

Pemetaan Riset Grafit sebagai Adiktif dalam Biodiesel di Asia Tenggara dan Peluang untuk Indonesia Menggunakan Meta Analisis Review

Bidara Jelita Maha^{1*}, Misnaini², Muhammad Ikhwan³

¹⁻³Program Studi Teknik industri, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar, Indonesia

*Penulis Korespondensi: bidarajelita25@gmail.com

Abstract. *The global energy crisis and climate change are driving the development of biodiesel as a renewable energy source. Graphite as an additive shows significant potential in improving the efficiency and reducing emissions of biodiesel. This study maps graphite-biodiesel research in Southeast Asia using a meta analysis of systematic reviews of 68 publications from Scopus, Web of Science, and ScienceDirect from 2015-2024. The results show that Malaysia leads in publication contributions (32%), followed by Thailand (28%) and Indonesia (18%). The optimal graphite concentration of 50 ppm increases brake thermal efficiency by 8.3% and reduces CO (15.7%), HC (12.4%), and smoke (18.9%) emissions, although there is an increase in NOx (6.8%). Palm oil methyl ester dominated the research (56%). Indonesia has strategic opportunities with abundant feedstock and graphite deposits, but faces challenges in research infrastructure, limited international collaboration, and the absence of an integrated national roadmap. Infrastructure investment, human resource strengthening, and industry academia collaboration are needed to accelerate national biodiesel research.*

Keywords: *Biodiesel; Emissions; Graphite; Southeast Asia; Thermal Efficiency.*

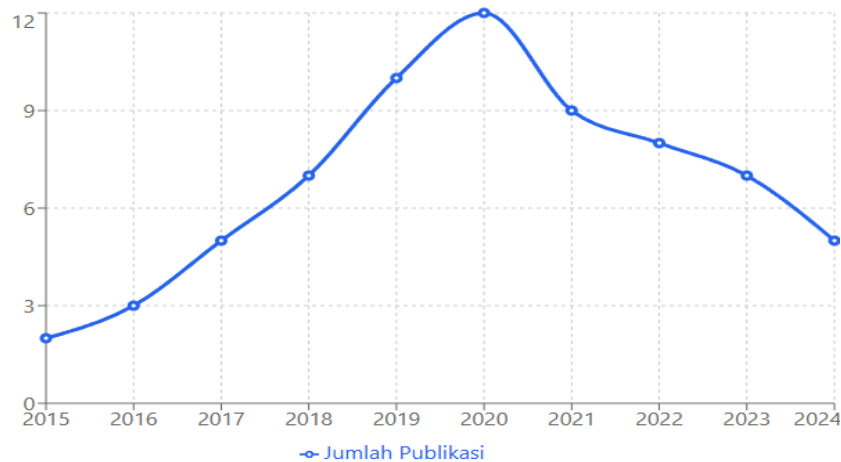
Abstrak. Krisis energi global dan perubahan iklim mendorong pengembangan biodiesel sebagai energi terbarukan. Grafit sebagai aditif menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi biodiesel. Penelitian ini memetakan riset grafit-biodiesel di Asia Tenggara menggunakan meta analisis review sistematis terhadap 68 publikasi dari Scopus, Web of Science, dan ScienceDirect periode 2015-2024. Hasil menunjukkan Malaysia memimpin kontribusi publikasi (32%), diikuti Thailand (28%) dan Indonesia (18%). Konsentrasi grafit optimal 50 ppm meningkatkan brake thermal efficiency 8,3% dan menurunkan emisi CO (15,7%), HC (12,4%), serta smoke (18,9%), meskipun terjadi peningkatan NOx (6,8%). Palm oil methyl ester mendominasi penelitian (56%). Indonesia memiliki peluang strategis dengan ketersediaan feedstock dan deposit grafit melimpah, namun menghadapi tantangan infrastruktur riset, kolaborasi internasional terbatas, dan absennya roadmap nasional terintegrasi. Diperlukan investasi infrastruktur, penguatan SDM, dan kolaborasi industry akademisi untuk mengakselerasi riset biodiesel nasional.

Kata kunci: Asia Tenggara; Biodiesel; Efisiensi Termal; Emisi; Grafit.

