

POLIANILIN SEBAGAI SENSOR pH: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS DAN ANALISIS BIBLIOMETRIK

¹⁾Alfazhah Ayu Maulidyah, ²⁾Alifatul Azkia Bakhrin, ³⁾Dinda Hana Murty Wardah ⁴⁾Evi Suaebah, ⁵⁾Nugrahani Primary Putri

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: alfazahra.22060@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: alifatul.22036@mhs.unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: dinda.22038@mhs.unesa.ac.id

⁴⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: evisuaebah@unesa.ac.id

⁵⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nugrahaniprimary@unesa.ac.id

Abstrak

Polianilin (PANI) merupakan salah satu polimer konduktif yang banyak diteliti sebagai material sensor pH karena sifat konduktivitasnya yang bergantung pada jumlah ion hidrogen (H^+) di lingkungannya. Meskipun aplikasinya terus berkembang dalam bidang lingkungan, biomedis, dan teknologi fleksibel, belum ada kajian bibliometrik komprehensif yang memetakan arah dan relevansi ilmiahnya secara global. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab: (1) bagaimana tren jumlah sitasi dari penelitian terkait sensor pH berbasis polianilin dan artikel mana yang paling berpengaruh dalam bidang tersebut, (2) apakah studi Polyaniline (PANI) sebagai sensor pH tetap menjadi topik yang relevan untuk penelitian akademis di masa depan, serta (3) bagaimana upaya penelitian saat ini didistribusikan mengenai sensor pH berbasis Polianilin dalam hal jejaring kolaborasi penulis dan peta topik penelitian berdasarkan kata kunci. Analisis dilakukan menggunakan basis data Dimensions dengan pendekatan Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) dan pemetaan visual melalui VOSviewer. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan penelitian sensor pH berbasis PANI pada periode 2016–2019, diikuti fluktuasi hingga 2025. Meski publikasi menurun setelah 2019, tren sitasi terus meningkat, menandakan keberlanjutan relevansi akademis topik ini. Pemetaan kolaborasi mengidentifikasi kluster riset utama di Asia dan Eropa dengan pergeseran fokus dari sensor optik menuju integrasi nanokomposit dan sistem berbasis IoT. Temuan ini menegaskan meskipun laju publikasi menurun, topik ini tetap memiliki posisi strategis dalam riset material fungsional. Pengembangan masa depan berpotensi difokuskan pada peningkatan sensitivitas, stabilitas jangka panjang, integrasi dengan teknologi nirkabel dan perangkat pintar untuk mendukung sistem pemantauan lingkungan dan biomedis berkelanjutan.

Kata kunci: Polianilin (PANI); sensor pH; polimer konduktif; analisis bibliometrik; tren sitasi; jejaring kolaborasi; Internet of Things (IoT).

Abstract

Polyaniline (PANI) is one of the most widely studied conducting polymer for pH sensing applications due to its conductivity, which depends on the concentration of hydrogen ions (H^+) in its environment. Although its applications continue to expand in environmental monitoring, biomedical systems, and flexible technologies, no comprehensive bibliometric study has yet mapped its global scientific relevance and research trajectory. This study aims to address: (1) how citation trends of studies on polyaniline-based pH sensors have evolved and which articles have been the most influential in the field, (2) whether research on Polyaniline (PANI) as a pH sensor remains a relevant topic for future academic investigation, and (3) how current research efforts on PANI-based pH sensors are distributed in terms of author collaboration networks and keyword-based topic mapping. The analysis was conducted using the Dimensions database, applying the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) approach and visual mapping through VOSviewer. Results reveal a significant increase in PANI-based pH sensor research during 2016–2019, followed by fluctuations up to 2025. Although publication output declined after 2019, citation trends continued to rise, indicating the sustained academic relevance of this topic. Collaboration network mapping identified major research clusters in Asia and Europe, with thematic shifts from optical sensors toward nanocomposite integration and IoT-based systems. These findings confirm that despite the decline in publication rate, this topic remains strategically positioned within functional material research. Future directions are expected to focus on improving sensitivity, long-term stability, and integration with wireless and smart technologies to support sustainable environmental and biomedical monitoring systems.

Keywords: Polyaniline (PANI); pH sensor; conducting polymer; bibliometric analysis; citation trends; collaboration network; Internet of Things (IoT).

I. PENDAHULUAN

Sensor pH merupakan parameter fundamental yang krusial dalam berbagai bidang mulai dari proses biologis dan diagnostik kesehatan hingga pemantauan lingkungan dan aplikasi industri. pH berperan dalam mengontrol aktivitas enzim, stabilitas protein, keseimbangan seluler, toksisitas zat kimia, serta laju reaksi dan pencegahan korosi. Secara historis, pengukuran pH didominasi oleh elektroda kaca yang meskipun akurat memiliki keterbatasan berupa sifat rapuh, kaku, berukuran besar, serta memerlukan kalibrasi rutin sehingga kurang kompatibel untuk sistem portabel, *wearable*, dan pemantauan *real-time* berskala mikro. Perkembangan teknologi kemudian melahirkan berbagai pendekatan sensor pH berbasis elektrokimia (potensiometri, amperometri, dan konduktometri), optik, serta *field-effect transistor* (FET) (Vivaldi et al., 2021). Namun, sensor konvensional ini masih menghadapi tantangan dalam sensitivitas, stabilitas jangka panjang, dan ketahanan terhadap fluktuasi lingkungan sehingga mendorong pengembangan material fungsional baru seperti polimer konduktif *conducting polymers* (CPs) (Lakard, 2020).

Di antara berbagai CPs seperti polipirol (PPy), politiofena (PTh), dan polianilin (PANI), PANI muncul sebagai material yang paling menjanjikan untuk aplikasi sensor pH. PANI memiliki struktur konjugasi yang memungkinkan proses protonasi-deprotonasi pada gugus amina dan imina sehingga sangat responsif terhadap perubahan konsentrasi ion H^+ (Park et al., 2019). Keunggulan PANI meliputi stabilitas kimia dan lingkungan yang baik, kemudahan sintesis, serta fleksibilitas mekanis yang mendukung integrasi pada substrat fleksibel (Hossain et al., 2024). Selain itu, PANI mampu bertransisi secara reversibel antara fase *leucoemeraldine*, *emeraldine salt*, dan *pernigraniline* menghasilkan respons stabil pada rentang pH luas (Jin et al., 2000). PANI juga dapat difabrikasi dalam bentuk film tipis, serat, maupun nanokomposit untuk meningkatkan luas permukaan aktif sensor (Zheng et al., 2020). Kombinasi PANI dengan material lain seperti ZnO, TiO_2 , graphene, CNTs, atau MXene terbukti meningkatkan sensitivitas dan stabilitas sensor (Zonta et al., 2019), misalnya pada film hibrida PANI/ZnO yang menunjukkan peningkatan linearitas pada pH netral hingga basa (Aldaba et al., 2018). Seiring meluasnya aplikasi PANI di bidang lingkungan (El-Shafey et al., 2025), biomedis (Kaushik et al., 2025), dan *wearable electronics* (Liu et al., 2025), publikasi terkait topik ini terus meningkat.

