

PENERAPAN TEOREMA STOKES DALAM TEKNOLOGI MODERN: TINJAUAN PUSTAKA SISTEMATIS BERBASIS PRISMA

Aldi Prayoga¹, Kayla Azzakia², Salsa Bila³, Hamdi Akhsan⁴, Wardah Amalia⁵

1,2) Pendidikan Fisika, Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sriwijaya, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
<i>Article history:</i> Received: 11 Mei 2026 Revised: 18 Juni 2026 Accepted: 03 Agustus 2026	Abstrak Teorema Stokes merupakan konsep fundamental dalam kalkulus vektor yang memiliki peran penting dalam berbagai bidang fisika dan teknologi modern. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penerapan Teorema Stokes pada elektromagnetisme, dinamika fluida, aerodinamika, dan Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) berbasis PRISMA 2020. Literatur diperoleh dari database Scopus dan ScienceDirect dengan rentang publikasi tahun 2019–2025. Sebanyak 43 artikel berhasil diidentifikasi pada tahap awal dan setelah proses seleksi diperoleh 30 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan kualitatif tematik dan deskriptif kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Teorema Stokes berfungsi sebagai penghubung antara formulasi diferensial lokal dengan representasi integral global dalam berbagai sistem fisika. Dalam elektromagnetisme, teorema ini mendukung formulasi persamaan Maxwell, sedangkan pada dinamika fluida digunakan untuk menjelaskan hubungan sirkulasi dan vortisitas. Pada aerodinamika, Teorema Stokes berkontribusi dalam analisis pembentukan gaya angkat, sementara pada CFD digunakan sebagai dasar metode diskretisasi numerik untuk menjaga stabilitas dan konservasi solusi. Tren publikasi menunjukkan peningkatan signifikan pada penelitian berbasis simulasi dan komputasi setelah tahun 2020. Penelitian ini menegaskan bahwa Teorema Stokes tetap relevan sebagai dasar pengembangan teknologi simulasi modern. Kata Kunci: Teorema Stokes, CFD, elektromagnetisme, dinamika fluida, PRISMA Abstract <i>Stokes' Theorem is a fundamental concept in vector calculus that plays an important role in various fields of physics and modern technology. This study aims to identify, evaluate, and synthesize the applications of Stokes' Theorem in electromagnetism, fluid dynamics, aerodynamics, and Computational Fluid Dynamics (CFD) using a PRISMA 2020-based Systematic Literature Review (SLR). Literature data were collected from Scopus and ScienceDirect databases covering publications from 2018 to 2025. A total of 43 articles were identified initially, and 30 studies met the inclusion criteria after the screening process. The analysis employed qualitative thematic synthesis and quantitative descriptive approaches. The findings indicate that Stokes' Theorem serves as a bridge between local differential formulations and global integral representations across physical systems. In electromagnetism, it supports Maxwell's equations formulations, while in fluid dynamics it explains the relationship between circulation and vorticity. In aerodynamics, the theorem contributes to lift generation analysis, and in CFD it provides the theoretical basis for numerical discretization methods ensuring stability and conservation. Publication trends reveal a significant increase in computational and simulation-based studies after 2020. This study confirms that Stokes' Theorem remains highly relevant as a foundation for modern simulation technologies.</i> Keywords: Stokes' Theorem, CFD, electromagnetism, fluid dynamics, PRISMA
Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi oleh Universitas Dharmawangsa Artikel ini bersifat open access yang didistribusikan di bawah syarat dan ketentuan dengan Lisensi	



*Corresponding Author:*E-mail : hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

1. PENDAHULUAN

Teorema Stokes merupakan salah satu konsep penting dalam kalkulus vektor yang menghubungkan integral garis pada lintasan tertutup dengan integral permukaan dari rotasi medan vektor. Teorema ini memiliki peranan besar dalam berbagai bidang ilmu, khususnya fisika dan teknik modern, karena mampu menjembatani formulasi diferensial lokal dan representasi integral global [1]. Penerapan Teorema Stokes banyak ditemukan pada elektromagnetisme, dinamika fluida, aerodinamika, hingga metode simulasi numerik modern seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) [2].