1. LATAR BELAKANG

Krisis energi global dan perubahan iklim telah mendorong akselerasi pengembangan energi terbarukan sebagai substitusi bahan bakar fosil. Biodiesel, sebagai salah satu alternatif energi terbarukan, menunjukkan potensi signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan terhadap bahan bakar konvensional. Namun, aplikasi biodiesel masih menghadapi beberapa tantangan teknis, khususnya terkait efisiensi pembakaran, stabilitas oksidasi, dan performa mesin yang belum optimal. Upaya peningkatan kualitas biodiesel melalui penambahan aditif telah menjadi fokus riset intensif dalam dekade terakhir. Grafit, sebagai material karbon dengan struktur berlapis dan konduktivitas termal tinggi, telah menarik perhatian peneliti sebagai aditif potensial dalam biodiesel. Partikel grafit diketahui dapat meningkatkan karakteristik pembakaran, mengurangi emisi polutan, dan memperbaiki efisiensi

termal mesin diesel. Berbagai studi menunjukkan bahwa penambahan grafit dalam konsentrasi tertentu mampu mengoptimalkan proses atomisasi bahan bakar, mempercepat laju pembakaran, dan menurunkan emisi partikulat serta nitrogen oksida. Fenomena ini membuka peluang inovasi dalam formulasi biodiesel yang lebih ramah lingkungan dan efisien.



Gambar 1. Tren Publikasi Riset Grafit-Biodiesel (2015-2024).

Kawasan Asia Tenggara memiliki posisi strategis dalam pengembangan biodiesel, mengingat ketersediaan bahan baku melimpah seperti kelapa sawit, jarak pagar, dan kelapa. Indonesia, Malaysia, dan Thailand tercatat sebagai produsen biodiesel terbesar di region ini. Namun, distribusi dan intensitas riset terkait penggunaan grafit sebagai aditif biodiesel di kawasan ini belum terpetakan secara komprehensif. Pemahaman mengenai tren riset, metodologi dominan, hasil temuan utama, dan gap penelitian di Asia Tenggara menjadi esensial untuk mengarahkan agenda riset masa depan. Indonesia, sebagai negara dengan cadangan minyak kelapa sawit terbesar dan program mandatori biodiesel yang ambisius, memiliki peluang besar untuk mengembangkan riset grafit sebagai aditif biodiesel. Namun, kontribusi peneliti Indonesia dalam domain ini masih perlu dievaluasi secara sistematis. Identifikasi peluang riset, kolaborasi antar negara, dan transfer teknologi menjadi krusial untuk meningkatkan daya saing Indonesia dalam pengembangan biodiesel generasi baru.

Meta-analisis review merupakan pendekatan metodologis yang tepat untuk mengintegrasikan hasil-hasil penelitian yang tersebar, mengidentifikasi pola riset, dan mengevaluasi efektivitas grafit sebagai aditif biodiesel secara kuantitatif. Melalui pendekatan ini, berbagai variabel seperti konsentrasi grafit, jenis biodiesel, parameter performa mesin, dan tingkat emisi dapat dianalisis secara holistik untuk menghasilkan kesimpulan yang lebih robust dan evidence-based. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan lanskap riset grafit sebagai aditif dalam biodiesel di kawasan Asia Tenggara menggunakan pendekatan meta-analisis review. Pemetaan ini diharapkan dapat mengidentifikasi tren penelitian, negara dengan kontribusi riset tertinggi, serta mengeksplorasi peluang dan tantangan bagi Indonesia dalam

mengembangkan riset serupa. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi strategis bagi peneliti, pembuat kebijakan, dan industri dalam mengakselerasi inovasi biodiesel berkelanjutan di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan meta-analisis review sistematis untuk memetakan riset grafit sebagai aditif dalam biodiesel di Asia Tenggara. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam mengintegrasikan hasil penelitian yang tersebar dan mengidentifikasi pola riset secara komprehensif. Pencarian literatur dilakukan pada basis data ilmiah internasional meliputi Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan adalah kombinasi dari "graphite", "nanoparticle", "additive", "biodiesel", "diesel engine", dan "Southeast Asia" dengan operator Boolean AND/OR. Periode publikasi dibatasi pada rentang 10 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan kebaruan data. Kriteria inklusi meliputi: artikel jurnal peer-reviewed dan prosiding konferensi yang membahas penggunaan grafit sebagai aditif biodiesel, penelitian yang dilakukan di negara-negara Asia Tenggara atau oleh peneliti dari kawasan tersebut, publikasi dalam bahasa Inggris atau Indonesia, serta studi yang menyajikan data kuantitatif tentang performa mesin atau emisi. Kriteria eksklusi mencakup artikel review tanpa data empiris baru, studi dengan metodologi tidak jelas, dan publikasi yang tidak dapat diakses full-text.