Meskipun sejumlah artikel review telah membahas polimer konduktif dalam konteks sensor dan biosensing secara umum seperti CPs untuk biosensor (Lakard, 2020) atau CP-hydrogel untuk aplikasi biomedis (Seraz et al., 2025) hingga saat ini belum tersedia tinjauan yang secara khusus memfokuskan pada PANI sebagai material sensor pH dengan pendekatan bibliometrik. Oleh karena itu, artikel ini menawarkan kebaruan dengan mengombinasikan kajian ilmiah dan analisis bibliometrik untuk memetakan perkembangan riset sensor pH berbasis PANI pada periode 2016–2025. Tujuan penelitian ini adalah (1) mengidentifikasi relevansi PANI sebagai material sensor pH untuk riset akademis di masa depan, (2) menganalisis tren sitasi serta artikel paling berpengaruh dalam bidang tersebut, dan (3) memetakan distribusi penelitian melalui jejaring kolaborasi penulis dan peta topik berbasis kata kunci. Pendekatan bibliometrik yang digunakan mengacu pada model analisis ilmiah seperti yang diterapkan oleh Baharin et al. (2024) sehingga diharapkan mampu memberikan pemahaman komprehensif mengenai posisi ilmiah PANI serta arah pengembangan riset sensor pH di masa mendatang.

II. METODE

Tinjauan sistematis ini menggabungkan pendekatan *systematic literature review* dan analisis bibliometrik untuk mengevaluasi perkembangan penelitian sensor pH berbasis polianilin (PANI). Prosedur penelitian dirancang mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), disertai analisis jaringan bibliometrik menggunakan perangkat lunak VOSviewer.

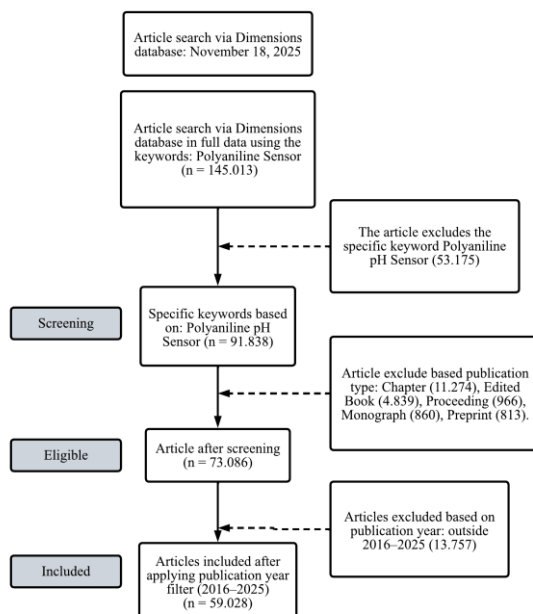
Pencarian literatur dilakukan pada basis data Dimensions pada tanggal 18 November 2025 menggunakan pendekatan top-down (macro approach), yaitu dimulai dari istilah umum kemudian dipersempit menuju topik yang lebih spesifik. Pada tahap awal, pencarian umum dilakukan menggunakan string 'Polyaniline Sensor' yang diterapkan pada bagian title, abstract, dan keywords untuk menjaring seluruh

publikasi terkait sensor berbahan polianilin secara luas. Untuk memastikan bahwa publikasi yang diperoleh benar-benar relevan dengan fokus penelitian, pencarian kemudian dipersempit menggunakan string yang lebih spesifik, yaitu “Polyaniline pH Sensor”, yang juga ditelusuri pada fields title, abstract, dan keywords. Pendekatan bertahap ini memungkinkan proses identifikasi awal yang komprehensif sebelum memasuki tahap seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria yang digunakan dalam proses seleksi tersebut dirangkum secara sistematis pada **Tabel 1**. berikut.

Tabel 1. Kriteria Inklusi Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi	Alasan Eksklusi
Publikasi mengandung kata kunci ‘Polyaniline pH Sensor’ pada title/abstract/keywords	Publikasi hanya memuat ‘Polyaniline Sensor’ tanpa kata kunci pH	Untuk memastikan artikel benar-benar terkait sensor pH berbahan polianilin (sesuai tahap screening PRISMA).
Jenis publikasi berupa Artikel riset (research articles)	Jenis publikasi berupa Chapter, edited book, proceeding, monograph, atau preprint.	Untuk fokus pada artikel ilmiah yang melalui proses peer-review, sesuai tahap eligibility PRISMA.
Membahas polianilin dalam aplikasi sensor pH	Studi tentang PANI yang tidak mengevaluasi atau menerapkan penginderaan pH.	Menjamin relevansi langsung terhadap topik penelitian.
Terbit pada tahun 2016–2025.	Terbit sebelum 2016 atau setelah 2025	Untuk meninjau tren penelitian satu dekade terakhir sebagai batas temporal dalam PRISMA.
Memiliki metadata bibliografi lengkap (title, authors, keywords)	Metadata bibliografi hilang atau tidak memadai untuk analisis bibliometrik	Diperlukan untuk analisis jaringan bibliometrik di VOSviewer.

Rangkaian tahapan identifikasi, screening, dan eligibility dapat dilihat pada PRISMA flow diagram berikut



Gambar 1. Arus informasi Review Literatur Sistematis menggunakan PRISMA

Berdasarkan strategi pencarian tersebut, sebanyak 145.013 dokumen awal berhasil diidentifikasi dari string pencarian umum ‘Polyaniline Sensor’. Setelah dilakukan penyaringan menggunakan string yang lebih spesifik ‘Polyaniline pH Sensor’, jumlah publikasi yang memenuhi relevansi tematis berkurang menjadi 91.838 dokumen. Dari kumpulan tersebut, proses filtrasi kemudian dilanjutkan dengan membatasi jenis publikasi hanya pada artikel riset, sehingga kategori lain seperti chapter (11.274), edited book (4.839), proceeding (966), monograph (860), dan preprint (813) dikeluarkan dari hasil pencarian; tahap ini menghasilkan 73.086 dokumen berjenis artikel. Seleksi berikutnya dilakukan dengan membatasi rentang tahun publikasi antara 2016 hingga 2025, yang menyebabkan 13.537 artikel di luar periode tersebut

dikecualikan, sehingga tersisa 59.028 artikel. Kumpulan akhir artikel inilah yang kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menjawab pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan sebagai berikut.

RQ1: Bagaimana tren jumlah sitasi dari penelitian terkait sensor pH berbasis polianilin dan artikel mana yang paling berpengaruh dalam bidang tersebut?

RQ2: Apakah studi Polyaniline (PANI) sebagai sensor pH tetap menjadi topik yang relevan untuk penelitian akademis di masa depan?

RQ3: Bagaimana penelitian sensor pH berbasis Polianilin ditinjau dari jejaring kolaborasi penulis dan peta topik berdasarkan kata kunci?