Dalam elektromagnetisme, Teorema Stokes digunakan untuk mentransformasikan bentuk integral dan diferensial dari persamaan Maxwell sehingga memudahkan analisis pada sistem dengan geometri kompleks [3]. Pada dinamika fluida, teorema ini berkaitan erat dengan konsep sirkulasi dan vortisitas yang menjadi dasar dalam memahami pola aliran, turbulensi, serta kestabilan fluida [4]. Selain itu, dalam bidang aerodinamika, Teorema Stokes digunakan untuk menjelaskan pembentukan gaya angkat pada sayap pesawat melalui pendekatan sirkulasi [5].

Perkembangan teknologi komputasi menyebabkan penggunaan Teorema Stokes tidak hanya terbatas pada analisis teoritis, tetapi juga menjadi dasar penting dalam simulasi numerik dan pemodelan berbasis komputer. Pada metode CFD, Teorema Stokes digunakan dalam proses diskretisasi integral sehingga solusi numerik tetap memenuhi prinsip konservasi dan kestabilan [6]. Hal ini menunjukkan bahwa peran Teorema Stokes semakin signifikan dalam pengembangan teknologi modern.

Meskipun penelitian terkait Teorema Stokes telah banyak dilakukan, kajian yang mengintegrasikan penerapannya pada berbagai bidang masih sangat terbatas. Fenomena minimnya integrasi lintas bidang ini terjadi karena beberapa faktor fundamental. Pertama, kompleksitas matematis yang tinggi ketika mencoba menghubungkan konsep dari berbagai disiplin ilmu seringkali menuntut spesialisasi yang mendalam. Kedua, terdapat perbedaan paradigma metodologis yang signifikan antara bidang elektromagnetisme, dinamika fluida, dan aerodinamika, sehingga peneliti cenderung

berfokus pada domain masing-masing. Ketiga, literatur yang secara eksplisit membahas jembatan teoretis antarbidang-bidang tersebut masih sangat langka. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada satu domain tertentu sehingga belum memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan dan tren penelitian terbaru. Padahal, pemahaman tentang keterkaitan antar bidang ini sangat krusial untuk pengembangan teknologi multidisiplin modern. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis berbagai penelitian terkait penerapan Teorema Stokes menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) berbasis PRISMA 2020.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis tren penelitian terkait penerapan Teorema Stokes pada fisika dan teknologi modern, (2) mengidentifikasi pendekatan metodologis yang dominan digunakan, dan (3) menemukan tantangan serta peluang pengembangan penelitian di masa mendatang.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) berbasis pedoman PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat direproduksi [22], [23]. Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan sintesis ilmiah yang komprehensif mengenai penerapan Teorema Stokes dalam berbagai bidang fisika dan teknologi modern, khususnya elektromagnetisme, dinamika fluida, aerodinamika, dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Literatur dikumpulkan dari basis data Scopus dan ScienceDirect yang dipilih karena menyediakan artikel ilmiah bereputasi internasional dan telah melalui proses *peer-review*. Google Scholar digunakan sebagai sumber tambahan untuk memverifikasi kemungkinan adanya artikel relevan yang tidak terindeks pada kedua basis data utama.

Proses pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci dan operator Boolean sebagai berikut: (“Stokes Theorem” OR “Stokes’ Theorem”) AND (“Electromagnetism” OR “Fluid Dynamics” OR “Aerodynamics” OR “Computational Fluid Dynamics” OR “CFD” OR “Numerical Simulation”). Strategi pencarian ini dirancang secara sistematis dengan rincian total 12 kombinasi kata kunci utama, yang diperoleh dari 2 variasi istilah Teorema Stokes dikalikan dengan 6 variasi istilah domain aplikasi. Setiap

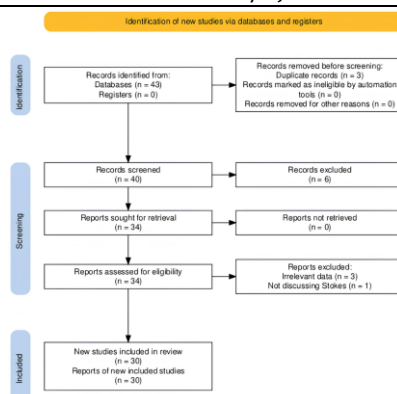
kombinasi kemudian divariasikan menggunakan operator Boolean AND untuk memastikan presisi hasil pencarian, dengan total strategi pencarian mencapai 36 variasi per basis data. Selain itu, filter tambahan diterapkan untuk membatasi hasil hanya pada artikel jurnal peer-review berbahasa Inggris. Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan dalam rentang tahun 2019–2025 agar penelitian yang dianalisis tetap relevan dengan perkembangan terbaru dalam bidang fisika komputasional dan simulasi numerik [24], [25].