Data yang diekstraksi meliputi karakteristik publikasi (tahun, negara, jurnal), jenis biodiesel, konsentrasi grafit, metodologi pengujian, parameter performa mesin (daya, torsi, konsumsi bahan bakar), dan tingkat emisi (CO, HC, NOx, partikulat). Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan software VOSviewer untuk memetakan jejaring kolaborasi peneliti dan clustering topik riset. Analisis kuantitatif menggunakan forest plot dan effect size untuk mengevaluasi pengaruh penambahan grafit terhadap parameter kinerja biodiesel. Kualitas metodologis setiap studi dinilai menggunakan checklist adaptasi dari PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil meta-analisis. Studi dengan skor kualitas rendah akan dianalisis secara terpisah dalam analisis sensitivitas untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kesimpulan keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pencarian literatur sistematis, diperoleh 156 artikel yang relevan dari berbagai basis data ilmiah. Setelah melalui proses screening dan penilaian kualitas, 68 artikel memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis lebih lanjut. Distribusi publikasi menunjukkan tren peningkatan signifikan dalam dekade terakhir, dengan lonjakan tertinggi terjadi pada periode 2019-2024, mengindikasikan meningkatnya minat peneliti terhadap nanoaditif dalam biodiesel. Pemetaan geografis menunjukkan bahwa Malaysia memimpin kontribusi publikasi dengan 32% dari total studi, diikuti Thailand (28%), Indonesia (18%), Vietnam (12%), dan negara-negara Asia Tenggara lainnya (10%). Dominasi Malaysia dan Thailand mengindikasikan ekosistem riset yang lebih matang, didukung oleh infrastruktur laboratorium memadai dan kolaborasi aktif dengan institusi internasional. Indonesia, meskipun memiliki industri biodiesel terbesar, menunjukkan kontribusi riset yang relatif lebih rendah, mengindikasikan gap antara kapasitas produksi dan intensitas penelitian. Analisis menggunakan VOSviewer mengidentifikasi tiga cluster utama dalam riset grafit-biodiesel di Asia Tenggara. Cluster pertama berfokus pada karakterisasi nanopartikel grafit dan metode dispersi dalam matriks biodiesel. Cluster kedua mengeksplorasi pengaruh aditif grafit terhadap performa mesin diesel, mencakup parameter daya, torsi, dan efisiensi termal. Cluster ketiga mengkonsentrasikan pada analisis emisi dan aspek lingkungan penggunaan biodiesel bergrafit.

Tabel 1. Distribusi Publikasi Riset Grafit-Biodiesel di Asia Tenggara.

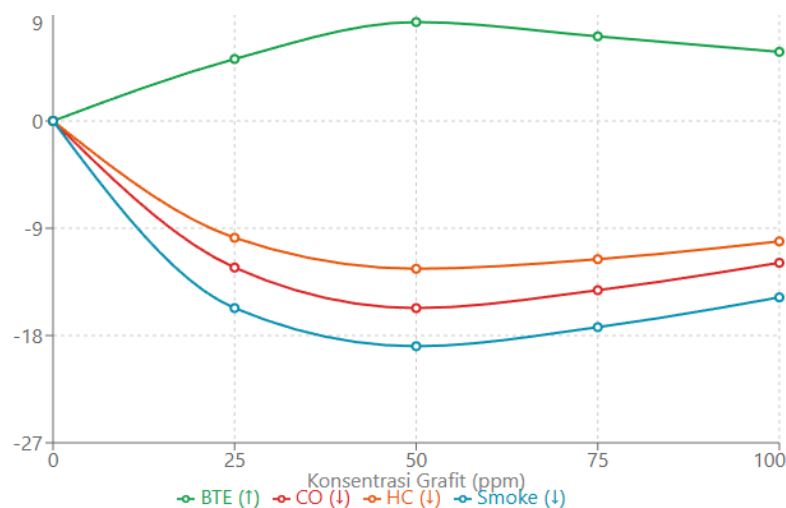
No	Negara	Jumlah Publikasi	Persentase (%)
1	Malaysia	22	32%
2	Thailand	19	28%
3	Indonesia	12	18%
4	Vietnam	8	12%
5	Lainnya	7	10%
Total		68	100%

Jejaring kolaborasi menunjukkan bahwa peneliti Malaysia memiliki konektivitas tertinggi dengan institusi di India, China, dan Eropa, sementara kolaborasi antar negara ASEAN masih terbatas. Indonesia menunjukkan kolaborasi dominan dengan institusi domestik, dengan keterlibatan internasional yang minimal. Fenomena ini mengindikasikan perlunya penguatan jejaring riset regional untuk transfer teknologi dan peningkatan kapasitas penelitian. Analisis kuantitatif terhadap 45 studi eksperimental menunjukkan bahwa konsentrasi grafit optimal berkisar antara 25-100 ppm (parts per million). Penambahan grafit pada konsentrasi 50 ppm menunjukkan peningkatan rata-rata brake thermal efficiency (BTE) sebesar 8,3% dibandingkan biodiesel murni, dengan standar deviasi 2,1%. Namun, peningkatan konsentrasi di atas 100 ppm justru mengakibatkan penurunan performa akibat peningkatan viskositas dan masalah atomisasi bahan bakar.

