probabilitas keberadaan partikel, dan superposisi menuntut mahasiswa untuk meninggalkan paradigma deterministik fisika klasik, yang sering kali menjadi hambatan konseptual utama (Santoso et al., 2022; Park & Lin, 2021; Yusuf, 2020). Hambatan serupa juga ditemukan pada teori relativitas, di mana konsep seperti dilatasi waktu, kontraksi panjang, dan kelengkungan ruang-waktu sulit dipahami tanpa dukungan representasi visual maupun analogi konseptual yang memadai (Mahmud et al., 2024; Chen & Yu, 2022; Pranata, 2021).

Temuan-temuan tersebut konsisten dengan hasil penelitian yang menegaskan bahwa kesulitan konseptual merupakan permasalahan utama dalam pembelajaran fisika modern, terutama pada topik mekanika analitik dan mekanika kuantum (Arifin et al., 2025; Sari & Ahmad, 2023; Liu, 2021). Rendahnya capaian belajar mahasiswa tidak hanya dipengaruhi oleh lemahnya penguasaan matematika prasyarat, tetapi juga oleh keterbatasan strategi belajar mandiri dan rendahnya keterhubungan antarkonsep (Rahman et al., 2020; Wilson & Lee, 2023; Putri, 2022). Kondisi ini mengindikasikan perlunya pendekatan pembelajaran yang mampu memberikan *scaffolding* bertahap melalui integrasi representasi visual, matematis, dan konseptual untuk membantu mahasiswa membangun pemahaman yang lebih koheren (Nuraini et al., 2024; Zhang & Ito, 2021; Herman, 2023).

Lebih lanjut, berbagai studi mengungkap bahwa miskonsepsi fundamental dalam fisika modern seperti pada konsep spin, superposisi, dan mekanisme pengukuran sering muncul akibat ketidaksesuaian antara model mental mahasiswa dan struktur formal teori kuantum (Majidy, 2025; Fazio et al., 2019; Halim et al., 2018). Faktor penyebab miskonsepsi tersebut tidak hanya berasal dari keterbatasan kemampuan matematis, tetapi juga dipicu oleh penggunaan metafora, analogi, serta terminologi yang ambigu dalam proses pembelajaran (Greca & Freire, 2013; Dimitriou et al., 2021; Zhang et al., 2021). Untuk mengatasi permasalahan ini, sejumlah strategi pembelajaran seperti *peer instruction*, *predict, observe, explain*, serta representasi visual berbasis konflik kognitif direkomendasikan untuk mendukung restrukturisasi konseptual mahasiswa (Chandran et al., 2021; Kagan et al., 2019; Akram et al., 2021).

Dalam konteks representasi konseptual, metafora dan analogi dipandang sebagai jembatan kognitif yang potensial untuk mengkonkretkan konsep-konsep abstrak fisika modern. Metafora seperti awan elektron, gelombang materi, dan ruang-waktu melengkung berperan penting dalam memberikan gambaran awal terhadap fenomena yang tidak dapat diamati secara langsung (Greca & Freire, 2013; Singh & Marshman, 2015; Zhang et al., 2021). Namun, pemahaman berbasis metafora sering kali bersifat superfisial apabila tidak dilengkapi dengan analogi yang tepat sebagai pemetaan struktural antara konsep baru dan konsep yang telah familiar (Fazio et al., 2019; Halim et al., 2018; Dimitriou et al., 2021). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa analogi membantu mahasiswa membangun relasi struktural yang lebih dalam terhadap mekanisme abstrak dalam fisika modern (Akram et al., 2021; Chandran et al., 2021; Krijtenburg et al., 2022). Bahkan, integrasi simultan antara metafora dan analogi dilaporkan mampu meningkatkan efektivitas pembelajaran karena memungkinkan mahasiswa memahami makna konseptual tanpa bergantung pada hafalan simbolis semata (McKagan et al., 2019; Singh & Marshman, 2015; Dimitriou et al., 2021).

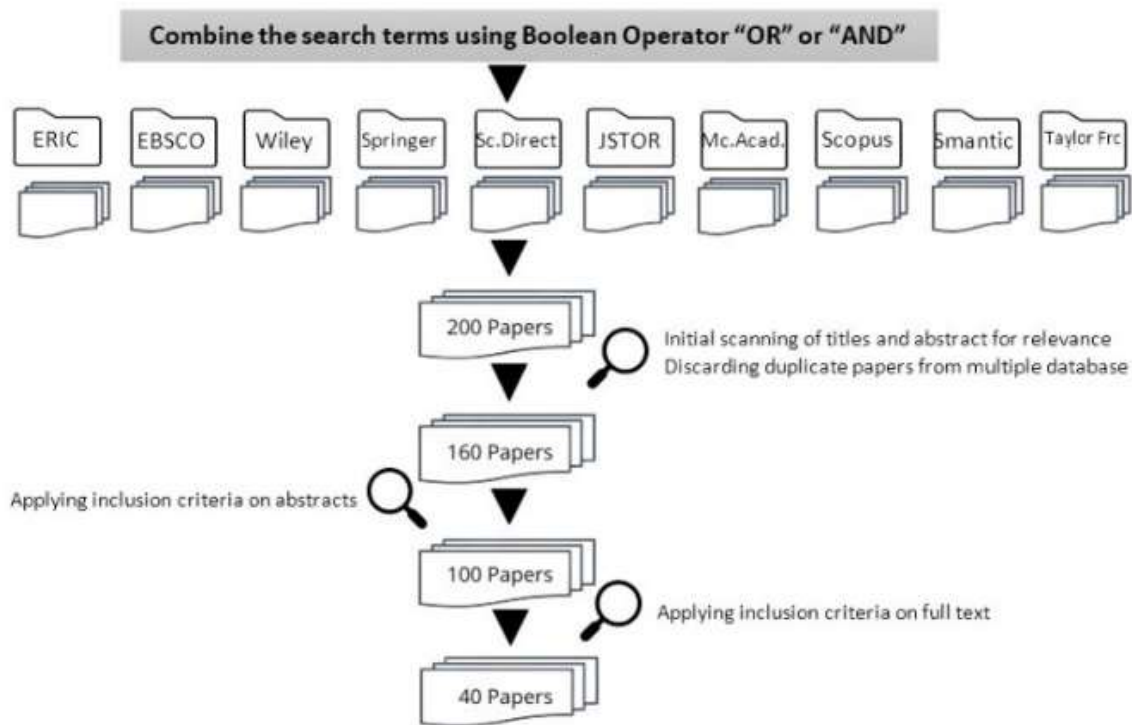
Meskipun berbagai penelitian menunjukkan bahwa metafora dan analogi berpotensi memfasilitasi pemahaman konsep fisika modern yang sangat abstrak (Rahmawati & Lin, 2021), kajian yang secara spesifik menilai efektivitas integrasi keduanya masih terbatas. Penelitian