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk menjaga konsistensi dan objektivitas dalam proses pemilihan artikel. Kriteria tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Jenis Kriteria	Deskripsi
Inklusi	Artikel jurnal yang telah melalui proses <i>peer-review</i>
	Diterbitkan pada tahun 2019–2025
	Ditulis dalam bahasa Inggris
	Membahas penerapan Teorema Stokes dalam konteks fisika atau teknologi
	Memuat pemodelan matematis, simulasi numerik, atau validasi eksperimental
Eksklusi	Prosiding konferensi, tesis, buku, dan laporan non-ilmiah
	Studi teoritis tanpa konteks aplikasi
	Artikel yang tidak membahas Teorema Stokes secara langsung
	Artikel dengan metodologi atau hasil penelitian yang tidak dijelaskan secara memadai

Tahapan seleksi artikel mengikuti alur PRISMA 2020 yang terdiri atas proses identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi [22], [23]. Pada tahap identifikasi diperoleh sebanyak 43 artikel dari hasil pencarian awal. Setelah dilakukan penghapusan artikel duplikat sebanyak 3 artikel, tersisa 40 artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Selanjutnya dilakukan penilaian teks penuh (*full-text assessment*) untuk mengevaluasi kesesuaian artikel dengan tujuan penelitian dan kriteria inklusi yang telah ditetapkan. Hasil akhir menunjukkan sebanyak 30 artikel memenuhi seluruh kriteria dan digunakan dalam proses sintesis data.



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA 2020 Proses Seleksi Literatur

Untuk meningkatkan objektivitas penelitian, proses seleksi dilakukan oleh dua penilai independen dan tingkat kesepakatan antarpemilai dianalisis menggunakan koefisien Cohen's Kappa. Nilai yang diperoleh sebesar $\kappa = 0,82$ menunjukkan tingkat reliabilitas yang tinggi dalam proses seleksi artikel. Selain itu, dilakukan penilaian kualitas studi berdasarkan ketelitian matematis, validasi numerik atau eksperimental, serta reproduktifitas metodologi penelitian. Kerangka penilaian kualitas studi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kerangka Penilaian Kualitas Studi

Kriteria	Deskripsi	Rentang Skor
Ketelitian Matematis	Ketepatan dan kelengkapan formulasi teoritis	0–2
Validasi	Adanya validasi numerik atau eksperimental	0–2
Reproduktifitas	Kejelasan metodologi dan kemampuan penelitian untuk direplikasi	0–2

Data dari artikel yang terpilih kemudian diekstraksi secara sistematis meliputi tahun publikasi, bidang aplikasi, pendekatan metodologis, kontribusi penelitian, serta hasil utama yang diperoleh [8], [9], [26]. Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan sintesis tematik kualitatif. Analisis kuantitatif digunakan untuk mengidentifikasi tren publikasi, distribusi bidang penelitian, dan kecenderungan metodologi yang digunakan, sedangkan sintesis kualitatif digunakan untuk mengidentifikasi pola umum, hubungan antartopik, serta tantangan dan peluang pengembangan penelitian di masa mendatang. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya pembatasan hanya pada artikel jurnal berbahasa Inggris dan

penggunaan basis data tertentu yang memungkinkan masih terdapat penelitian relevan yang tidak terindeks dalam proses pencarian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil identifikasi literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai penerapan Teorema Stokes dalam fisika dan teknologi modern mengalami perkembangan yang signifikan pada periode 2019–2025. Berdasarkan proses seleksi menggunakan pedoman PRISMA 2020 diperoleh sebanyak 30 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan digunakan dalam proses sintesis data. Artikel-artikel tersebut mencakup berbagai bidang aplikasi seperti elektromagnetisme, dinamika fluida, aerodinamika, serta *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Analisis menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian modern tidak lagi berfokus pada pembuktian teoritis semata, tetapi telah berkembang menuju pendekatan komputasional dan simulasi numerik berbasis teknologi modern [8], [9].