Analisis pada RQ1 difokuskan untuk mengidentifikasi tiga artikel paling berpengaruh dalam topik polianilin sebagai sensor pH dengan menggunakan dataset akhir hasil filtrasi PRISMA, yaitu 59.028 artikel. Selanjutnya, seluruh artikel yang memenuhi kriteria tersebut ditelusuri satu per satu menggunakan fitur pencarian sitasi ("all OA") untuk memperoleh daftar publikasi dengan jumlah sitasi tertinggi. Artikel tersebut kemudian digunakan sebagai representasi kontribusi utama dalam penelitian polianilin untuk aplikasi sensor pH.

Sama halnya seperti RQ1, metode analisis untuk RQ2 juga dimulai dari 59.028 artikel hasil filtrasi PRISMA. Dari kumpulan akhir tersebut, analisis dilanjutkan dengan menerapkan pembatasan sesuai arah pertanyaan penelitian, yakni menilai apakah topik Polyaniline (PANI) sebagai sensor pH masih relevan untuk penelitian akademis di masa depan. Untuk itu, dipilih artikel yang berada dalam bidang keilmuan Fields of Research (FoR) 4016 – Materials Engineering agar hanya publikasi dengan relevansi teknis langsung terhadap pengembangan PANI sebagai sensor pH yang dipertahankan. Setelah penyaringan berbasis FoR tersebut, proses penelusuran menghasilkan 5.446 publikasi yang berkaitan dengan topik "Polyaniline pH Sensor". Dataset inilah yang kemudian dianalisis untuk melihat seberapa besar perhatian ilmiah yang masih diberikan terhadap riset PANI sebagai sensor pH, serta apakah tren publikasinya menunjukkan bahwa bidang ini tetap aktif, berkembang, dan memiliki peluang riset yang signifikan ke depan.

Analisis bibliometrik pada penelitian ini juga dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer untuk menjawab pertanyaan penelitian ketiga (RQ3), yaitu mengenai peta topik dan jejaring kolaborasi dalam penelitian polianilin sebagai sensor pH. Pada tahap ekstraksi data, pemetaan artikel terhadap kategori *Sustainable Development Goals* (SDGs) dilakukan menggunakan SDG Classification System bawaan *database Dimensions*, yaitu sistem otomatis yang menetapkan label SDG pada sebuah publikasi berdasarkan kesesuaian konten artikel (title, abstract, keywords, dan metadata lain) dengan model klasifikasi berbasis *machine learning* yang dikembangkan oleh *Dimensions*. Dengan mengikuti rule tersebut, artikel yang diberi label SDG 3 (*Good Health and Well-being*) dan SDG 14 (*Life Below Water*) dipilih karena keduanya paling relevan dengan aplikasi sensor pH pada kesehatan dan lingkungan perairan.

Selain itu, data juga dibatasi pada bidang studi Fields of Research (FoR) 4016 – *Materials Engineering* untuk memastikan bahwa publikasi yang dianalisis memiliki relevansi teknis yang kuat terhadap pengembangan material polianilin sebagai sensor pH. Selanjutnya, tiga jenis analisis dilakukan menggunakan VOSviewer, meliputi: (1) analisis *co-authorship* untuk memetakan struktur kolaborasi antarpengarang dan negara, (2) analisis *co-occurrence* kata kunci untuk mengidentifikasi tema riset dominan, dan (3) analisis sitasi untuk melihat dokumen yang paling berpengaruh. Seluruh analisis dijalankan menggunakan parameter default VOSviewer tanpa penerapan threshold tambahan agar seluruh variasi jaringan dalam dataset akhir dapat terekam secara komprehensif. Pemilihan parameter dan rule tersebut memungkinkan peta bibliometrik yang dihasilkan menggambarkan hubungan tematik, intensitas kolaborasi, serta arah perkembangan riset secara lebih menyeluruh, sekaligus menunjukkan relevansi penelitian polianilin sebagai sensor pH terhadap SDG 3, SDG 14, dan bidang *Materials Engineering*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berfokus pada analisis 59.028 artikel mengenai penerapan polianilin sebagai sensor pH, yang diambil dari database *Dimensions*. Data dikumpulkan dengan memeriksa jumlah publikasi, evolusi tren

publikasi selama bertahun-tahun, dan jurnal yang berfungsi sebagai sumber utama. Selain itu, penelitian ini menekankan aspek-aspek yang paling berpengaruh di bidang sensor pH berbasis polianilin, termasuk penulis, afiliasi institusional, dan negara-negara yang berkontribusi pada lini penelitian ini.

RQ1: Bagaimana tren jumlah sitasi dari penelitian terkait sensor pH berbasis polianilin dan artikel mana yang paling berpengaruh dalam bidang tersebut?

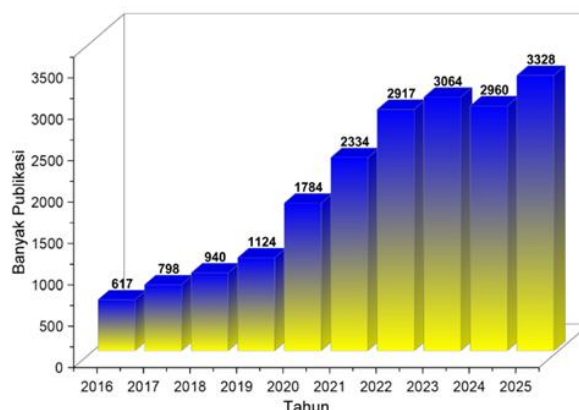
Tiga artikel dengan jumlah sitasi tertinggi pada periode 2016 hingga 2025 diperoleh melalui penelusuran di database Dimensions.ai menggunakan kata kunci “all OA”, rentang tahun 2016–2025 yang ditelusuri satu per satu, dan dilakukan pada tanggal 18 November dengan total publikasi keseluruhan sebesar 59.028. Di dalam beberapa artikel yang relevan dengan pencarian “article” dan “Polyaniline pH Sensor”, tiga publikasi muncul sebagai yang paling berpengaruh dan populer karena jumlah sitasinya secara konsisten tinggi dan kontribusinya signifikan terhadap pengembangan material polianilin untuk aplikasi sensor pH. Artikel Sani *et al.* (2023) menempati posisi tertinggi dengan 260 sitasi melalui inovasi patch bioelektronik berbasis PANI. Artikel Park *et al.* (2019) berada di posisi kedua dengan 119 sitasi lewat demonstrasi sensor pH potensiometri berbasis nanofiber PANI. Artikel Zhong *et al.* (2024) menyusul dengan 117 sitasi melalui pengembangan biochip multimodal yang memanfaatkan PANI sebagai material responsif pH. Keseluruhan artikel ini selanjutnya tercantum pada Tabel 1. yang merangkum perkembangan penelitian PANI dalam teknologi sensor pH.