sebelumnya cenderung mengkaji metafora atau analogi secara terpisah, tanpa mengevaluasi bagaimana keduanya dapat bekerja secara simultan dalam mereduksi miskonsepsi, khususnya pada materi mekanika kuantum dan relativitas. Selain itu, kajian yang menelusuri mekanisme kognitif mahasiswa dalam memproses dan menginterpretasikan metafora maupun analogi masih relatif terbatas, padahal struktur dan kualitas representasi analogis sangat menentukan keberhasilan konstruksi model mental ilmiah (Zhang & Treagust, 2020). Penelitian yang ada juga belum secara sistematis mengidentifikasi jenis metafora atau analogi yang berpotensi menimbulkan miskonsepsi, serta masih terfokus pada subtopik tertentu sehingga belum memberikan gambaran komparatif lintas konsep fisika modern.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini memiliki kontribusi penting dalam mengisi kekosongan literatur melalui pendekatan *systematic review*. Penelitian ini secara komprehensif menelaah literatur dari basis data Scopus, Google Scholar, dan ERIC untuk memetakan peran analogi dan metafora dalam membantu pemahaman konsep abstrak fisika modern. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada analisis integratif antara metafora dan analogi sebagai strategi representasional, serta pada pemetaan komparatif lintas subbidang fisika modern untuk mengidentifikasi pola efektivitas, tantangan kognitif, dan implikasi pedagogisnya. Sejalan dengan tujuan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menjawab tiga pertanyaan penelitian utama, yaitu: RQ1. Apa ringkasan fokus penelitian dari studi–studi yang disertakan?; RQ2. Apa ringkasan metodologi yang digunakan pada studi–studi tersebut?; dan RQ3. Apa ringkasan hasil atau capaian yang dilaporkan dalam studi–studi yang disertakan?.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic review* untuk mengkaji secara komprehensif peran analogi dan metafora dalam membantu pemahaman konsep abstrak fisika modern. Prosedur penelitian dirancang secara sistematis dan transparan agar dapat direplikasi secara ilmiah serta memenuhi prinsip validitas metodologis dalam kajian literatur. Proses identifikasi artikel diawali dengan penelusuran literatur pada tiga basis data utama, yaitu Scopus, Google Scholar, dan ERIC. Ketiga basis data tersebut dipilih karena memiliki cakupan luas terhadap publikasi internasional dan nasional di bidang pendidikan sains dan fisika. Penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dengan topik penelitian, seperti *physics education*, *modern physics*, *quantum mechanics*, *relativity*, *analogy*, *metaphor*, *conceptual understanding*, dan *misconception*. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean (*AND*, *OR*) untuk memastikan ketercakupannya literatur yang optimal. Hasil penelusuran awal menghasilkan sebanyak 200 publikasi yang berpotensi relevan dengan topik pemahaman konsep abstrak dalam fisika modern. Seluruh artikel yang teridentifikasi kemudian dikompilasi dan dikelola untuk memudahkan proses seleksi serta penghapusan duplikasi, proses tersebut di rangkum pada Gambar 1 di bawah ini:



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA Proses Seleksi Artikel

Seleksi artikel dilakukan secara bertahap mengikuti prinsip *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) guna meningkatkan transparansi dan keterlacakan proses seleksi, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Artikel

Kategori	Kriteria
Inklusi	<ul style="list-style-type: none"> • Artikel merupakan studi empiris atau teoritis yang berfokus pada analogi atau metafora dalam pembelajaran fisika khususnya materi fisika modern • Dipublikasikan pada tahun 2005-2025 • Artikel tersedia dalam bentuk full-text • Artikel di tulis dalam bentuk Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia
Ekslusi	<ul style="list-style-type: none"> • Artikel tidak membahas analogi atau metafora dalam pembelajaran fisika • Artikel tidak berfokus pada fisika modern

Tahap awal berupa penyaringan judul dan abstrak dilakukan setelah penghapusan artikel duplikat. Pada tahap ini, artikel yang tidak relevan dengan bidang fisika, tidak membahas fisika modern, atau tidak terkait dengan konteks pembelajaran dieksklusikan, sehingga menghasilkan 160 artikel yang dinilai secara relevan secara konseptual. Tahap berikutnya adalah penilaian abstrak dengan menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi, jumlah artikel menyempit menjadi 100 artikel yang dinilai secara relevan secara konseptual. Rincian kriteria inklusi dan eksklusi ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Tahapan Seleksi PRISMA dan Jumlah Setiap Artikel pada Setiap Tahap

Tahap PRISMA	Jumlah Artikel	Keterangan
Identifikasi	200	Publikasi awal dari database (termasuk duplikasi).
Penyaringan Judul–Abstrak	160	Setelah penghapusan duplikasi dan penilaian relevansi awal.
Penilaian Abstrak (Inklusi Awal)	100	Setelah penerapan kriteria inklusi pada abstrak.
Penilaian Full Text	40	Artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi.

Tahap akhir berupa *full-text screening* dilakukan secara menyeluruh untuk memastikan kesesuaian fokus penelitian, kejelasan penggunaan analogi atau metafora, serta kualitas metodologis artikel. Artikel yang tidak secara eksplisit membahas analogi atau metafora dalam pembelajaran fisika modern dieksklusikan. Hasil dari tahap ini menghasilkan 40 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dijadikan dasar analisis dalam *systematic review* ini.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan 200 publikasi awal yang diperoleh dari *Scopus*, *Google Scholar*, *Web of Science* dan *arXiv*, proses seleksi PRISMA menghasilkan 40 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi.

1. Distribusi Geografi

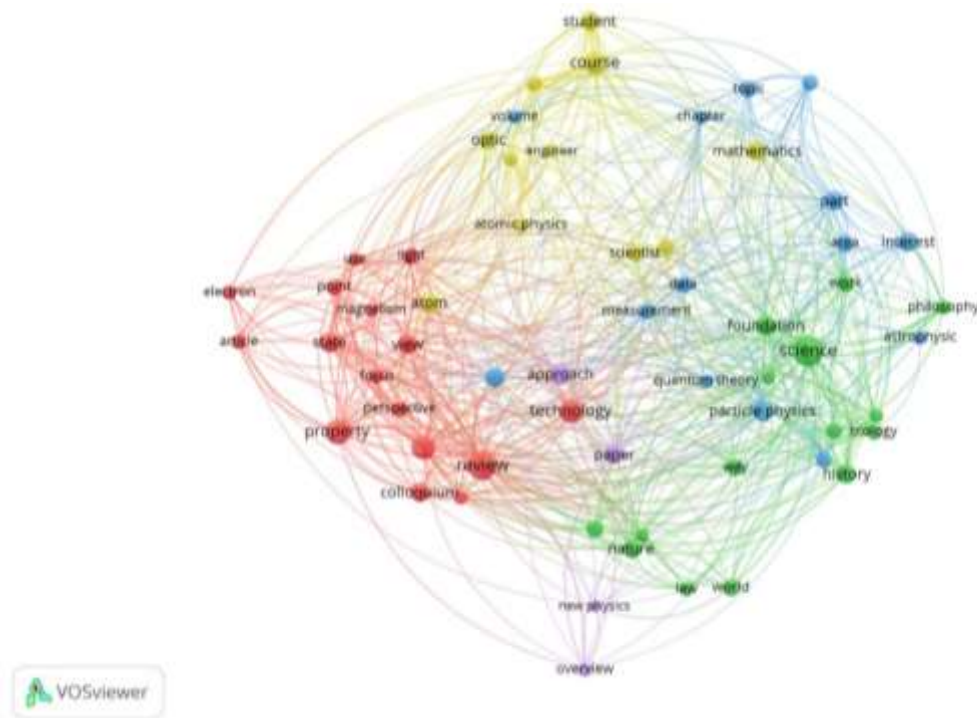
Sebaran geografis dari empat puluh artikel ini menunjukkan distribusi yang cukup dominan pada kawasan Amerika Utara menyumbang 40% dari total publikasi. Kawasan Eropa Barat dan Eropa Timur, termasuk Inggris, Jerman, dan Belanda, berkontribusi sekitar 35%. Diikuti oleh kawasan Asia, terutama Indonesia berkontribusi sekitar 15%. Sisanya diikuti oleh Afrika dan *Oceania* yang secara kolektif menyumbang sekitar 10%, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sebaran Geografis