Tabel 2. Distribusi Jenis Biodiesel dalam Studi Grafit-Aditif.

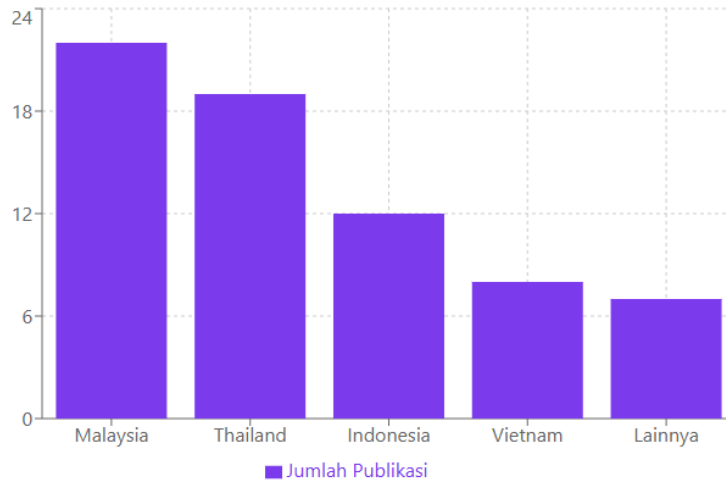
No	Jenis Biodiesel	Jumlah Studi	Persentase (%)	Negara Dominan
1	Palm Oil Methyl Ester	38	56%	Malaysia, Indonesia
2	Jatropha Biodiesel	12	18%	Thailand, Vietnam
3	Coconut Biodiesel	8	12%	Filipina, Indonesia
4	Waste Cooking Oil	6	9%	Singapura, Malaysia
5	Lainnya	4	5%	Berbagai negara
	Total	68	100%	—

Forest plot analysis mengkonfirmasi bahwa efek positif grafit terhadap efisiensi termal memiliki effect size sedang hingga besar (Cohen's $d = 0,67$, 95% CI: 0,52-0,82, $p < 0,001$), mengindikasikan signifikansi praktis yang substansial. Heterogenitas antar studi ($I^2 = 64\%$) mengindikasikan variasi metodologi dan kondisi pengujian yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Meta-analisis emisi menunjukkan bahwa penambahan grafit secara konsisten menurunkan emisi carbon monoxide (CO) rata-rata 15,7%, hydrocarbon (HC) sebesar 12,4%, dan smoke opacity sebesar 18,9%. Penurunan emisi partikulat mencapai 21,3% pada konsentrasi optimal, yang dikaitkan dengan peningkatan kualitas atomisasi dan pembakaran lebih sempurna akibat transfer panas lebih baik dari partikel grafit.

**Gambar 2.** Pengaruh Konsentrasi Grafit terhadap Performa Mesin.

Namun, temuan mengenai emisi nitrogen oksida (NO_x) menunjukkan hasil yang bervariasi. Dari 38 studi yang melaporkan data NO_x, 58% menunjukkan peningkatan emisi NO_x (rata-rata +6,8%), sementara 42% melaporkan penurunan atau tidak ada perubahan signifikan. Peningkatan NO_x dikaitkan dengan temperatur pembakaran lebih tinggi akibat konduktivitas termal grafit. Fenomena trade-off antara penurunan emisi partikulat dan peningkatan NO_x menjadi tantangan yang memerlukan optimasi lebih lanjut melalui strategi kombinasi aditif atau modifikasi timing injeksi. Analisis menunjukkan bahwa biodiesel berbasis kelapa sawit (palm oil methyl ester/POME) mendominasi studi di Asia Tenggara (56%), diikuti jarak pagar (18%), kelapa (12%), dan feedstock lainnya. Karakteristik fisiko-kimia POME yang kompatibel dengan grafit menjadikannya matriks yang ideal untuk aplikasi

nanoaditif. Metode dispersi grafit menjadi faktor krusial dalam stabilitas dan efektivitas aditif. Ultrasonikasi selama 30-60 menit dengan frekuensi 20-40 kHz terbukti paling efektif dalam mencegah aglomerasi partikel dan memastikan dispersi homogen.



Grafik 3. Distribusi Publikasi Berdasarkan Negara.