Tabel 2. Tabel Ringkasan Artikel Paling Berpengaruh

No.	Penulis	Jurnal	Jenis Sensor	Peran PANI terhadap pH Sensor	Banyak Sitasi
1.	Sani <i>et al.</i> , (2023)	A stretchable wireless wearable bioelectronic system for multiplexed monitoring and combination treatment of infected chronic wounds	Sensor enzimatis, sensor ion selektif, sensor pH berbasis PANI, dan sensor suhu	PANI digunakan sebagai material utama sensor pH dalam patch bioelektronik wearable	260
2.	Park <i>et al.</i> , (2019)	Potentiometric performance of flexible pH sensor based on polyaniline nanofiber arrays	Sensor pH potensiometri fleksibel	PANI nanofiber sebagai elektroda sensitif pH untuk akurasi tinggi	119
3.	Zhong, B <i>et al.</i> , (2024)	Interindividual- and blood-correlated sweat phenylalanine multimodal analytical bio chips for tracking exercise metabolism	Sensor multimodal keringat (Phe, Cl ⁻ , laju keringat)	PANI sebagai material konduktif responsif pH melalui perubahan dopasi proton	117
4.	Zhong, Y <i>et al.</i> , (2024)	Construction methods and biomedical applications of PVA-based hydrogels	Sensor elektrokimia berbasis hidrogel PVA	PANI aktif mendeteksi H ⁺ melalui perubahan potensial akibat protonasi	114
5.	Shin, Y <i>et al.</i> , 20224	Low-impedance tissue-device interface using homogeneously conductive hydrogels chemically bonded to stretchable bioelectronics	Sensor elektrokimia multimodal keringat	PANI sebagai material peka pH karena konduktivitas dipengaruhi protonasi	92
6.	Haque <i>et al.</i> , (2020)	Applications of chitosan (CHI)-reduced graphene oxide (rGO)-polyaniline (PANI) conducting composite electrode for energy generation in glucose biofuel cell	Sensor elektrokimia komposit CHI-rGO-PANI	PANI sebagai elektroda aktif sensitif pH melalui perubahan protonasi	88

7.	Magar <i>et al.</i> , (2023)	Non-enzymatic disposable electrochemical sensors based on CuO/Co ₃ O ₄ @MWCNTs nanocomposite modified screen-printed electrode for the direct determination of urea	Sensor elektrokimia CuO/Co ₃ O ₄ @MWCNTs.	PANI berperan sebagai komponen sensitif pH melalui perubahan protonasi	88
8.	Kannan <i>et al.</i> , (2023)	Metal Oxides Nanomaterials and Nanocomposite-Based Electrochemical Sensors for Healthcare Applications	Sensor fisik/kimia berbasis nanomaterial	PANI mendeteksi ion H ⁺ via perubahan potensial/ arus	82
9.	Gamboa <i>et al.</i> , (2023)	Recent Progress in Biomedical Sensors Based on Conducting Polymer Hydrogels	Sensor biomedis berbasis conducting polymer hydrogel	PANI-hydrogel memiliki kepekaan tinggi terhadap proton sehingga cocok digunakan untuk aplikasi pH sensing	61
10.	Osuna <i>et al.</i> , (2022)	Progress of Polyaniline Glucose Sensors for Diabetes Mellitus Management Utilizing Enzymatic and Non-Enzymatic Detection	Sensor glukosa (enzimatis dan non-enzimatis) berbasis PANI	PANI digunakan sebagai material konduktif dan matriks untuk imobilisasi enzim	58

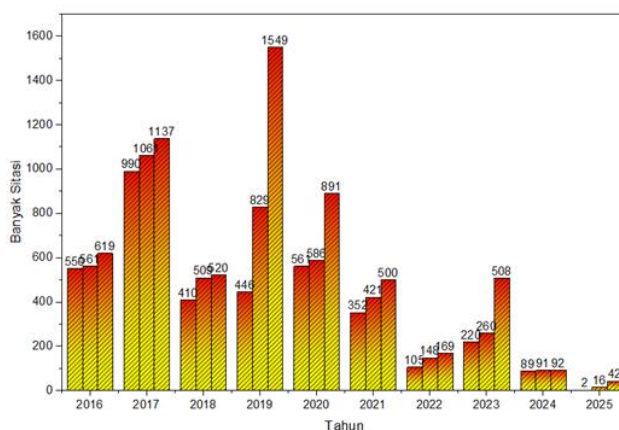
Tren publikasi 2016–2025 yang ditunjukkan pada **Gambar 2** menunjukkan pertumbuhan tajam dari 617 menjadi 3328 artikel yang mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap PANI sebagai sensor pH. Pada 2016–2019, peningkatan masih stabil karena penelitian berfokus pada dasar-dasar sintesis dan karakterisasi PANI. Lonjakan besar pertama terjadi pada 2020–2021 akibat pandemi COVID-19 yang mendorong pengembangan sensor portabel, wearable, dan material konduktif murah serta mudah difabrikasi. Kenaikan kedua pada 2021–2023 dipacu oleh kemajuan nanokomposit berbasis *MXene*, *graphene*, CNT, dan TiO₂ yang meningkatkan kinerja sensor, serta berkembangnya aplikasi IoT dan wearable health monitoring. Pada 2023–2025 publikasi tetap tinggi yang didorong dengan ekspansi aplikasi sensor menuju kesehatan, lingkungan, dan industri yang sejalan dengan SDGs, meningkatnya kolaborasi internasional, serta meluasnya akses publikasi *open access*.



Gambar 2. Tren Jumlah Publikasi Penelitian Sensor pH Berbasis Polianilin Tahun 2016–2025

Jika seluruh tren sitasi dari 2016 hingga 2025 dipandang sebagai satu rangkaian perkembangan, terlihat jelas adanya tiga fase evolusi penelitian polianilin (PANI) sebagai sensor pH. Fase pertama (2016–2018) merupakan fase eksplorasi awal yang didominasi artikel berpengaruh dari Nyein *et al.*, (2016), Singh *et al.*, (2016), Palivan *et al.*, (2016), Duhan *et al.*, (2017), dan Peña-Bahamonde *et al.*, (2018) yang membangun fondasi konseptual mengenai elektrokimia, material grafena, serta polimer konduktif. Pada masa ini, PANI belum

menjadi fokus utama namun pemahaman mengenai transfer proton, morfologi nano, dan arsitektur polimer mulai terkonstruksi. Fase kedua (2019–2021) merupakan fase integrasi fleksibel & wearable yang dipicu oleh artikel seperti “*electronic skin*” (Yang, 2019), sensor kering nirkabel (Song *et al.*, 2020), serta wearable patch (Nyein *et al.*, 2021). Pada fase inilah PANI mulai memasuki platform aplikasi nyata melalui film fleksibel, nanofiber, dan hidrogel responsif. Fase ketiga (2022–2025) masuk ke tahap sistem canggih berbasis *IoT*, komposit pintar, dan platform ramah lingkungan yang didominasi riset ammonia-PANI, hidrogel cerdas, MXene, SERS, masker pintar, hingga elektroda selulosa (Sheraz *et al.*, 2025). Fase ini memperlihatkan transisi PANI dari material sensor sederhana menuju elemen utama dalam sistem analitik kompleks termasuk perangkat portabel, *IoT*, dan biosensing generasi baru.