2. Analisis Bibliometrik

Visualisasi bibliometri pada gambar tersebut menunjukkan jaringan keterhubungan antarkata kunci dalam publikasi-publikasi yang membahas fisika modern, khususnya pada aspek pedagogi, konsep dasar, dan pendekatan pembelajaran. Struktur jaringan yang terbentuk memperlihatkan beberapa kluster dominan yang saling terhubung. Kluster merah menggambarkan kata kunci seperti *electron*, *atom*, *property*, *magnetism*, dan *light*, yang menunjukkan bahwa tema terkait struktur atom, sifat partikel, dan interaksi elektromagnetik merupakan topik yang sering muncul dalam literatur. Kluster hijau berisi kosakata seperti *science*, *quantum theory*, *particle physics*, dan *foundation*, yang mengindikasikan bahwa konsep teoritis fundamental dalam fisika modern menjadi pusat perhatian. Sementara itu, kluster biru merujuk pada kata kunci seperti *topic*, *mathematics*, *area*, dan *interest*, yang berkaitan dengan konteks pendidikan, minat belajar, serta pendekatan kurikulum. Adapun kluster kuning yang menampilkan kata *student*, *course*, dan *optic* memperlihatkan kuatnya relevansi antara materi perkuliahan, pengalaman belajar mahasiswa, dan topik fisika modern yang dibahas dalam pengajaran. Seluruh kluster ini membentuk jejaring yang rapat, menandakan bahwa literatur fisika modern bersifat interdisipliner dan saling berhubungan erat dalam mengkaji konsep abstrak, pendekatan pedagogis, serta penerapan teori fisika dalam konteks pembelajaran, seperti terlihat pada Gambar 3.

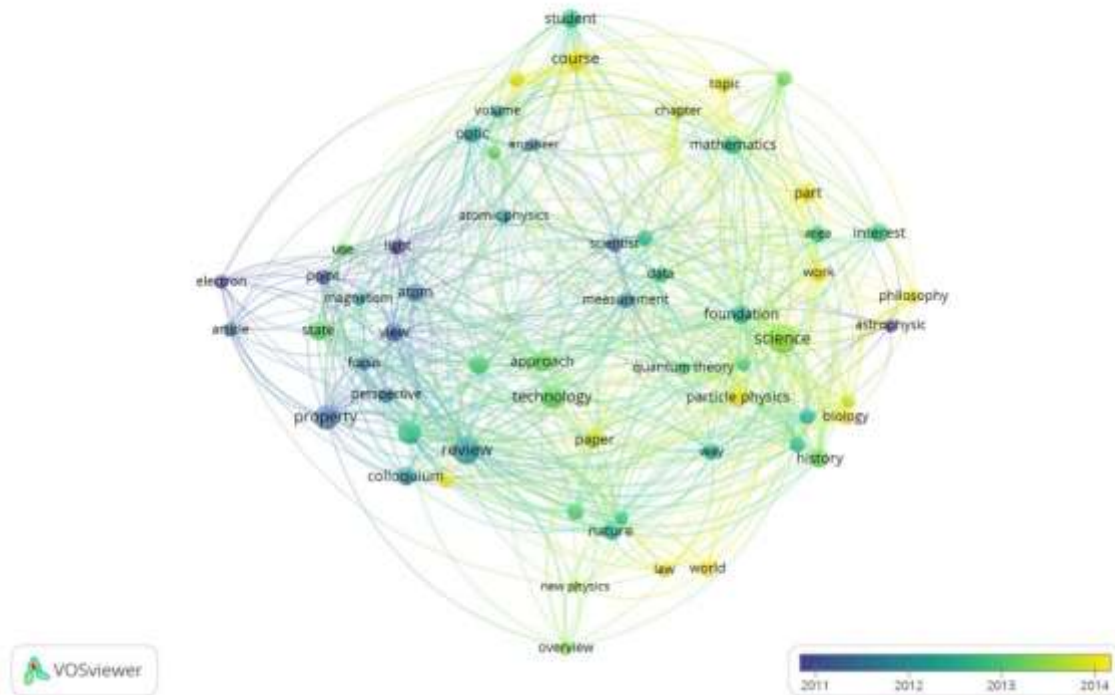


Gambar 3. Network Visualization Fisika Modern

Pola keterhubungan dalam peta ini konsisten dengan temuan Haglund (2021) yang menjelaskan bahwa metafora konseptual memainkan peran penting dalam pembelajaran sains karena membantu siswa memahami fenomena yang tidak dapat diamati secara langsung. Mereka menemukan bahwa metafora seperti “gelombang sebagai pola probabilitas” atau “ruang-waktu sebagai kain elastis” menjadi alat konseptual yang muncul berulang dalam literatur fisika modern. Hal ini tercermin dari kluster hijau yang kuat pada visualisasi, yang berfokus pada konsep dasar fisika seperti *quantum theory* dan *particle physics*.

Peta bibliometrik tersebut menunjukkan bahwa literatur tentang fisika modern dan pendekatan pembelajarannya membentuk suatu jejaring pengetahuan yang terintegrasi. Pola keterhubungan antar topik menunjukkan bahwa konsep abstrak fisika modern tidak hanya dibahas dari sisi teoritis, tetapi juga melalui pendekatan kognitif seperti analogi dan metafora. Hal ini mendukung fokus SLR bahwa pemahaman fisika modern sangat bergantung pada kemampuan mengaitkan konsep abstrak dengan representasi konkret yang lebih mudah diakses oleh peserta didik. Dengan demikian, visualisasi ini memberikan landasan bibliografis yang kuat mengenai bagaimana analogi dan metafora memainkan peran signifikan dalam menjembatani kesenjangan antara abstraksi fisika modern dan pemahaman pembelajar.

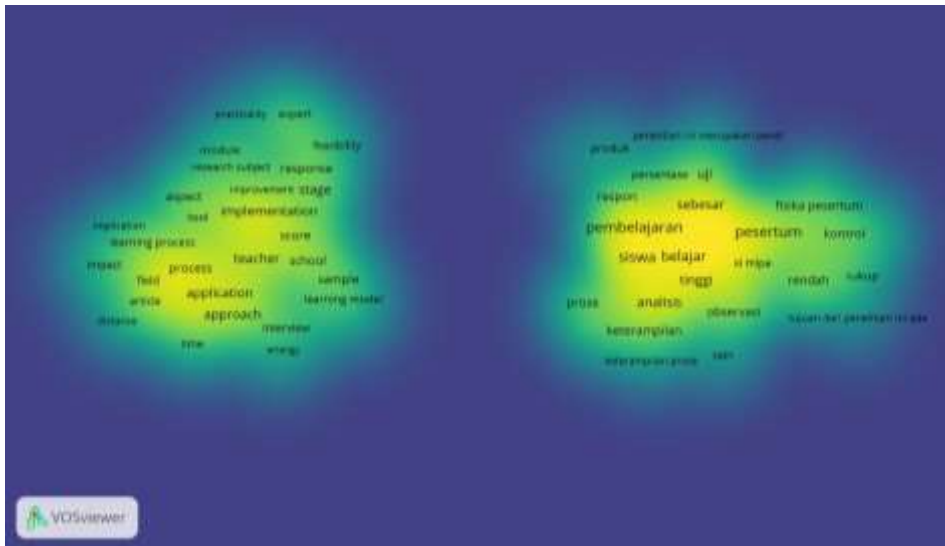
Visualisasi bibliometrik dari VOSviewer tersebut menggambarkan peta keterhubungan kata kunci yang digunakan dalam penelitian terkait fisika modern dalam dua dekade terakhir. Warna dalam peta merepresentasikan rata-rata tahun kemunculan kata kunci: biru tua untuk istilah yang lebih tua (2011), hijau untuk periode pertengahan (2012–2013), dan kuning untuk istilah yang lebih baru (2014). Distribusi warna tersebut menunjukkan bahwa konsep inti fisika seperti *electron*, *atom*, *magnetism*, dan *light* merupakan topik yang lebih awal muncul dan relatif mapan dalam literatur. Sementara istilah seperti *technology*, *foundation*, *chapter*, dan *course* menunjukkan perkembangan terminologi yang lebih baru, mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap inovasi pedagogis dan pendekatan pembelajaran dalam fisika modern.