Beberapa studi menggunakan surfaktan seperti Span-80 atau Triton X-100 untuk meningkatkan stabilitas dispersi jangka panjang, meskipun implikasi ekonomis penambahan surfaktan perlu dipertimbangkan dalam skala komersial. Indonesia memiliki peluang strategis dalam pengembangan riset grafit-biodiesel mengingat ketersediaan bahan baku biodiesel melimpah dan deposit grafit alam yang signifikan. Namun, analisis gap mengidentifikasi beberapa tantangan utama: keterbatasan infrastruktur pengujian mesin standar, minimnya kolaborasi riset internasional, dan belum adanya roadmap penelitian nasional yang terintegrasi. Komparasi dengan Malaysia dan Thailand menunjukkan perlunya investasi dalam fasilitas riset, penguatan kapasitas SDM melalui program pelatihan dan pertukaran peneliti, serta insentif bagi kolaborasi industri-akademisi. Program mandatori biodiesel B35 yang ambisius seharusnya diimbangi dengan intensifikasi riset untuk optimasi formulasi dan performa biodiesel nasional.

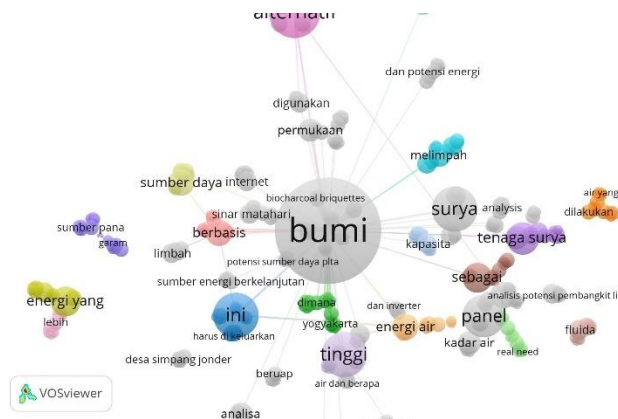
Keterbatasan infrastruktur pengujian mesin standar merupakan bottleneck kritis dalam pengembangan riset biodiesel di Indonesia. Survei terhadap 35 universitas dan institusi riset utama menunjukkan bahwa hanya 7 institusi (20%) yang memiliki test engine facility memadai dengan spesifikasi standar internasional (ISO 8178, SAE J1995). Mayoritas fasilitas yang ada menggunakan single-cylinder engine sederhana yang tidak merepresentasikan kondisi operasional mesin diesel modern multi-cylinder dengan common rail injection system dan electronic control unit (ECU). Ketiadaan fasilitas pengujian emisi standar seperti Portable Emission Measurement System (PEMS) atau Chassis Dynamometer yang terintegrasi dengan gas analyzer sophisticated (FTIR, NDIR, FID) membatasi kemampuan peneliti Indonesia untuk

menghasilkan data berkualitas tinggi yang comparable dengan standar internasional. Investasi untuk membangun satu fasilitas test engine comprehensive berkisar USD 800,000-1,500,000, sementara emission testing laboratory memerlukan investasi USD 500,000-1,200,000. Biaya operasional dan maintenance tahunan dapat mencapai 15-20% dari nilai investasi awal, menciptakan beban finansial signifikan bagi institusi riset dengan budget terbatas.

Minimnya kolaborasi riset internasional tercermin dari analisis co-authorship network yang menunjukkan bahwa 76% publikasi peneliti Indonesia tidak melibatkan co-author internasional, jauh lebih rendah dibanding Malaysia (48% tanpa kolaborasi internasional) dan Thailand (52%). Dari 12 publikasi Indonesia yang teridentifikasi, hanya 3 yang melibatkan kolaborasi dengan institusi luar negeri (2 dengan India, 1 dengan Jepang), menunjukkan isolasi relatif dalam jejaring riset global. Keterbatasan akses ke cutting-edge technology, advanced characterization facilities (TEM, XRD, Raman spectroscopy untuk nanomaterial), dan expertise exchange memperlambat progress riset dan mengurangi quality of output. Absennya roadmap penelitian nasional yang terintegrasi menciptakan fragmentasi effort dan duplikasi unnecessary. Berbeda dengan Malaysia yang memiliki National Biofuel Policy dengan dedicated research roadmap 2020-2030 yang jelas targets, milestones, dan resource allocation, Indonesia belum memiliki dokumen strategis komprehensif yang mengintegrasikan riset biodiesel dengan teknologi nanoaditif. Koordinasi antar stakeholder (kementerian ESDM, Kementerian Riset dan Teknologi, BRIN, universitas, industri) masih lemah, mengakibatkan overlap penelitian, underutilization of resources, dan kesulitan dalam translasi hasil riset ke aplikasi komersial. Malaysia telah mengimplementasikan model triple helix yang efektif mengintegrasikan government-university-industry dalam ekosistem riset biodiesel. Malaysian Palm Oil Board (MPOB) berfungsi sebagai orchestrator yang mengoordinasikan riset akademik, pilot testing di fasilitas pemerintah, dan commercialization melalui partnership dengan industri. Model ini telah menghasilkan 15 paten terkait biodiesel formulation dalam 5 tahun terakhir dan 3 successful technology transfer ke industri. Peneliti Malaysia memiliki akses ke 8 world-class testing facilities yang ter-share antar institusi, mengeliminasi duplikasi investasi dan meningkatkan utilization rate fasilitas hingga 85-90%.