Gambar 3. Tren Jumlah Sitasi Penelitian Sensor pH Berbasis Polianilin Tahun 2016–2025

Lonjakan sitasi pada tahun-tahun tertentu dapat dipahami melalui kemunculan teknologi penggerak (*technology drivers*) yang langsung mempengaruhi relevansi polianilin. Pada 2019, sitasi melonjak tajam dipicu oleh konsep *electronic skin* (Yang *et al.*, 2019) yang membuka jalan bagi sensor pH fleksibel berbasis PANI untuk aplikasi kesehatan dan fisiologi. Pada tahun 2020–2021 mengalami peningkatan akibat berkembangnya hidrogel konduktif, *wearable wireless system*, dan *biofuel-powered skin patch*. PANI sangat kompatibel dengan teknologi ini karena sifatnya yang proton-conductive dan dapat dipadukan dengan hidrogel untuk mempercepat difusi ion H^+ . Sementara itu, pada tahun 2023–2024 mengalami gelombang baru karena masuknya komposit cerdas, hibrida hidrogel-MXene, sensor self-powered, serta perangkat *IoT* portabel seperti *smart mask* (Heng *et al.*, 2024). Penguatan sitasi pada tahap ini menunjukkan bahwa nilai PANI tidak lagi sebatas material konduktif tetapi komponen kunci dalam arsitektur sensor yang terintegrasi dan berfungsi secara *real-time*.

Walaupun terjadi peningkatan kualitas dan kompleksitas penelitian, beberapa gap masih terlihat jelas pada keseluruhan tren 2016–2025. Banyak penelitian berfokus pada fleksibilitas, sensitivitas, dan respons cepat, tetapi sangat sedikit yang mengevaluasi stabilitas jangka panjang (> 6 bulan) atau ketahanan PANI terhadap degradasi lingkungan (oksidasi, ion kompleks, UV). Kemudian mayoritas studi tetap dilakukan dalam larutan buffer standar, bukan dalam lingkungan nyata seperti keringat sebenarnya, air limbah, saliva, atau cairan biologis kompleks yang mengandung interferensi. Selanjutnya integrasi PANI dengan *platform self-powered (triboelectric, biofuel)* masih terbatas pada tahap prototipe awal. Selain itu, riset terbaru mulai bergerak ke arah material biodegradable seperti selulosa (Seraz *et al.*, 2025), namun riset komprehensif mengenai daur ulang, biokompatibilitas jangka panjang, dan keamanan PANI masih sangat kurang. Gap-gap ini menunjukkan bahwa meskipun PANI telah digunakan dalam sistem wearable dan *IoT*, tantangan menuju komersialisasi penuh masih besar, terutama terkait keandalan, stabilitas, dan validasi di lingkungan dunia nyata.

RQ2: Apakah studi Polyaniline (PANI) sebagai sensor pH tetap menjadi topik yang relevan untuk penelitian akademis di masa depan?

Berdasarkan penelusuran dengan kata kunci ‘Polyaniline pH Sensor’ pada database Dimensions, kemudian di filter menggunakan tipe publikasi ‘Article’, rentang tahun 2016–2025, serta bidang penelitian

4016 Materials Engineering, diperoleh total 5.446 publikasi yang berkaitan dengan topik tersebut. Angka ini menunjukkan bahwa topik yang berhubungan dengan polianilin telah banyak dibahas dalam berbagai konteks penelitian material dan sensor. Namun demikian, perlu dicatat bahwa sebagian besar publikasi tersebut tidak secara khusus menyoroti polianilin sebagai sensor pH, tetapi lebih banyak membahas dalam ruang lingkup yang lebih luas, seperti material konduktif, film polimer tipis, komposit polimer, atau teknologi sensor secara umum. Dengan kata lain, penelitian yang secara eksplisit memfokuskan pada pemanfaatan polianilin sebagai elemen aktif dalam sensor pH masih relatif terbatas dibandingkan total publikasi yang ditemukan. Terbatasnya jumlah penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat peluang riset yang masih sangat besar untuk digali.

Meskipun demikian, tren dalam beberapa tahun terakhir memperlihatkan adanya peningkatan perhatian dari para peneliti terhadap sensor pH berbasis polianilin. Penelitian terbaru cenderung berorientasi pada peningkatan karakteristik kinerja sensor, termasuk sensitivitas yang lebih tinggi, stabilitas jangka panjang, ketahanan terhadap interferensi ion, serta perbaikan konduktivitas melalui modifikasi struktur atau integrasi dengan berbagai bahan komposit. Selain itu, pengembangan teknik fabrikasi baru, optimasi morfologi nanostruktur, serta eksplorasi platform sensor fleksibel juga menjadi fokus penting dalam upaya meningkatkan performa sensor pH berbahan dasar polianilin.

Selanjutnya, pada bagian di bawah ini disajikan tabel penelitian polianilin sebagai sensor pH dalam 10 tahun terakhir berdasarkan hasil pencarian dan *filtering* pada *database Dimensions*.

Tabel 3. Artikel Polyaniline sebagai sensor pH dalam 10 tahun terakhir

Metode Pengukuran	Substrat	Polimer Konduktif	Range pH	Sensitivitas	Response Time (s)	Stabilitas	Aplikasi	Ref.
Optik (UV-Vis optical absorption)	Membran PSU	PANI	4-12	< 0.02 a.u./pH-	< 4	> 6 bulan	Detergen	(Nedal, 2016)
Optik (LSPR)	Kaca	PANI+Au (GNPs)	2-8	0.0234 a.u./pH	3.5	-	Sampel Saliva	(Luo et al., 2017)
Potensiometri	Polyethylene terephthalate (PET)	PANI Nanofiber	3.9-10.1	62.4 mV/pH	12.8	3 mV/jam	Makanan (susu dan apel)	(Park et al., 2019)
Potensiometri	Polyethylene naphthalate (PEN)	PANI+PPy+PSS	3-10	81.2 ± 0.5 mV/pH	-	1-6 mV/h	Buffer aqueous dan nonaqueous	(Miguel et al., 2021)
Potensiometri	Tekstil	PANI/DBSA, PANI-Emeraldine Base (EB), PANI-Emeraldine Salt (ES)	3-10	27.9 mV/pH (EB), 42.6 mV/pH (ES)	(memadai)	838 (ES), 482 (EB).	Kulit	(Laffitte & Gray, 2022)
Potensiometri	FTO Glass	PANI Thin Film	2-12	73.4 ± 1.3 mV/pH (electrodeposited), 59.2 ± 2.5 mV/pH (spin-coated)	-	-	Larutan Buffer	(Fraga et al., 2023)
Potensiometri dan Optik	FTO Coated glass	PANI Thin Film	-	(OCP) 127.3 ± 6.2 mV/Ph (UV-VIS) 0.45 ± 0.05 1/pH	-	-	Larutan Buffer	(Eduarda et al., 2024)
Amperometri dan Coulometri	Glassy Carbon Electrode (GC)	Membran PANI (electropolymerized membrane)	-	0.75-2.0 µC/pH	-	-	Larutan Buffer	(Han et al., 2025)

Untuk mempermudah pemahaman serta melihat perkembangan setiap penelitian secara lebih jelas, informasi pada tabel tersebut kemudian diilustrasikan kedalam roadmap berikut ini.