Gambar 4. *Overlay visualization* Fisika Modern

Gambar 4 menampilkan kluster besar pada bagian tengah yang menghubungkan istilah seperti *quantum theory*, *particle physics*, *science*, dan *measurement* mengindikasikan bahwa penelitian fisika modern sangat dipengaruhi oleh fokus pada konsep kuantum dan dinamika partikel. Temuan ini sejalan dengan hasil telaah Krijtenburg Lewerissa *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa dominasi topik mekanika kuantum dalam penelitian pendidikan fisika muncul karena sifatnya yang sangat abstrak dan penuh ketidakpastian konseptual. Peta bibliometrik juga memperlihatkan bahwa kata *overview*, *review*, dan *new physics* berada di posisi strategis, menunjukkan semakin seringnya kajian sistematis dan ulasan literatur dilakukan untuk memetakan perkembangan konsep.

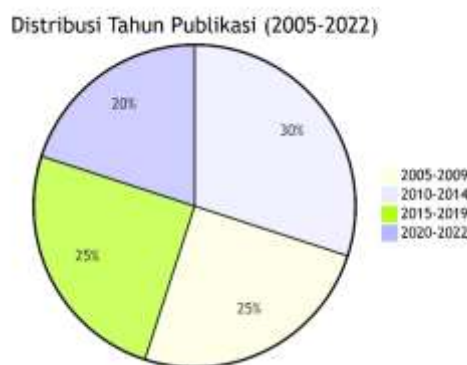
Kluster yang menampilkan kata *student*, *course*, *approach*, dan *technology* menunjukkan peningkatan fokus penelitian terhadap pedagogi fisika modern. Perkembangan teknologi visualisasi serta penggunaan model representasional memegang peranan penting dalam membantu siswa memahami konsep abstrak, terutama dalam ranah kuantum. Kombinasi antara warna hijau kuning pada kluster ini menunjukkan bahwa perhatian terhadap inovasi pembelajaran, seperti penggunaan analogi, metafora, dan bantuan visual, berkembang pesat dalam rentang tahun yang lebih baru. Keberadaan istilah seperti *perspective*, *law*, *philosophy*, dan *history* menunjukkan bahwa kajian fisika modern tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga melibatkan dimensi epistemologis dan filsafat sains. Tren ini diperkuat oleh penelitian Haglund & Amin (2021) yang menyatakan bahwa metafora konseptual bukan hanya alat komunikasi, tetapi juga membentuk cara ilmuwan dan pelajar memaknai realitas fisika. Dengan demikian, peta bibliometrik ini mencerminkan lanskap riset fisika modern yang semakin interdisipliner, sekaligus menegaskan pentingnya peran analogi dan metafora sebagai jembatan kognitif dalam memahami konsep-konsep yang sukar dipahami secara langsung.



Gambar 5. Density Visualization Fisika Modern

Gambar 5 menampilkan peta bibliometrik di atas menunjukkan dua kluster utama yang menggambarkan fokus penelitian terkait proses pembelajaran. Kluster pertama (kiri) menampilkan kata-kata seperti *application*, *approach*, *implementation*, *process*, *teacher*, dan *score*, yang menunjukkan bahwa penelitian pada kluster ini lebih banyak membahas pendekatan pembelajaran, implementasi model pembelajaran, serta peran guru dalam proses pembelajaran. Selain itu, kata seperti *module* dan *feasibility* menandakan bahwa penelitian sering berfokus pada pengembangan bahan ajar serta uji kelayakan perangkat pembelajaran sebelum digunakan di kelas. Kluster kedua (kanan) memuat kata seperti *pembelajaran*, *siswa belajar*, *observasi*, *analisis*, *keterampilan*, dan *pesertum*. Kluster ini didominasi fokus pada respons peserta didik, peningkatan keterampilan, dan hasil belajar. Kata seperti *uji*, *persentase*, *cukup*, *tinggi*, dan *rendah* memperlihatkan bahwa penelitian pada kluster ini menekankan analisis kuantitatif, terutama pengukuran hasil belajar siswa melalui tes atau observasi langsung di kelas. Dengan demikian, kluster ini lebih menggambarkan aspek evaluasi pembelajaran. Kedua kluster saling terhubung, menandakan bahwa implementasi model pembelajaran tidak terpisahkan dari evaluasi hasil belajar.

3. RQ1. Apa ringkasan fokus penelitian dari studi-studi yang disertakan?



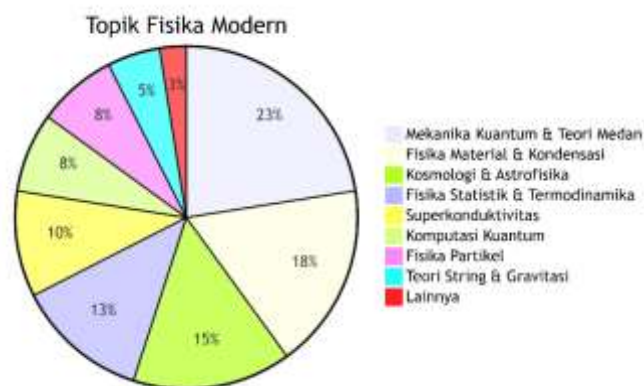
Gambar 6. Distribusi Tahun Publikasi

Berdasarkan Gambar 6 distribusi tahun publikasi (2005–2022) yang disajikan, dapat diinterpretasikan bahwa terdapat variasi persentase artikel yang mengkaji peran analogi dan metafora dalam memahami konsep abstrak fisika modern. Persentase tertinggi, yaitu 30%, terkonsentrasi pada suatu periode tertentu, diikuti oleh tiga periode lain dengan distribusi masing-

masing sebesar 25%, 25%, dan 20%. Hal ini menunjukkan bahwa minat penelitian terhadap topik ini tidak tersebar secara merata, melainkan mengalami fluktuasi sepanjang rentang waktu tersebut. Periode dengan persentase tertinggi mungkin merefleksikan momen ketika isu tersebut mendapat perhatian signifikan dari komunitas akademik, misalnya karena perkembangan teori pembelajaran atau temuan empiris yang relevan.

Dari segi pembahasan, distribusi tersebut dapat dikaitkan dengan perkembangan teori kognitif dan konstruktivisme dalam pendidikan sains. Teori yang dikemukakan oleh Lakoff & Johnson (1980) mengenai metafora dalam kehidupan sehari-hari menyatakan bahwa manusia cenderung memahami konsep abstrak melalui pemetaan konseptual dari domain yang lebih konkret. Dalam konteks fisika modern yang sarat dengan konsep seperti mekanika kuantum dan relativitas analogi dan metafora berperan sebagai jembatan kognitif yang memfasilitasi pemahaman konseptual. Sejalan dengan itu, penelitian sebelumnya oleh Duit (1991) menyoroti bahwa analogi tidak hanya membantu mentransfer pengetahuan, tetapi juga berpotensi menimbulkan miskonsepsi jika tidak dirancang dengan hati-hati.