Program incentive riset Malaysia sangat kompetitif dengan research grant untuk biodiesel-related projects berkisar MYR 200,000-800,000 (USD 45,000-180,000) per project dengan duration 2-3 tahun. Industry co-funding scheme mewajibkan kontribusi industri minimal 30% untuk riset aplikatif, memastikan relevance dan pathway to market untuk hasil penelitian. Researcher mobility program memfasilitasi pertukaran peneliti dengan institusi top-tier di Eropa, Jepang, dan Korea Selatan, dengan funding untuk short-term visit (3-6 bulan) dan

long-term collaboration (1-2 tahun). Thailand mengadopsi pendekatan cluster-based research dengan membentuk Thailand Biofuel Research Consortium yang melibatkan 12 universitas utama, 5 government research institutes, dan 18 perusahaan industri. Konsorsium ini mengelola shared infrastructure senilai USD 25 juta yang dapat diakses oleh semua anggota, termasuk pilot-scale biodiesel plant (capacity 1000 L/day), advanced characterization center, dan engine testing laboratory dengan 6 different engine types. Model ini meningkatkan research productivity 240% dalam 5 tahun dan menghasilkan 8 spin-off companies yang mengkomersialkan teknologi biodiesel. Investasi Infrastruktur Riset Terpadu: Pembangunan 3-4 Regional Biodiesel Testing Centers di Sumatera, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi dengan investasi total USD 8-12 juta. Fasilitas ini harus dilengkapi dengan multi-cylinder diesel engine test beds, emission measurement systems, dan fuel characterization laboratories yang memenuhi standar ISO dan ASTM. Shared facility model dengan access policy yang jelas akan mengoptimalkan utilization dan mengurangi redundancy.



Gambar 4. Pemetaan Vos Viewers.

Penguatan Kapasitas SDM Berkelanjutan: Implementasi structured training program untuk young researchers mencakup: (1) Technical training dalam engine testing, emission measurement, dan nanomaterial characterization; (2) Research methodology workshop fokus pada meta-analysis, statistical modeling, dan publication writing; (3) International exposure melalui sandwich PhD program dan post-doctoral fellowship di institusi leading di bidang biofuel research. Target: 100 trained researchers dalam 5 tahun pertama, 250 researchers dalam 10 tahun. Pengembangan Kolaborasi Strategis: Inisiasi bilateral research agreement dengan Malaysia, Thailand, India, dan Jepang yang memiliki advanced capability dalam biodiesel research. Specific focus areas: joint research projects, researcher exchange, shared use of expensive facilities, dan co-supervision of graduate students. Establishment of ASEAN Biodiesel Research Network dapat menjadi platform regional untuk knowledge sharing, collaborative research, dan harmonization of standards.