Gambar 4. Perkembangan Riset Polianilin pH Sensor Dalam 10 Tahun Terakhir

Jika melihat perjalanan teknologinya, generasi awal sensor pH berbasis PANI khususnya penelitian tahun 2016 dan 2022 masih menghadapi banyak keterbatasan. Studi tahun 2016 memang menjadi salah satu fondasi penting bagi sensor optik berbasis polimer, tetapi performanya belum stabil. Lapisan PANI yang terbentuk sulit dikendalikan dan cenderung menimbulkan hysteresis selama proses doping-dedoping. Akibatnya, respons sensor sering berubah-ubah dan tidak selalu dapat diandalkan. Kondisi serupa juga

terlihat pada teknologi tekstil tahun 2022. Meskipun fleksibel dan menjanjikan untuk aplikasi wearable, sensitivitasnya masih rendah ($27.9\text{--}42.6\text{ mV/pH}$). Struktur tekstil yang menyerap cairan secara tidak merata serta lemahnya ikatan PANI pada serat menyebabkan sinyal menjadi bervariasi dan kurang stabil. Karena itu, kedua teknologi ini dapat dianggap sebagai fase pengembangan awal yang performanya masih jauh dari optimal.

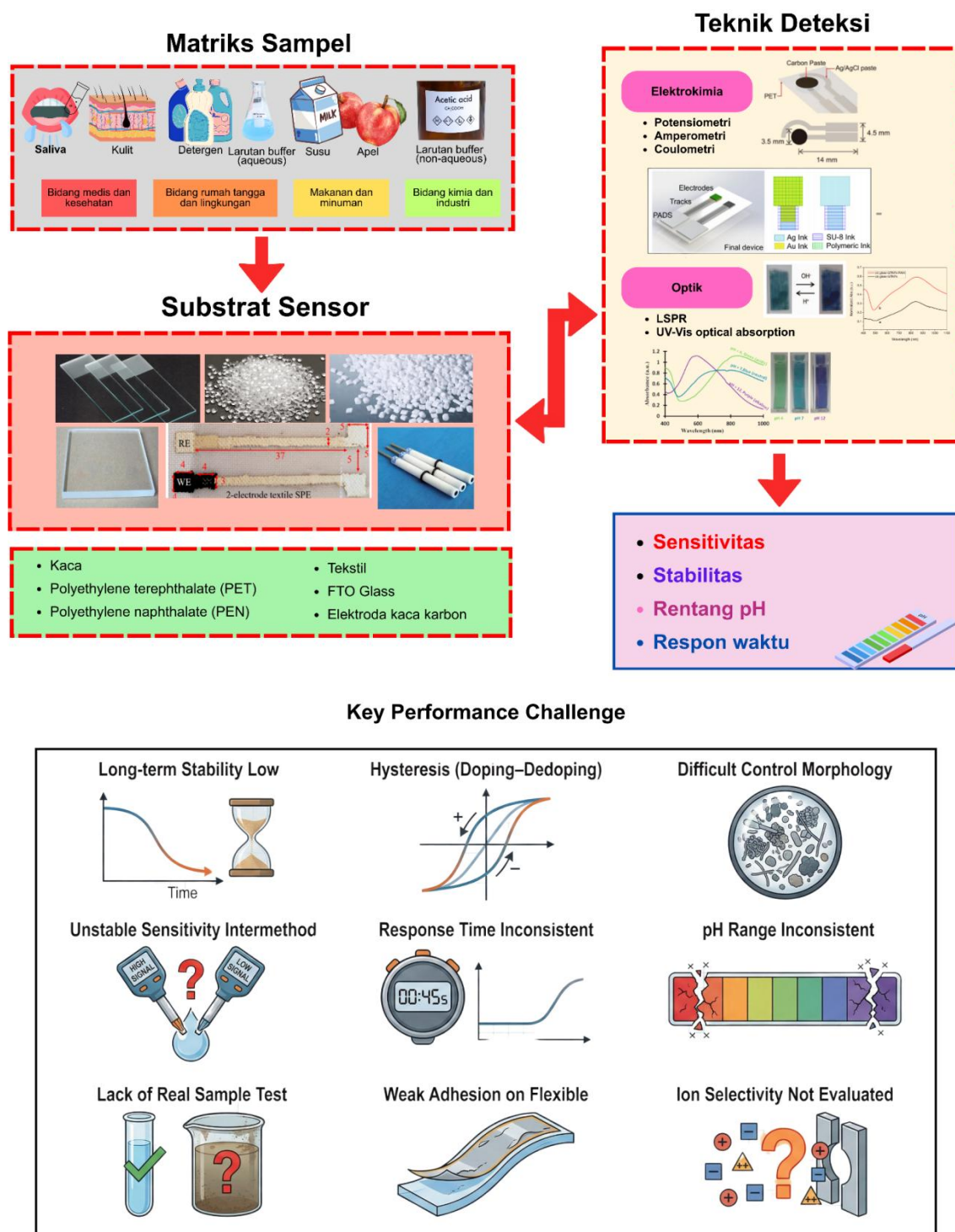
Perkembangan besar mulai terlihat pada tahun 2021 dengan hadirnya tinta komposit PANI/PPy yang dicetak menggunakan inkjet printing. Teknologi ini membawa lompatan performa seperti sensitivitasnya mencapai level super-Nernstian ($81.2 \pm 0.5\text{ mV/pH}$) dengan rentang pH yang luas (3–10), respons cepat, serta reproduktibilitas yang tinggi. Kemajuan ini berlanjut pada tahun 2024 melalui sensor berbasis film PANI hasil drop-casting pada substrat FTO. Sensor ini menjadi yang paling sensitif sejauh ini, dengan sensitivitas elektrokimia mencapai $127.3 \pm 6.2\text{ mV/pH}$, serta respons optik yang juga tinggi. Studi tersebut menunjukkan bahwa kontrol terhadap ketebalan dan tekstur permukaan film PANI dapat meningkatkan performa sensor secara signifikan. Meski demikian, penelitian ini belum menyentuh aspek-aspek penting seperti stabilitas jangka panjang, waktu respons, selektivitas ion, serta pengujian pada sampel nyata, sehingga penggunaannya masih terbatas pada kondisi laboratorium.