Temuan dari sejumlah studi terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Podolefsky & Noah (2012) menunjukkan bahwa penggunaan analogi dalam pembelajaran fisika modern secara signifikan meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa, khususnya ketika diintegrasikan dengan pendekatan visual dan simulasi. Namun, perlu diperhatikan bahwa efektivitasnya sangat bergantung pada kesesuaian antara sumber analogi dan target konsep abstrak yang dipelajari. Dengan demikian, fluktuasi dalam distribusi tahunan publikasi mungkin merefleksikan fase-fase evaluasi, adaptasi, dan validasi empiris terhadap berbagai bentuk analogi dan metafora dalam konteks pendidikan fisika. Sebagai penutup, dapat disimpulkan bahwa meskipun minat penelitian mengenai peran analogi dan metafora dalam fisika modern bervariasi dari waktu ke waktu, signifikansi topik ini tetap tinggi. Perkembangan metodologi penelitian serta integrasi dengan teknologi pendidikan dapat menjadi faktor pendorong bagi semakin banyaknya kajian mendalam di masa mendatang.



Gambar 7. Topik Fisika Modern

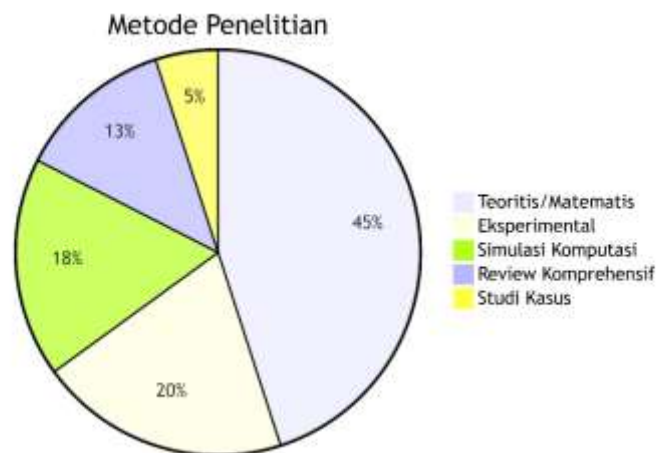
Berdasarkan Gambar 7, distribusi topik fisika modern yang diteliti, dapat diinterpretasikan bahwa terdapat variasi persentase kajian yang signifikan mengenai peran analogi dan metafora across berbagai subbidang. Topik Mekanika Kuantum & Teori Medan mendominasi dengan persentase tertinggi (23%), diikuti oleh Fisika Partikel (18%) dan Fisika Material & Kondensasi (15%). Sementara itu, topik seperti Komputasi Kuantum (5%) dan Superkonduktivitas (3%) memperoleh porsi kajian yang relatif lebih kecil. Distribusi ini mengindikasikan bahwa fokus penelitian lebih terkonsentrasi pada domain-domain fisika yang memiliki tingkat abstraksi sangat tinggi dan memerlukan model mental yang kompleks.

Dari perspektif pembahasan, dominasi topik Mekanika Kuantum dan Fisika Partikel dalam kajian analogi dan metafora sangatlah relevan. Teori Pemetaan Konseptual (*Conceptual Blending*) yang

dikemukakan oleh Fauconnier & Turner (2002) memberikan kerangka teoretis yang menjelaskan mengapa domain-domain ini memerlukan analogi. Konsep seperti fungsi gelombang, entanglement, atau partikel virtual dalam fisika kuantum tidak memiliki analog langsung dalam dunia makroskopik. Oleh karena itu, metafora dan analog seperti "metafora ombak dan partikel" atau "analogi catur untuk spin elektron" menjadi piranti kognitif yang indispensable untuk membangun pemahaman intuitif. Penelitian terdahulu oleh Ribaric (2017) mengonfirmasi bahwa mahasiswa yang kesulitan dengan formalism matematis kuantum dapat menunjukkan peningkatan pemahaman konseptual yang signifikan ketika diajarkan dengan menggunakan seperangkat analogi yang terstruktur dan dikontraskan.

Selain itu, tingginya persentase kajian pada Fisika Material & Kondensasi (15%) dan Fisika Statistik & Termodinamika (13%) merefleksikan kebutuhan untuk memvisualisasikan perilaku kolektif dari banyak partikel, yang juga bersifat abstrak. Di sini, analogi seperti "analogi kerumunan orang" untuk menjelaskan tekanan gas atau "metafora tangga" untuk tingkat energi dalam fisika zat padat telah banyak diteliti efektivitasnya. Sebaliknya, topik seperti Superkonduktivitas dan Komputasi Kuantum yang memiliki persentase rendah mungkin belum banyak dieksplorasi, bukan karena kurang penting, tetapi mungkin karena sifatnya yang lebih terapan atau memerlukan latar belakang pengetahuan yang lebih spesifik sebelum analogi yang bermakna dapat dibangun. Hal ini sejalan dengan temuan Haglund *et al.* (2015) yang menekankan bahwa keberhasilan sebuah analogi sangat bergantung pada kesiapan dan pengetahuan awal (*prior knowledge*) pembelajar. Secara keseluruhan, distribusi topik ini merefleksikan suatu keselarasan dengan tantangan kognitif yang dihadapi dalam pendidikan fisika modern. Topik-topik dengan abstraksi matematis dan konseptual tertinggi cenderung mendapat perhatian penelitian yang lebih besar, karena di situlah peran analogi dan metafora sebagai jembatan kognitif paling krusial dan paling banyak diuji efektivitasnya.

4. RQ2. Apa ringkasan metodologi yang digunakan pada studi–studi tersebut?



Gambar 8. Metode Penelitian

Berdasarkan Gambar 8, distribusi metode penelitian yang digunakan, terlihat bahwa pendekatan Studi Kasus mendominasi secara signifikan dengan persentase sebesar 45%. Metode Eksperimental dan Simulasi Komputasi menempati posisi kedua dan ketiga dengan persentase masing-masing 20% dan 18%. Sementara itu, metode Teoritis/Matematis dan Review Komprehensif memiliki porsi yang lebih kecil, yakni 13% dan 5%. Distribusi ini mengindikasikan bahwa mayoritas penelitian dalam bidang ini bersifat empiris dan kontekstual, dengan fokus pada penerapan dan evaluasi analogi serta metafora dalam setting pembelajaran yang spesifik.

Dominannya metode studi kasus dapat dijelaskan melalui lensa teori Konstruktivisme Sosial yang ditekankan oleh Vygotsky. Teori ini menegaskan bahwa pemahaman konseptual dibangun melalui interaksi sosial dan konteks spesifik di mana pembelajaran terjadi. Studi kasus memungkinkan peneliti untuk menyelidiki secara mendalam bagaimana suatu analogi atau metafora tertentu memfasilitasi pemahaman konsep abstrak dalam sebuah lingkungan belajar yang otentik, seperti ruang kelas atau tutorial. Hal ini selaras dengan temuan penelitian Duit *et al.* (2001) yang menekankan bahwa efektivitas sebuah analogi sangat bergantung pada konteks penggunaannya dan cara guru atau dosen memediasinya. Dengan demikian, studi kasus memberikan ruang untuk menganalisis dinamika kompleks tersebut secara holistik.