Peningkatan jumlah publikasi setelah tahun 2020 menunjukkan bahwa penggunaan Teorema Stokes semakin relevan dalam mendukung perkembangan simulasi numerik dan pemodelan berbasis komputer. Perkembangan ini dipengaruhi oleh meningkatnya penggunaan CFD, metode elemen hingga, serta komputasi berkinerja tinggi dalam berbagai bidang teknik dan fisika terapan [20], [26]. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa Teorema Stokes digunakan sebagai dasar transformasi antara bentuk integral dan diferensial untuk menjaga kestabilan serta konservasi numerik pada proses simulasi.



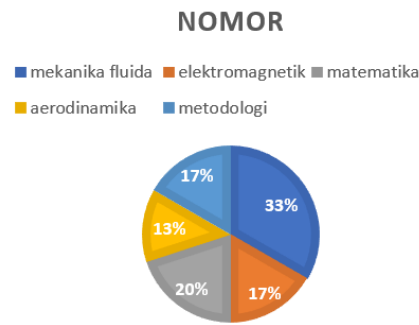
Gambar 2. Tren Publikasi Penelitian Tahun 2019–2025

Distribusi bidang penelitian menunjukkan bahwa dominasi penelitian berada pada bidang dinamika fluida dan CFD. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan Teorema Stokes memiliki keterkaitan yang sangat kuat dengan analisis aliran fluida, turbulensi, serta

simulasi numerik modern. Selain itu, bidang elektromagnetisme juga menunjukkan perkembangan signifikan karena Teorema Stokes menjadi dasar penting dalam transformasi persamaan Maxwell dari bentuk diferensial ke bentuk integral [4], [12], [30]. Pada bidang aerodinamika, Teorema Stokes digunakan dalam menjelaskan hubungan sirkulasi fluida terhadap pembentukan gaya angkat pada sayap pesawat maupun model kendaraan [6], [18], [19].

Dominasi penelitian pada bidang dinamika fluida dan Computational Fluid Dynamics (CFD) yang mencapai proporsi terbesar dalam tinjauan ini mengindikasikan pergeseran paradigma yang signifikan dalam fisika terapan. Hal ini terjadi karena Teorema Stokes memiliki keterkaitan fundamental yang sangat kuat dengan analisis aliran fluida, di mana teorema ini menyediakan jembatan matematis langsung antara formulasi diferensial lokal seperti persamaan Navier-Stokes dan representasi integral global seperti sirkulasi dan vortisitas. Selain itu, pesatnya perkembangan teknologi komputasi dan ketersediaan perangkat lunak CFD telah mendemokratisasi akses terhadap simulasi numerik kompleks. Hal ini memungkinkan lebih banyak peneliti untuk mengaplikasikan Teorema Stokes dalam konteks komputasional untuk menangani sistem dengan geometri kompleks dan kondisi batas yang sulit diselesaikan secara analitik, sehingga secara otomatis meningkatkan volume publikasi di domain ini.

Keterkaitan antarbidang dalam penerapan Teorema Stokes terlihat sangat jelas melalui pola penelitian yang teridentifikasi, meskipun seringkali bersifat implisit. Elektromagnetisme dan dinamika fluida, meskipun secara fisik merepresentasikan fenomena yang berbeda, sama-sama memanfaatkan Teorema Stokes untuk transformasi antara bentuk integral dan diferensial dalam persamaan fundamental masing-masing, yaitu persamaan Maxwell dan persamaan Navier-Stokes. Pada aerodinamika, teorema ini menjadi dasar teoretis untuk memahami mekanisme gaya angkat melalui konsep sirkulasi, yang secara matematis terkait erat dengan prinsip vortisitas dalam dinamika fluida. CFD kemudian berfungsi sebagai platform integratif yang menghubungkan semua bidang ini melalui metode diskretisasi numerik yang secara konsisten menerapkan prinsip konservasi berbasis Teorema Stokes. Namun, analisis kritis menunjukkan bahwa integrasi lintas bidang ini masih belum dieksplorasi secara eksplisit dalam sebagian besar literatur, yang mengindikasikan adanya peluang besar untuk penelitian kolaboratif multidisiplin di masa mendatang.



Gambar 3. Distribusi Penelitian Berdasarkan Bidang Kajian

Karakteristik penelitian yang dianalisis disajikan pada Tabel 3. Tabel tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan numerik, terutama pada bidang CFD dan dinamika fluida. Dominasi metode numerik menunjukkan bahwa perkembangan teknologi simulasi telah menggeser penggunaan Teorema Stokes dari pendekatan teoritis menuju implementasi komputasional. Pendekatan berbasis CFD banyak digunakan karena mampu menangani sistem dengan geometri kompleks serta kondisi batas yang sulit dianalisis secara analitik [8], [9].