Secara keseluruhan, teknologi sensor pH berbasis PANI saat ini sudah berada pada tahap yang jauh lebih matang. Sensor generasi 2021–2024 menjadi yang paling sensitif dan menunjukkan performa terbaik, sementara sensor tekstil tahun 2022 tetap unggul dalam fleksibilitas meski sensitivitasnya masih rendah. Rentang pH paling luas sejauh ini dicapai oleh teknologi PANI/PPy yang dikembangkan pada 2021. Namun, satu hal yang masih menjadi pekerjaan rumah besar adalah stabilitas jangka panjang. Tidak satu pun dari studi lanjutan ini yang mengevaluasi ketahanan sensor dalam penggunaan berkepanjangan – sebuah celah penting yang masih terbuka lebar untuk penelitian berikutnya.

Ilustrasi pada **Gambar 5** menjelaskan tentang penggunaan polianilin (PANI) sebagai sensor pH, dimulai dari berbagai matriks sampel yang beragam mulai dari saliva, kulit, deterjen, pangan, hingga larutan industri yang menuntut fleksibilitas sensor pada banyak bidang aplikasi. PANI dapat diintegrasikan pada berbagai substrat sensor, seperti kaca, PET, PEN, tekstil, FTO glass, dan elektroda kaca karbon, untuk mendukung metode teknik deteksi elektrokimia (potensiometri, amperometri, coulometri) maupun optik (LSPR, UV-Vis). Kombinasi ini bertujuan menghasilkan sensor dengan sensitivitas tinggi, stabilitas baik, rentang pH luas, dan respons cepat. Namun, diagram kedua menyoroti sejumlah tantangan kinerja utama, seperti stabilitas jangka panjang yang masih rendah, histeresis akibat doping–dedoping, morfologi yang sulit dikontrol, sensitivitas antara metode yang tidak konsisten, respons time lambat, ketidakstabilan pada pH ekstrim, minimnya pengujian pada sampel nyata, adhesi lemah pada substrat fleksibel, dan selektivitas ion yang belum dievaluasi. Secara keseluruhan, ilustrasi ini menggambarkan potensi besar PANI sebagai sensor pH sekaligus tantangan riset yang masih perlu diselesaikan.

Melihat perkembangan tersebut, dapat disimpulkan bahwa studi polianilin (PANI) sebagai sensor pH tetap menjadi topik yang sangat relevan untuk penelitian akademis di masa depan. Meskipun performa sensor berbasis PANI telah meningkat pesat dalam satu dekade terakhir yang ditunjukkan oleh munculnya teknologi komposit, platform fleksibel, dan kontrol morfologi yang semakin baik, namun masih terdapat sejumlah celah ilmiah yang belum terpecahkan.

Tantangan besar seperti pada **Gambar. 5** menunjukkan bahwa PANI masih membutuhkan optimalisasi mendalam sebelum dapat diadopsi secara luas di dunia praktis. Selain itu, tren meningkatnya penggunaan substrat fleksibel, teknik fabrikasi berbiaya rendah, dan integrasi dengan perangkat portabel membuka ruang penelitian yang semakin luas, terutama dalam konteks sensor wearable, diagnostik cepat, dan monitoring lingkungan. Dengan besarnya peluang penelitian yang tersisa dan kebutuhan akan sensor pH yang lebih akurat, murah, dan mudah diintegrasikan, PANI tetap menjadi material yang menjanjikan dan layak menjadi fokus riset lanjutan di masa mendatang.

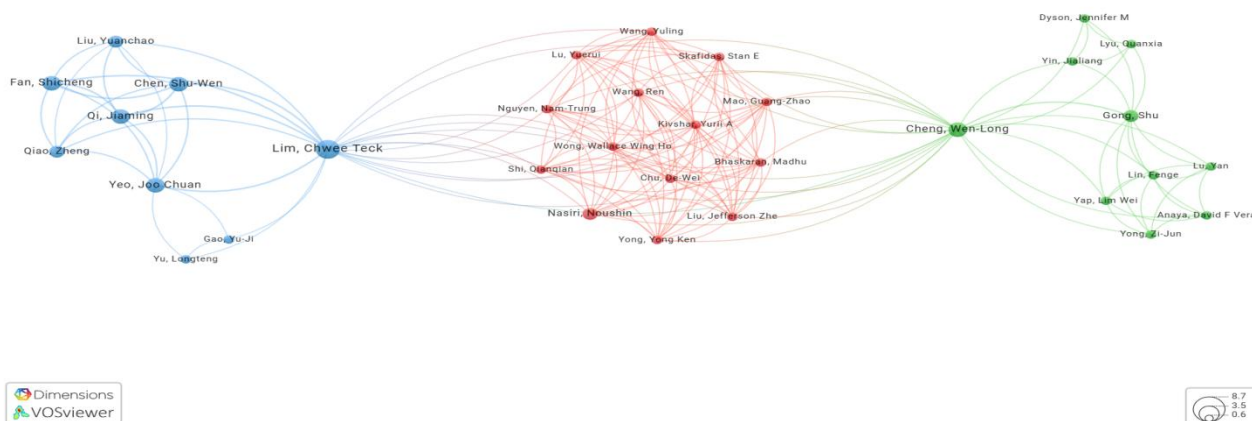


Gambar 5. Pemetaan Kinerja dan Tantangan Polianilin (PANI) dalam Pengembangan Sensor pH

RQ3: Bagaimana penelitian sensor pH berbasis Polianilin ditinjau dari jejaring kolaborasi penulis dan peta topik berdasarkan kata kunci?

Untuk menjawab pertanyaan penelitian ketiga (RQ3) mengenai peta topik dan kolaborasi yang relevan dengan isu global, penelitian ini menerapkan filter tambahan pada tahap ekstraksi data. Data disaring berdasarkan kategori *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang tersedia dalam basis data Dimensions, dengan fokus spesifik pada SDG 3 (*Good Health and Well-being*) dan SDG 14 (*Life Below Water*). Pemilihan kedua SDG ini didasarkan pada potensi ganda material Polianilin (PANI) yang dominan di dua area: sebagai biomaterial untuk kesehatan dan sebagai adsorben untuk remediasi air. Selain itu, filter bidang studi (*Fields of*

Research) dibatasi pada 4016 (*Materials Engineering*) untuk memastikan relevansi teknis dari artikel yang dianalisis.