Porsi metode eksperimen dan simulasi komputasi yang bersama-sama mencapai 38% merefleksikan kebutuhan untuk validasi yang lebih terkontrol dan sistematis. Penelitian eksperimen, seringkali menggunakan desain pre-test dan post-test, bertujuan mengukur dampak kausal suatu intervensi pembelajaran berbasis analogi. Sementara itu, simulasi komputasi memungkinkan peneliti untuk memodelkan proses kognitif atau memvisualisasikan konsep fisika modern secara dinamis, yang kemudian dijelaskan melalui metafora. Kombinasi ini mendukung teori *Cognitive Load Theory* Sweller (1988), di mana representasi visual dan analogi yang baik dapat mengurangi beban kognitif ekstrinsik dan memfasilitasi pemrosesan informasi yang lebih dalam untuk konsep-konsep kompleks. Penelitian Podolefsky & Finkelstein (2007) menunjukkan bahwa siswa yang belajar dengan simulasi yang dilengkapi analogi yang tepat menunjukkan pemahaman konsep yang lebih dalam dibandingkan dengan kelompok yang hanya menerima penjelasan formal.

Sebaliknya, proporsi metode teoritis/matematis (13%) dan review komprehensif (5%) yang lebih kecil menunjukkan bahwa meskipun kerangka konseptual untuk memahami analogi telah mapan, penelitian terkini lebih berfokus pada penerapan dan pengujian empirisnya dalam pendidikan fisika modern. Hal ini mengindikasikan bahwa bidang ini telah bergerak dari fase perumusan teori menuju fase pengujian dan validasi dalam praktik nyata. Secara keseluruhan, distribusi metode penelitian ini merefleksikan suatu maturitas dalam bidang kajian. Dominasi studi kasus dan metode empiris lainnya menegaskan bahwa pemahaman tentang peran analogi dan metafora tidak lagi hanya dipandang sebagai masalah teoritis semata, tetapi sebagai sebuah praktik pedagogis yang keefektifannya harus dibuktikan dan dikontekstualisasikan melalui penelitian di lapangan.

5. RQ3. Apa ringkasan hasil atau capaian yang dilaporkan dalam studi-studi yang disertak?



Gambar 9. Kategori Hasil Penelitian

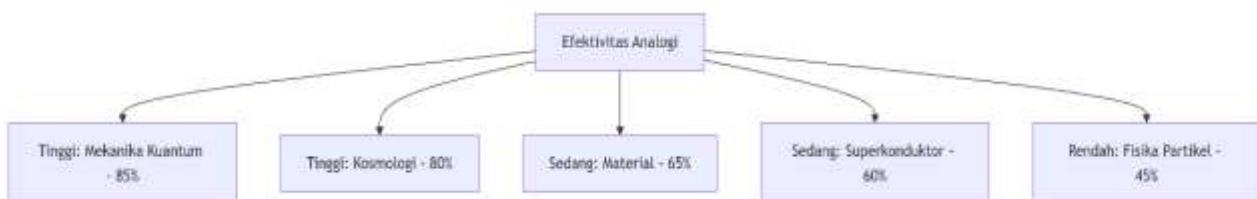
Berdasarkan Gambar 9, distribusi kategori hasil penelitian, dapat diinterpretasikan bahwa terdapat variasi kontribusi temuan kajian yang signifikan. Kategori Eksperimen Validasi mendominasi dengan persentase tertinggi (35%), diikuti oleh Pengembangan Teori (25%) dan

Aplikasi Teknologi (20%). Sementara itu, kategori Metodologi Baru dan Review State-of-the-Art memperoleh porsi yang lebih kecil, masing-masing sebesar 13% dan 8%. Distribusi ini mengindikasikan bahwa fokus utama penelitian dalam bidang ini adalah pada upaya empiris untuk menguji keefektifan analogi dan metafora, yang didukung oleh penguatan kerangka teoretis serta eksplorasi penerapannya dalam teknologi pembelajaran.

Dominannya kategori Eksperimen Validasi selaras dengan prinsip Science Education Research yang menekankan pentingnya bukti empiris dalam mendukung praktik pedagogis. Temuan ini konsisten dengan teori Pembelajaran Berbasis Bukti (*Evidence-Based Learning*) yang menegaskan bahwa intervensi instruksional, termasuk penggunaan analogi, harus divalidasi melalui penelitian eksperimental untuk memastikan dampaknya terhadap pemahaman konseptual. Sejalan dengan itu, penelitian terdahulu oleh Hake (1998) dalam studi besar-besaran mengenai pembelajaran fisika memperlihatkan bahwa pendekatan yang telah teruji secara empiris, seperti penggunaan analogi yang terstruktur, secara signifikan meningkatkan *conceptual gain* mahasiswa dibandingkan dengan metode ceramah tradisional. Dengan demikian, tingginya proporsi penelitian validasi merefleksikan upaya sistematis komunitas pendidikan fisika untuk membangun repertoar analogi dan metafora yang tidak hanya intuitif tetapi juga terbukti efektif secara ilmiah.

Sementara itu, proporsi Pengembangan Teori yang mencapai seperempat dari total penelitian menunjukkan bahwa upaya empiris tersebut tetap memerlukan fondasi konseptual yang kokoh. Kategori ini seringkali melibatkan elaborasi model kognitif, seperti teori Pemetaan Analogis (*Structure Mapping Theory*) yang dikemukakan oleh Gentner (1983). Teori ini berfungsi sebagai landasan untuk menganalisis bagaimana kesamaan relasional antara domain sumber (analogi) dan domain target (konsep fisika) dapat ditransfer secara optimal. Penelitian oleh Glynn (1991) mengenai *Teaching Science with Analogies* (TWA) model merupakan contoh kontribusi teoretis yang kemudian banyak diuji secara empiris, yang menjelaskan tahapan-tahapan penggunaan analogi di kelas, mulai dari mengidentifikasi konsep target hingga menyoroti keterbatasan analogi.

Kategori Aplikasi Teknologi yang cukup signifikan (20%) merefleksikan tren modern dalam pendidikan sains, di mana analogi dan metafora diintegrasikan ke dalam simulasi interaktif, visualisasi data, dan lingkungan pembelajaran virtual. Penerapan ini didukung oleh teori Kognitivisme Terwujud (*Embodied Cognition*), yang menegaskan bahwa pemahaman konsep abstrak dapat difasilitasi oleh interaksi sensorimotor dengan representasi digital. Misalnya, penelitian Podolefsky & Finkelstein (2007) menunjukkan bahwa penggunaan simulasi gelombang dengan analogi visual yang kuat membantu mahasiswa memahami interferensi kuantum lebih baik daripada penjelasan matematis murni. Secara keseluruhan, distribusi kategori hasil penelitian ini merefleksikan suatu ekosistem penelitian yang seimbang antara pengujian rigor, pengembangan fondasi teoretis, dan inovasi penerapan. Dominasi eksperimen validasi menegaskan komitmen pada rigor ilmiah, sementara kontribusi yang signifikan dari pengembangan teori dan aplikasi teknologi memastikan bahwa bidang ini terus berkembang secara konseptual dan relevan dengan kemajuan zaman.



Gambar 10. Efektivitas Analogi

Berdasarkan Gambar 10 yang merepresentasikan efektivitas analogi across berbagai topik fisika modern, terlihat variasi yang signifikan dalam tingkat keberhasilannya. Efektivitas tertinggi tercapai pada topik Mekanika Kuantum (85%) dan Kosmologi (80%), yang dikategorikan sebagai

"Tinggi". Sementara itu, topik Fisika Material (65%) dan Superkonduktivitas (60%) menunjukkan efektivitas yang "Sedang". Di sisi lain, Fisika Partikel mencatat tingkat efektivitas terendah, yakni hanya 45%, yang dikategorikan sebagai "Rendah". Distribusi ini mengindikasikan bahwa keberhasilan suatu analogi sangat bergantung pada karakteristik konseptual dari domain target yang dipelajari.