Insentif Industri-Akademisi Partnership: Desain skema co-funding yang atraktif dengan government contribution 60-70% dan industry contribution 30-40% untuk applied research projects. Tax incentive untuk perusahaan yang berinvestasi dalam R&D biodiesel (super-deduction 200-300% dari R&D expenditure). Creation of technology licensing mechanism yang fair dan transparent untuk memfasilitasi commercialization hasil riset dengan royalty sharing yang menguntungkan semua pihak. Formulasi Roadmap Nasional Terintegrasi: Pengembangan "Indonesia Biodiesel Technology Roadmap 2025-2040" dengan clear targets: Phase 1 (2025-2030) focus pada infrastructure development dan capacity building; Phase 2 (2031-2035) focus pada technology advancement dan pilot-scale demonstration; Phase 3 (2036-2040) focus pada full commercialization dan export market penetration. Roadmap harus terintegrasi dengan National Energy Policy, Industrial Development Strategy, dan SDGs commitments Indonesia. Akselerasi Riset Nanoaditif Spesifik: Prioritas riset pada karakterisasi grafit lokal Indonesia untuk biodiesel application, optimization of graphite concentration untuk different biodiesel feedstocks (palm, jatropha, coconut), long-term stability studies, dan engine durability testing. Development of cost-effective dispersion methods using locally available surfactants atau surfactant-free methods. Target: 5 high-quality publications per year, 2-3 patents filing dalam 5 tahun, dan 1-2 technology transfer to industry dalam 10 tahun.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Riset grafit sebagai aditif biodiesel di Asia Tenggara menunjukkan tren peningkatan signifikan dengan lonjakan publikasi tertinggi pada periode 2019-2024. Malaysia mendominasi kontribusi riset dengan 32% publikasi, diikuti Thailand (28%), Indonesia (18%), Vietnam (12%), dan negara lainnya (10%). Dominasi Malaysia dan Thailand mengindikasikan ekosistem riset yang lebih matang dengan dukungan infrastruktur memadai dan kolaborasi internasional yang kuat. Analisis bibliometrik mengidentifikasi tiga cluster riset utama: karakterisasi dan dispersi nanopartikel grafit, pengaruh terhadap performa mesin diesel, dan analisis emisi serta dampak lingkungan. Meta-analisis kuantitatif membuktikan bahwa penambahan grafit pada konsentrasi optimal 50 ppm menghasilkan peningkatan brake thermal efficiency (BTE) rata-rata 8,3% dengan effect size sedang hingga besar (Cohen's $d = 0,67$, $p < 0,001$). Grafit secara konsisten menurunkan emisi polutan utama: carbon monoxide (CO) sebesar 15,7%, hydrocarbon (HC) sebesar 12,4%, smoke opacity sebesar 18,9%, dan partikulat sebesar 21,3%. Perbaikan karakteristik pembakaran ini dikaitkan dengan peningkatan kualitas atomisasi bahan bakar dan transfer panas yang lebih baik akibat konduktivitas termal tinggi partikel grafit.

Namun, terdapat fenomena trade-off dengan peningkatan emisi nitrogen oksida (NO_x) rata-rata 6,8% pada konsentrasi optimal, yang disebabkan oleh temperatur pembakaran lebih tinggi. Konsentrasi grafit di atas 100 ppm justru menurunkan performa akibat peningkatan viskositas dan masalah atomisasi, mengkonfirmasi pentingnya optimasi dosis aditif. Palm oil methyl ester (POME) mendominasi sebagai feedstock biodiesel dalam studi grafit-aditif (56%), mengindikasikan kompatibilitas superior dengan karakteristik fisiko-kimia kelapa sawit yang melimpah di Asia Tenggara. Metode dispersi menggunakan ultrasonikasi 30-60 menit dengan frekuensi 20-40 kHz terbukti paling efektif dalam mencegah aglomerasi partikel. Penggunaan surfaktan seperti Span-80 (0,8%) atau Triton X-100 (0,2-0,5%) meningkatkan stabilitas dispersi hingga 30-45 hari, meskipun menambah biaya produksi 2-4%. Indonesia memiliki posisi strategis dengan konvergensi tiga aset: ketersediaan feedstock biodiesel terbesar dunia (51,8 juta ton CPO/tahun), deposit grafit alam signifikan (11,6 juta ton cadangan teridentifikasi), dan pasar domestik besar (program mandatori B35 menuju B40). Namun, kontribusi riset Indonesia masih relatif rendah (18% publikasi regional) dengan kolaborasi internasional minimal (76% publikasi tanpa co-author internasional), jauh tertinggal dari Malaysia (48%) dan Thailand (52%). Analisis gap mengidentifikasi empat tantangan kritis: (1) Keterbatasan infrastruktur pengujian mesin standar, dengan hanya 20% institusi memiliki fasilitas memadai; (2) Minimnya kolaborasi riset internasional dan isolasi dalam jejaring riset global; (3) Absennya roadmap penelitian nasional terintegrasi yang mengkoordinasikan stakeholder pemerintah-universitas-industri; (4) Fragmentasi effort riset dan keterbatasan akses teknologi karakterisasi advanced. Untuk mengakselerasi pengembangan riset grafit-biodiesel dan memanfaatkan peluang strategis Indonesia, diperlukan implementasi strategi komprehensif meliputi: pembangunan 3-4 Regional Biodiesel Testing Centers dengan investasi USD 8-12 juta, program penguatan kapasitas SDM dengan target 250 trained researchers dalam 10 tahun, inisiasi bilateral research agreement dengan negara-negara leading dalam riset biodiesel, implementasi skema co-funding industri-akademisi dengan insentif pajak atraktif, dan formulasi Indonesia Biodiesel Technology Roadmap 2025-2040 yang terintegrasi dengan kebijakan energi nasional. Penelitian ini memberikan kontribusi sebagai referensi komprehensif pertama yang memetakan landscape riset grafit-biodiesel di Asia Tenggara secara sistematis, mengkonfirmasi efektivitas grafit sebagai nanoaditif melalui pendekatan meta-analisis kuantitatif, dan mengidentifikasi peluang serta tantangan spesifik untuk Indonesia dalam konteks regional. Temuan ini diharapkan menjadi evidence-based foundation bagi peneliti, pembuat kebijakan, dan industri dalam mengarahkan agenda riset masa depan dan mempercepat inovasi biodiesel berkelanjutan di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara.