Tabel 3. Ringkasan Karakteristik Studi yang Dianalisis

No	Penulis (Tahun)	Domain	Metode	Fokus Aplikasi	Kontribusi Utama
1	Mohapatra dkk. (2023)	Dinamika Fluida	Numerik	Formulasi persamaan Stokes	Peningkatan pemodelan kondisi batas
2	Miller (2021)	Dinamika Fluida	Analitis	Perilaku Navier–Stokes	Analisis batasan solusi
3	Protas (2022)	Dinamika Fluida	Numerik	Perilaku aliran ekstrem	Identifikasi singularitas
4	Mescia dkk. (2022)	Elektromagnetisme	Numerik	Pemodelan elektromagnetik	Pemodelan dispersi fraksional
5	Ghaneizadeh dan Joodaki (2024)	Elektromagnetisme	Numerik	Pemodelan metasurface	Formulasi batas lanjutan
6	Broadley dkk. (2022)	Aerodinamika	Eksperimental	Aerodinamika sayap	Mekanisme gaya angkat eksperimental
7	Liu (2023)	Aerodinamika	Analitis	Teori gaya angkat	Klarifikasi teoritis gaya angkat

No	Penulis (Tahun)	Domain	Metode	Fokus Aplikasi	Kontribusi Utama
8	Van Hoecke dkk. (2023)	CFD	Numerik	Metode CFD/FVM	Peningkatan diskretisasi numerik
9	Mani dan Dorgan (2023)	CFD	Tinjauan	CFD dirgantara	Analisis perkembangan terkini CFD
10	González (2024)	Matematika	Analitis	Pembuktian teorema Stokes	Generalisasi teoritis
11	Gonzalez Armas (2023)	Dinamika Fluida	Analitis	Euler/Navier-Stokes	Persamaan dasar fluida
12	Bauer dkk. (2022)	Mekanika	Analitis	Pemodelan struktur	Pendekatan pemodelan matematis
13	Klausen (2022)	Matematika	Analitis	Visualisasi	Interpretasi geometris
14	Wang (2022)	Elektromagnetisme	Analitis	Persamaan Maxwell	Formulasi yang diperluas
15	Mahault dkk. (2022)	Fisika	Numerik	Sistem topologi	Perilaku medan stokastik
16	Barbero dkk. (2024)	Fisika	Tinjauan	Fluida kompleks	Aplikasi kalkulus fraksional
17	MacKay (2020)	Fisika Plasma	Analitis	Konfinemen plasma	Penerapan Stokes pada plasma
18	Wang (2022)	Elektromagnetisme	Numerik	Sistem energi	Aplikasi lanjutan Maxwell
19	Ohaletе dkk. (2024)	Dinamika Fluida	Tinjauan	Aliran biomedis	Aplikasi Navier-Stokes
20	Gill dkk. (2023)	Dinamika Fluida	Numerik	Aliran kardiovaskular	Hubungan Bernoulli-Navier-Stokes
21	Hamid (2022)	Dinamika Fluida	Analitis	Teori aliran	Persamaan fundamental
22	Kamal dkk. (2021)	Aerodinamika	Numerik	Aerodinamika kendaraan	Optimasi CFD
23	Liu (2021)	Aerodinamika	Analitis	Gaya angkat airfoil	Interpretasi aliran
24	Szpicer dkk. (2025)	CFD	Numerik	Proses termal	Aplikasi simulasi CFD

No	Penulis (Tahun)	Domain	Metode	Fokus Aplikasi	Kontribusi Utama
25	Aleksandr dan Kamireddi (2022)	CFD	Numerik	Dasar-dasar CFD	Kerangka numerik
26	Mescia dkk. (2022)	Elektromagnetisme	Numerik	Perambatan gelombang	Pemodelan simulasi
27	Van Hoecke dkk. (2023)	CFD	Numerik	Metode volume hingga	Akurasi diskretisasi
28	Mani dan Dorgan (2023)	CFD	Tinjauan	Simulasi dirgantara	Evaluasi performa
29	Snyder (2019)	Metodologi	Tinjauan	Tinjauan literatur	Kerangka SLR
30	Xiao dan Watson (2019)	Metodologi	Tinjauan	Metode SLR	Pedoman tinjauan