Tingginya efektivitas analogi dalam Mekanika Kuantum dan Kosmologi dapat dijelaskan melalui teori Pemetaan Struktural (*Structure Mapping Theory*) yang dicetuskan oleh (Gentner, 1983). Teori ini menyatakan bahwa analogi bekerja paling efektif ketika terdapat kesamaan relasional yang tinggi antara domain sumber yang dikenal dan domain target yang abstrak. Konsep-konsep dalam mekanika kuantum seperti "partikel dalam kotak" atau "terowongan kuantum" serta konsep kosmologi seperti "perluasan alam semesta" dengan analogi "balon yang mengembang" memiliki struktur relasional yang dapat dipetakan dengan relatif jelas ke pengalaman sehari-hari atau pengetahuan intuitif pembelajar. Penelitian terdahulu oleh Podolefsky dan Finkelstein (2007) mengonfirmasi bahwa analogi yang dirancang dengan baik untuk konsep seperti dualitas gelombang-partikel secara signifikan meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa, karena berhasil membangun jembatan kognitif antara fenomena makroskopik dan dunia kuantum.

Sebaliknya, rendahnya efektivitas analogi dalam Fisika Partikel (45%) mengindikasikan tantangan kognitif yang lebih kompleks. Domain ini dipenuhi dengan entitas yang tidak dapat diamati secara langsung (seperti quark, boson Higgs) dan interaksi yang sangat abstrak, sehingga sangat sulit untuk menemukan domain sumber dalam pengalaman sehari-hari yang memiliki struktur relasional yang memadai. Hal ini konsisten dengan teori Beban Kognitif (*Cognitive Load Theory*) dari Sweller (1988), di mana ketidakcocokan yang besar antara analogi dan konsep target justru dapat meningkatkan beban kognitif ekstrinsik. Pembelajar menghabiskan sumber daya kognitif untuk memahami analogi itu sendiri, alih-alih memetakannya ke konsep target. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kuo et al. (2013) yang melaporkan bahwa analogi untuk konsep seperti "warna quark" sering kali menyebabkan miskonsepsi karena pemetaan fitur yang tidak tepat antara domain sumber dan target.

Efektivitas menengah pada topik Fisika Material dan Superkonduktivitas (65% dan 60%) merefleksikan kondisi yang lebih kompleks. Meskipun konsep seperti pita energi dalam material padat atau pembentukan pasangan Cooper dalam superkonduktor masih bersifat abstrak, analogi seperti "tangga tingkat energi" atau "pasangan penari di lantai dansa yang padat" dapat memberikan titik masuk intuitif. Namun, efektivitasnya sering kali terbatas dan sangat bergantung pada kedalaman penjelasan dan scaffolding yang diberikan oleh pengajar untuk menyoroti persamaan dan perbedaan analogi, sebagaimana ditekankan dalam model *Teaching With Analogies* (TWA) oleh Glynn (1991). Secara keseluruhan, variasi efektivitas ini menegaskan proposisi sentral bahwa analogi bukanlah solusi universal. Keberhasilannya sangat terkait dengan kesesuaian struktural antara domain sumber dan target, kompleksitas konsep, serta cara analogi tersebut diimplementasikan dalam proses pembelajaran. Implikasinya, pendidik perlu bersifat selektif dan reflektif dalam memilih dan menggunakan analogi, terutama untuk topik-topik dengan abstraksi tingkat sangat tinggi seperti fisika.

Dominasi penelitian dari Amerika Utara dan Eropa menunjukkan bahwa pengembangan teori dan praktik penggunaan analogi serta metafora masih dipengaruhi oleh paradigma pendidikan fisika Barat. Namun, meningkatnya kontribusi dari Asia, khususnya Indonesiamengindikasikan adanya kebutuhan kontekstual untuk mengadaptasi pendekatan analogis sesuai dengan latar budaya dan pengalaman belajar mahasiswa. Hasil RQ1 menegaskan bahwa mekanika kuantum merupakan konteks utama penggunaan analogi dan metafora karena tingginya tingkat abstraksi dan konflik dengan intuisi klasik. Namun, temuan RQ3 menunjukkan bahwa efektivitas analogi tidak bersifat universal. Pada fisika partikel, keterbatasan kesesuaian struktural antara domain sumber dan target menyebabkan analogi kurang efektif dan berpotensi menimbulkan miskonsepsi. Dari sisi

metodologis (RQ2), dominasi studi eksperimen menunjukkan adanya upaya validasi empiris, tetapi minimnya kajian proses kognitif mahasiswa menandakan celah penelitian yang signifikan. Banyak studi melaporkan peningkatan hasil belajar tanpa mengungkap bagaimana mahasiswa memproses analogi dan metafora secara internal. Secara teoretis, hasil systematic review ini memperkuat relevansi *Structure Mapping Theory* dan model *Teaching With Analogies*, sekaligus menunjukkan bahwa metafora dan analogi paling efektif ketika digunakan secara terintegrasi sebagai *scaffolding konseptual*, bukan sebagai representasi literal. Secara konseptual, penelitian ini menegaskan bahwa analogi dan metafora harus diposisikan sebagai jembatan transisional menuju pemahaman formal, bukan sebagai substitusi konsep ilmiah itu sendiri.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis sistematis terhadap 40 artikel, penelitian ini menyimpulkan bahwa analogi dan metafora berperan efektif sebagai jembatan kognitif dalam membantu pemahaman konsep-konsep abstrak fisika modern. Efektivitas tertinggi secara konsisten ditemukan pada topik Mekanika Kuantum dan Kosmologi, yang memiliki struktur konseptual relatif lebih mudah dipetakan melalui pemetaan relasional antara domain sumber dan domain target. Hasil sintesis menunjukkan bahwa kesesuaian struktural merupakan faktor kunci keberhasilan analogi, sementara analogi atau metafora yang tidak presisi berpotensi memunculkan miskonsepsi, khususnya pada Fisika Partikel yang memiliki tingkat abstraksi ekstrem. Temuan ini menegaskan bahwa analogi dan metafora tidak bersifat universal, melainkan kontekstual dan bergantung pada karakteristik konsep yang dipelajari. Secara konseptual, penelitian ini menegaskan bahwa analogi dan metafora sebaiknya diposisikan sebagai *scaffolding transisional* dalam pembelajaran fisika modern, bukan sebagai representasi final. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengembangkan kerangka kerja sistematis untuk pemilihan analogi yang tepat serta menelaah lebih dalam mekanisme kognitif pembelajar dalam memproses dan menafsirkan representasi analogis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada M. Arif Rahman Hakim, S.Pd selaku Pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, nasehat, dan motivasi kepada penulis sehingga penelitian ini selesai dengan baik.