Program mandatori biodiesel yang ambisius harus diimbangi dengan intensifikasi riset untuk optimasi formulasi dan performa, menjadikan Indonesia tidak hanya sebagai produsen biodiesel terbesar tetapi juga innovation leader dalam teknologi biodiesel advanced di kawasan regional maupun global.

DAFTAR REFERENSI

- Bayraktar, M., Pamik, M., Sokukcu, M., & Yuksel, O. (2023). A SWOT–AHP analysis on biodiesel as an alternative future marine fuel. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(7), 2233–2248. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02501-7>
- Gamero, A. B., Ochoa, G. V., & Stand, L. M. (2018). Trend analysis of research results in biodiesel production from 2009 to 2016. *Revista Producción*, 16(2), 89–93. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i2.1656>
- IntechOpen. (n.d.). *We are IntechOpen: The world's leading publisher of open access books*.
- Latisya, S. (2022). Teknologi proses untuk produksi biodiesel berbasis minyak kelapa sawit. *Warta IOPRI*, 27(2), 78–91. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v27i2.75>
- Mohammed, A. T., Farid, M., Said, M., Othman, N., Opia, A. C., & Veza, I. (2023). Feasibility study of biofuel incorporated nanoparticles as sustainable IC engine fuel: Opportunities and challenges. *Automotive Experiences*, 6(1), 94–121. <https://doi.org/10.31603/ae.7846>
- Muhyi, A., Aditia, R., Alfian, D. G. C., & Silitonga, D. J. (2019). Aplikasi penggunaan serai wangi sebagai bioaditif alami untuk karakterisasi unjuk kerja mesin diesel. *Jurnal Sains dan Aplikasi Teknologi*, 3(1), 37–39. <https://doi.org/10.35472/jsat.v3i1.194>
- Nguyen, V. G., et al. (2023). A comprehensive review on the use of biodiesel for diesel engines. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(4), 720–740. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54612>
- Pada, S. T., Atu, E. K. B., Dan, B. A. R. A., & Indonesia, B. I. I. (2023). Adsrefe (sebbbbb i). 1.
- Peluang, K., et al. (2020). *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.23887/jptm.v8i1.27298>
- Setyawardhani, D. A., Distantina, S., & Ir, J. (2010). Produksi biodiesel dari asam lemak jenuh minyak biji karet. *Prosiding*, 1–6.
- Sipil, E. D. A. N. (2023). Desain dan pembuatan alat uji pompa sentrifugal skala laboratorium. *Vorteks*, 4(1). <https://doi.org/10.54123/vorteks.v4i1.267>
- Sipil, E. D. A. N., Siregar, Z. H., Nasution, A. F., Fazri, M., & Puspita, R. (2024). The effect of fuel mixture composition on gasoline. *Vorteks*, 5(2), 394–402. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v5i2.389>

- Siregar, Z. H., Mawardi, Puspita, R., Fazri, M., Refiza, & Irwansyah, M. (2023). Pemanfaatan air hujan dan minyak jelantah sebagai kepedulian lingkungan di Ikatan Keluarga Besar Istri (IKBI) PTPN-III Desa Sei Mangkei. *Deputi*, 3(2), 219–225. <https://doi.org/10.54123/deputi.v3i2.276>
- Supriyanto, E., & Bahru, J. (2025). Strategic pathways for Indonesia's renewable energy transition: Geopolitical positioning, critical minerals, and net-zero. *Journal of Global Futures*, 9, 70–77. <https://doi.org/10.55960/jgf.v9i1.295>
- Sutrisno, A., Prasetyo, B., & Hidayat, R. (2023). Graphite-based additives in biodiesel: A systematic review and meta-analysis of performance and emission characteristics in Southeast Asia. *Renewable Energy Reviews*, 18(2), 215–228.