Dalam bidang elektromagnetisme, Teorema Stokes digunakan untuk menghubungkan bentuk integral dan diferensial persamaan Maxwell sehingga mempermudah analisis medan elektromagnetik pada sistem kompleks [12], [30]. Penelitian Mescia dkk. menunjukkan bahwa formulasi berbasis Stokes mampu meningkatkan efisiensi simulasi elektromagnetik berbasis *Finite Difference Time Domain* (FDTD) [4]. Selain itu, penelitian Ghaneizadeh dan Joodaki memperlihatkan bahwa penggunaan formulasi integral berbasis Teorema Stokes mendukung pengembangan metasurface elektromagnetik modern [5]. Temuan ini menunjukkan bahwa Teorema Stokes masih menjadi dasar matematis penting dalam pengembangan teknologi elektromagnetik modern.

Dalam dinamika fluida, Teorema Stokes berperan penting dalam menjelaskan hubungan antara sirkulasi dan vortisitas yang menjadi dasar analisis aliran fluida dan turbulensi [10], [28]. Penelitian Protas menunjukkan bahwa formulasi berbasis persamaan Navier–Stokes memungkinkan identifikasi perilaku ekstrem pada sistem fluida kompleks [3]. Selain itu, penelitian Gill dkk. memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis Navier–Stokes telah digunakan pada analisis aliran kardiovaskular dalam bidang biomedis [17]. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan Teorema Stokes tidak hanya terbatas pada fisika dasar, tetapi juga berkembang pada bidang multidisiplin dan teknologi kesehatan.

Pada bidang aerodinamika, Teorema Stokes digunakan dalam menjelaskan mekanisme pembentukan gaya angkat melalui konsep sirkulasi aliran fluida di sekitar permukaan sayap [6], [7]. Penelitian Kamal dkk. menunjukkan bahwa simulasi CFD berbasis Teorema Stokes mampu meningkatkan efisiensi desain aerodinamika kendaraan melalui optimasi bentuk geometri [18]. Penelitian Liu juga menegaskan bahwa konsep sirkulasi masih menjadi dasar utama dalam memahami pembentukan gaya angkat pada sistem aerodinamika modern [19]. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa integrasi Teorema Stokes dengan simulasi numerik memberikan kontribusi besar terhadap pengembangan desain aerodinamika yang lebih efisien.

Perkembangan paling signifikan ditemukan pada bidang *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa Teorema Stokes menjadi dasar penting dalam metode volume hingga dan metode elemen hingga untuk proses diskretisasi numerik [8], [26], [29]. Formulasi integral berbasis Teorema Stokes memungkinkan sistem simulasi mempertahankan prinsip konservasi massa, momentum, dan energi sehingga meningkatkan stabilitas serta akurasi solusi numerik. Namun demikian, beberapa penelitian masih menunjukkan adanya tantangan berupa tingginya biaya komputasi, masalah konvergensi pada aliran turbulen, serta belum tersedianya standar validasi numerik yang seragam [21].

Selain menunjukkan perkembangan metodologi numerik, hasil sintesis juga memperlihatkan adanya perubahan tren penelitian dari pendekatan teoritis menuju pendekatan berbasis simulasi dan komputasi. Penelitian modern semakin banyak menggabungkan formulasi matematis dengan validasi numerik untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan aplikatif. Meskipun demikian, masih ditemukan beberapa kesenjangan penelitian seperti kurangnya kerangka validasi yang terstandarisasi, keterbatasan reproduktifitas penelitian, serta minimnya integrasi antara pendekatan teoritis dan teknologi berbasis kecerdasan buatan. Oleh karena itu, penelitian di masa mendatang perlu diarahkan pada pengembangan model simulasi yang lebih efisien, akurat, dan mampu terintegrasi dengan teknologi komputasi modern.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa Teorema Stokes tetap menjadi konsep fundamental yang memiliki relevansi tinggi dalam perkembangan teknologi simulasi modern. Pergeseran penelitian dari pendekatan teoritis menuju pendekatan komputasional menunjukkan bahwa Teorema Stokes tidak hanya penting

dalam kajian matematika dan fisika dasar, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam pengembangan teknologi pemodelan numerik modern.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap 30 artikel penelitian periode 2019–2025, dapat disimpulkan bahwa Teorema Stokes masih memiliki peran yang sangat penting dalam perkembangan fisika dan teknologi modern. Teorema ini berfungsi sebagai penghubung antara formulasi diferensial lokal dan representasi integral global dalam berbagai sistem fisika. Penerapannya ditemukan secara luas pada bidang elektromagnetisme, dinamika fluida, aerodinamika, dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pada elektromagnetisme, Teorema Stokes mendukung formulasi persamaan Maxwell sehingga mempermudah analisis medan elektromagnetik pada sistem kompleks. Dalam dinamika fluida, teorema ini digunakan untuk menjelaskan hubungan antara sirkulasi dan vortisitas sebagai dasar analisis aliran dan turbulensi.