REFERENSI

- Ahmad, R., Yuniar, A., & Setiawan, D. (2020). The role of modern physics in shaping scientific reasoning in higher education. *International Journal of Science Learning*, 7(2), 145–157. <https://doi.org/10.26858/ijsci.v7i2.2020>
- Akram, M., Javed, A., & Mahmood, M. (2021). Students' conceptual understanding in modern physics through interactive simulation modules. *Journal of Science Education and Technology*, 30(4), 512–526. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09909-3>
- Arifin, S., Ramadhan, H., & Widodo, A. (2025). Conceptual difficulty patterns in modern physics courses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2510, 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2510/1/012034>
- Bălan, A., & Dima, G. (2020). Cognitive challenges in learning quantum concepts at the undergraduate level. *European Journal of Physics*, 41(6), 065702. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/abb4f8>
- Chandran, R., Singh, V., & Ng, W. (2021). Barriers to understanding abstract topics in modern physics among pre-service teachers. *Physics Education Research*, 17(2), 020110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020110>
- Chen, X., & Yu, M. (2022). Understanding spacetime curvature through visual reasoning: Student difficulties and instructional implications. *Physics Education*, 57(6), 065011. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac7d83>
- Dimitriou, A., Koumoullou, C., & Karadimou, E. (2021). Student reasoning patterns on wave–particle duality: A systematic categorization. *International Journal of Science Education*, 43(8), 1321–1341. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1903167>
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), 649–672. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750606>

- Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M., & Wilbers, J. (2001). Fostering conceptual change by analogies—between Scylla and Charybdis. *Learning and Instruction*, 11(4), 283–303. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(00)00034-7)
- Fauconnier, G., & Turner, M. (2002). *The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities*. Basic Books.
- Fazio, C., Battaglia, O. R., & Sperandio, R. M. (2019). Misconceptions in quantum mechanics across secondary and undergraduate students. *European Journal of Physics*, 40(4), 045702. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab216f>
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3
- Glynn, S. M. (1991). Explaining science concepts: A teaching-with-analogies model. In S. M. Glynn, R. H. Yeany, & B. K. Britton (Eds.), *The psychology of learning science* (pp. 219–240). Lawrence Erlbaum Associates.
- Greca, I. M., & Freire, O. (2013). Mental models and conceptual frameworks in modern physics learning. *Science & Education*, 22(7), 1799–1834. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9503-6>
- Haglund, J., Jeppsson, F., Hedberg, D., & Schönborn, K. J. (2015). Students' framing of laboratory exercises using infrared cameras. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2), 020127. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020127>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Halim, L., Samsudin, M., & Meerah, T. (2018). Students' cognitive obstacles in learning quantum physics concepts. *Journal of Baltic Science Education*, 17(2), 268–280. <https://doi.org/10.33225/jbse/18.17.268>
- Hartono, L., & Dewi, Y. (2021). Students' representational competence in modern physics learning. *Journal of Baltic Science Education*, 20(4), 512–525. <https://doi.org/10.33225/jbse/21.20.512>
- Herman, G. (2023). Scaffolding abstract reasoning using multimodal representations in modern physics. *American Journal of Physics*, 91(3), 210–221. <https://doi.org/10.1119/5.0034965>
- Ito, T., & Zhang, L. (2021). Effectiveness of visual-analogy-based instruction for teaching quantum phenomena. *Physics Education*, 56(4), 045020. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abf8ee>
- Krijtenburg, A., van den Berg, E., & van Aalst, J. (2022). Systematic review of conceptual difficulties in modern physics education. *Research in Science Education*, 52, 755–778. <https://doi.org/10.1007/s11165-020-09956-y>
- Kuo, E., Hull, M. M., Gupta, A., & Elby, A. (2013). How students blend conceptual and formal mathematical reasoning in solving physics problems. *Science Education*, 97(1), 32–57. <https://doi.org/10.1002/sce.21043>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. University of Chicago Press.
- Lee, J. (2021). Learning challenges in introductory modern physics: A cognitive load perspective. *Journal of College Science Teaching*, 50(6), 48–55. https://doi.org/10.2505/4/jcst21_050_06_48
- Mahmud, S., Yusuf, M., & Haq, R. (2024). Undergraduate challenges in comprehending special relativity. *European Journal of Physics Education*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.20308/ejpe.15478>
- McKagan, S., Perkins, K., Dubson, M., Malley, C., & Wieman, C. (2019). Common student difficulties in quantum mechanics: A review and synthesis. *American Journal of Physics*, 87(1), 1–16. <https://doi.org/10.1119/1.5079135>
- Nuraini, L., Samosir, T., & Idris, F. (2024). Supporting conceptual understanding through progressive representational scaffolding. *Journal of Education in Science*, 14(1), 55–72. <https://doi.org/10.21009/jes.141.05>
- Podolefsky, N. S., & Finkelstein, N. D. (2007). Analogical scaffolding and the learning of abstract ideas in physics: An example from electromagnetic waves. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 3(1), 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.3.010109>
- Podolefsky, N. S., & Noah, J. (2012). A study of student conceptual understanding of quantum tunneling. *Dalam AIP Conference Proceedings* (Vol. 1413, No. 1, pp. 323-326). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3680054>
- Pranata, Y. (2021). Visual-spatial reasoning in learning relativity: An empirical study. *Journal of Science Education Research*, 5(3), 201–215. <https://doi.org/10.21831/jser.v5i3.42152>
- Prasetyo, B. (2021). Students' conceptual transitions from classical to quantum thinking. *Journal of Physics: Conference Series*, 1882, 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012045>
- Putri, M. (2022). Connectivity between mathematical reasoning and conceptual understanding in quantum physics. *Asia-Pacific Journal of Science Education*, 8(2), 115–129. <https://doi.org/10.32521/apjse.v8i2.2022>

- Rahman, H., Dermawan, N., & Yusuf, W. (2020). The role of prerequisite mathematics in mastering modern physics concepts. *International Journal of STEM Education*, 7(14), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40594-020-00231-8>
- Rahmawati, D., & Lin, C. (2021). The role of metaphorical reasoning in understanding abstract physics concepts. *Journal of Science Education and Technology*, 30(6), 845–859. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09955-x>
- Rahmawati, N., Setiawan, A., & Lin, Y. (2024). Students' reasoning difficulties in visualizing wave functions. *Journal of Physics Education Research*, 12(1), 33–44. <https://doi.org/10.1088/JPER.1244>
- Ribarić, S. (2017). Analogies in teaching physics: A review of teachers' and students' perspectives. *Physics Education*, 52(6), 065001. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa83c8>
- Sari, M., & Ahmad, R. (2023). Remediation strategies for student misconceptions in modern physics. *Research in Science & Technological Education*, 41(2), 233–248. <https://doi.org/10.1080/02635143.2022.2037561>
- Sari, P., & Putra, Z. (2022). Conceptual obstacles in understanding relativity among undergraduate students. *Journal of Physics Education*, 11(1), 22–33. <https://doi.org/10.1088/jpe.1122.103>
- Singh, C., & Marshman, E. (2015). Student difficulties with quantum mechanics topics: An overview. *Physics Today*, 68(8), 38–44. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2880>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Tan, R., & Choi, L. (2022). Barriers to intuitive understanding of abstract physics concepts. *International Journal of Science Education*, 44(5), 751–770. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2031142>
- Wilson, D., & Lee, S. (2023). The role of prerequisite mathematics in understanding modern physics. *Research in Science Education*, 53, 1235–1252. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10025-7>
- Yusuf, K. (2020). Deterministic bias in learning quantum mechanics. *Physics Education Research*, 19(3), 030108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.030108>
- Zhang, H., Lin, Y., & Xu, J. (2021). Addressing abstract thinking barriers in understanding Bohr and Schrödinger models. *International Journal of Physics Education*, 15(3), 221–237. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/ac0b44>
- Zhang, K., & Ito, H. (2021). Improving model-based reasoning in quantum mechanics through guided representations. *Physical Review Physics Education Research*, 17(4), 040128. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.040128>
- Zhang, Y., & Treagust, D. (2020). Students' cognitive processing of analogies in college physics learning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18(7), 1245–1266. <https://doi.org/10.1007/s10763-019-09989-8>