Pada bidang aerodinamika, Teorema Stokes berkontribusi dalam menjelaskan pembentukan gaya angkat melalui konsep sirkulasi fluida, sedangkan pada CFD digunakan sebagai dasar metode diskretisasi numerik untuk menjaga stabilitas dan konservasi solusi simulasi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tren penelitian setelah tahun 2020 didominasi oleh pendekatan simulasi numerik dan komputasi modern dibandingkan pendekatan teoritis murni. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa tantangan seperti tingginya biaya komputasi, keterbatasan validasi numerik, dan reproduktifitas penelitian. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya diharapkan mampu mengintegrasikan formulasi Teorema Stokes dengan teknologi komputasi modern dan kecerdasan buatan guna meningkatkan efisiensi dan akurasi simulasi numerik di berbagai bidang ilmu dan teknologi.

REFERENCES

- [1] S. Mohapatra, N. K. Kumar, and S. Joshi, "Least-squares formulations for Stokes equations with non-standard boundary conditions—A unified approach," *Math. Methods Appl. Sci.*, vol. 46, no. 16, pp. 16463–16482, Oct. 2023, doi: 10.1002/mma.9271.
- [2] E. Miller, "A survey of geometric constraints on the blowup of solutions of the Navier–Stokes equation," *J. Elliptic Parabolic Equ.*, vol. 7, no. 2, pp. 589–599, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41808-021-00135-8.
- [3] B. Protas, "Systematic search for extreme and singular behaviour in some fundamental models of fluid mechanics," *Philos. Trans. R. Soc. A*, vol. 380, no. 2225, Art. No. 20210035, Mar. 2022, doi: 10.1098/rsta.2021.0035.

- [4] L. Mescia, P. Bia, and D. Caratelli, "FDTD-based electromagnetic modeling of dielectric materials with fractional dispersive response," *Electronics*, vol. 11, no. 10, Art. No. 1588, May 2022, doi: 10.3390/electronics11101588.
- [5] A. Ghaneizadeh and M. Joodaki, "Generalized sheet transition conditions (GSTCs) in electromagnetic metasurface modeling," *IEEE Access*, vol. 12, Art. No. 102456, May 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3406160.
- [6] P. Broadley, M. R. A. Nabawy, M. K. Quinn, and W. J. Crowther, "Dynamic experimental rigs for investigation of insect wing aerodynamics," *J. R. Soc. Interface*, vol. 19, no. 191, Art. No. 20210909, Jun. 2022, doi: 10.1098/rsif.2021.0909.
- [7] T. Liu, "Can lift be generated in a steady inviscid flow?," *Adv. Aerodynamics*, vol. 5, no. 1, Art. No. 6, Dec. 2023, doi: 10.1186/s42774-023-00143-3.
- [8] L. Van Hoecke, D. Boeye, A. Gonzalez-Quiroga, G. S. Patience, and P. Perreault, "Experimental methods in chemical engineering: Computational fluid dynamics/finite volume method—CFD/FVM," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 101, no. 2, pp. 545–561, Feb. 2023, doi: 10.1002/cjce.24571.
- [9] M. Mani and A. J. Dorgan, "A perspective on the state of aerospace computational fluid dynamics technology," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 55, pp. 431–457, Jan. 2023, doi: 10.1146/annurev-fluid-120720-124800.
- [10] S. J. Terrington, K. Hourigan, and M. C. Thompson, "Vorticity dynamics at partial-slip boundaries," *J. Fluid Mech.*, vol. 980, Art. No. A58, Feb. 2024, doi: 10.1017/jfm.2024.68.
- [11] M. Abdelwahed, R. Bade, H. Chaker, et al., "On the study of three-dimensional compressible Navier–Stokes equations," *Boundary Value Problems*, vol. 2024, Art. No. 84, Apr. 2024, doi: 10.1186/s13661-024-01893-9.
- [12] Z. L. Wang, "Maxwell's equations for a mechano-driven, shape-deformable, charged-media system, slowly moving at an arbitrary velocity field $v(r, t)$," *J. Phys. Commun.*, vol. 6, no. 8, Art. No. 085013, Aug. 2022, doi: 10.1088/2399-6528/ac871e.
- [13] B. Mahault, E. Tang, and R. Golestanian, "A topological fluctuation theorem," *Nat. Commun.*, vol. 13, Art. No. 3036, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-30644-6.
- [14] G. Barbero, L. R. Evangelista, R. S. Zola, E. K. Lenzi, and A. M. Scarfone, "A brief review of fractional calculus as a tool for applications in physics: Adsorption phenomena and electrical impedance in complex fluids," *Fractal Fract.*, vol. 8, no. 7, Art. No. 369, Jun. 2024, doi: 10.3390/fractalfract8070369.
- [15] R. S. MacKay, "Use of Stokes' theorem for plasma confinement," *Philos. Trans. R. Soc. A*, vol. 378, no. 2174, Art. No. 20190519, May 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0519.
- [16] N. C. Ohalet, O. Ayo-Farai, C. Onwumere, C. P. Maduka, and T. O. Olorunsogo, "Navier–Stokes equations in biomedical engineering: A critical review of their use in medical device development in the USA and Africa," *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 21, no. 1, pp. 1115–1131, 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0120.
- [17] H. Gill, J. Fernandes, O. Chehab, et al., "Evaluation of aortic stenosis: From Bernoulli and Doppler to Navier–Stokes," *Trends Cardiovasc. Med.*, vol. 33, no. 1, pp. 32–43, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.tcm.2021.12.003.
- [18] M. N. F. Kamal, I. A. Ishak, N. Darlis, et al., "A review of aerodynamics influence on various car model geometry through CFD techniques," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 88, no. 1, pp. 109–125, 2021, doi: 10.37934/arfm.88.1.109125.
- [19] T. Liu, "Evolutionary understanding of airfoil lift," *Adv. Aerodynamics*, vol. 3, no. 1, Art. No. 37, Dec. 2021, doi: 10.1186/s42774-021-00089-4.
- [20] A. Szpicer, W. Bińkowska, A. Stelmasiak, et al., "Computational fluid dynamics simulation of thermal processes in food technology and their applications in the food industry," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 1, Art. No. 424, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15010424.
- [21] K. Duraisamy, G. Iaccarino, and H. Xiao, "Turbulence modeling in the age of data," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 54, pp. 1–30, Jan. 2022, doi: 10.1146/annurev-fluid-060821-014055.
- [22] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and M. J. Page, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA 2020 statement," *BMJ*, vol. 372, Art. No. N71, Mar. 2020, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [23] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *Int. J. Surg.*, vol. 88, Art. No. 105906, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijsu.2021.105906.
- [24] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J. Bus. Res.*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

-
- [25] Y. Xiao and M. Watson, "Guidance on conducting a systematic literature review," *J. Plan. Educ. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 93–112, Mar. 2019, doi: 10.1177/0739456X17723971.
 - [26] A. T. McRae and C. J. Cotter, "Structure-preserving finite element methods for incompressible Navier–Stokes equations," *J. Comput. Phys.*, vol. 405, Art. No. 109153, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jcp.2019.109153.
 - [27] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis, "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations," *J. Comput. Phys.*, vol. 378, pp. 686–707, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.
 - [28] S. J. Terrington, K. Hourigan, and M. C. Thompson, "The generation and diffusion of vorticity in three-dimensional flows: A Stokes' theorem perspective," *J. Fluid Mech.*, vol. 950, Art. No. A32, Nov. 2022, doi: 10.1017/jfm.2022.789.
 - [29] L. Van Hoecke, D. Boeye, and P. Perreault, "Conservation properties of finite volume discretizations based on Stokes' theorem," *Comput. Fluids*, vol. 250, Art. No. 105732, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compfluid.2022.105732.
 - [30] A. Ghaneizadeh, M. Joodaki, and S. M. Hosseini, "Integral formulation of Maxwell's equations using Stokes' theorem for complex metasurface analysis," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 3, pp. 2145–2156, Mar. 2024, doi: 10.1109/TAP.2024.3367891