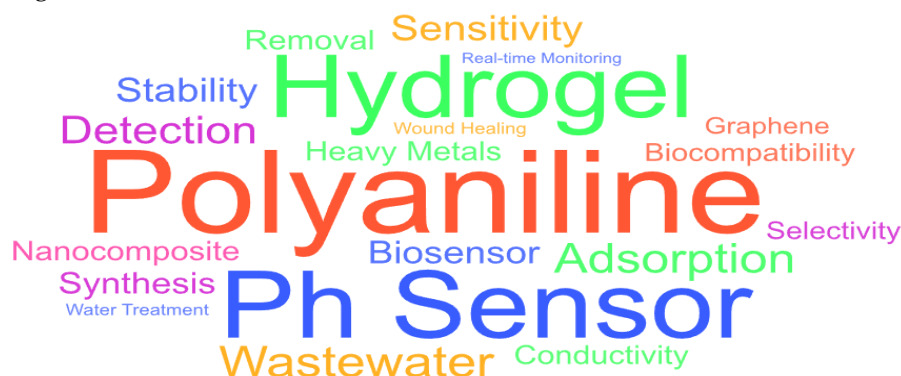


Gambar 6. Peta jaringan kolaborasi penulis (*co-authorship*) pada literatur sensor pH berbasis Polianilin

Bagian ini membedah distribusi upaya penelitian sensor pH berbasis Polianilin (PANI) periode 2016–2025. Analisis difokuskan pada irisan disiplin *Materials Engineering* dengan orientasi pada keberlanjutan (SDG 3 dan SDG 14). Visualisasi jaringan kolaborasi penulis (**Gambar 6**) memetakan struktur sosial komunitas penelitian ini. Berdasarkan analisis *co-authorship* menggunakan VOSviewer, teridentifikasi sebanyak 3 kluster kolaborasi utama. Struktur jaringan menunjukkan karakteristik yang terfragmentasi, dimana interaksi antar penulis cenderung terjadi secara lokal dalam kelompok riset tertutup (*silo*) dibandingkan membentuk jejaring global yang terintegrasi.

Analisis afiliasi penulis dari dataset menunjukkan distribusi geografis yang tidak merata. Berdasarkan jumlah dokumen, China dan India teridentifikasi sebagai *core countries* (negara inti) yang mendominasi volume publikasi, merefleksikan investasi masif kedua negara tersebut dalam riset nanoteknologi. Namun, data juga menunjukkan kontribusi signifikan dari negara-negara berkembang lainnya seperti Pakistan, Oman, dan Mesir, serta negara maju seperti Kanada dan Prancis. Meskipun partisipasi global cukup luas, minimnya ketebalan garis penghubung antar-kluster negara mengindikasikan bahwa kolaborasi internasional strategis masih belum optimal.

Berbanding terbalik dengan kolaborasi penulisnya yang terpisah, peta kata kunci (**Gambar 7**) mengungkapkan keterhubungan topik yang kuat. Analisis kookurensi kata kunci (**Gambar 7**) mengungkap struktur intelektual bidang ini. Berdasarkan frekuensi kemunculan (*occurrence*) tertinggi, berikut adalah 20 kata kunci teratas yang mendefinisikan fokus riset saat ini.



Gambar 7: Peta visualisasi *Word Cloud* 20 kata kunci dominan (2016–2025).

Daftar ini mengkonfirmasi adanya polarisasi tema yang sejalan dengan filter SDGs yang digunakan.

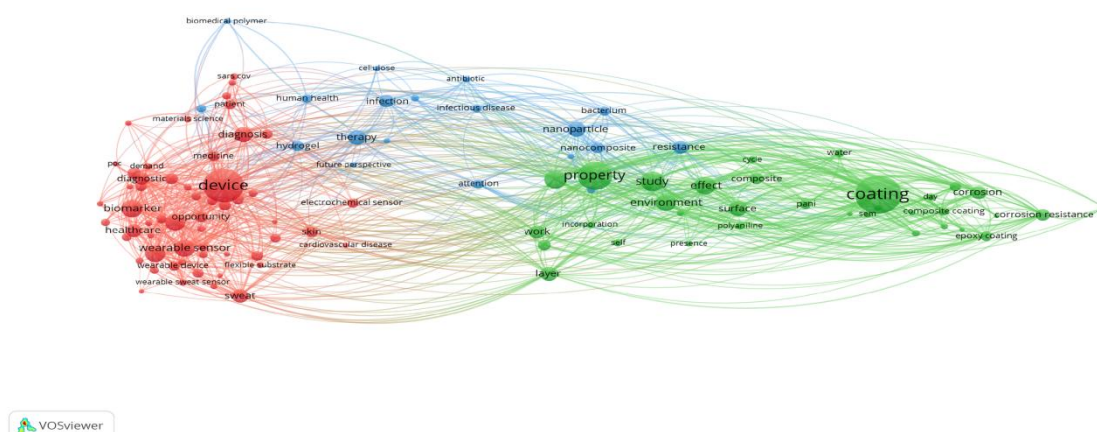
a. Kluster Kesehatan dan Rekayasa Jaringan (Kontribusi pada SDG 3)

Kluster ini divisualisasikan dengan warna merah yang mempresentasikan transformasi PANI dari sekadar sensor menjadi biomaterial cerdas. Kata kunci dominan meliputi *hydrogel*, *biocompatibility*, *wound*

healing, dan drug delivery. Dalam konteks SDG 3 (*Good Health and Well-being*) difokuskan pada sintesis PANI yang aman secara biologis dan menyerupai jaringan tubuh manusia. PANI tidak hanya berfungsi mendeteksi pH, tetapi juga menjadi kerangka (*scaffold*) untuk penyembuhan luka. Hal ini sejalan dengan tinjauan Bafdal et al. (2022) yang berfokus pada kemajuan sintesis hidrogel PANI injeksi yang responsif terhadap rangsangan pH untuk aplikasi biomedis. Lebih lanjut, integrasi PANI ke dalam sistem diagnostik canggih terlihat pada pengembangan biosensor elektrokimia bebas label untuk deteksi kortisol, sebuah biomarker stres yang memungkinkan pemantauan kesehatan preventif secara non-invasif (Kaushik et al., 2025).

b. Klaster Monitoring Lingkungan (Kontribusi pada SDG 14)

Klaster ini divisualisasikan dengan warna hijau dan biru menunjukkan aplikasi PANI dalam menjaga ekosistem perairan. Kata kunci kunci meliputi *adsorption*, *wastewater*, *heavy metal*, *removal*, dan *detection*. Dalam SDG 14 (*Life Below Water*), rekayasa material diarahkan untuk menciptakan sensor yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap polutan dalam matriks air yang kompleks. Riset sering kali menggabungkan fungsi ganda yaitu deteksi (*sensing*) dan penghilangan polutan. Penelitian oleh El-Shafey et al. (2025) menunjukkan keberhasilan memodifikasi elektroda pasta karbon dengan nanokomposit PANI/Perak untuk deteksi simultan ion logam berat toksik (Cd^{2+} dan Pb^{2+}) dalam air serta menawarkan solusi murah namun efektif untuk pemantauan kualitas air.



Gambar 5. Peta jaringan kookurensi kata kunci dari literatur sensor pH berbasis Polianilin.

Di antara kedua klaster aplikasi tersebut, terdapat irisan teknologi yang kuat yang ditandai oleh kata kunci teknis seperti *nanocomposite*, *synthesis*, dan *MXene*. Inovasi pada level nano ini menjadi fondasi *Materials Engineering* yang krusial bagi kedua bidang. Sebagaimana ditunjukkan oleh Wang et al. (2022), hibridisasi material (misalnya penggabungan PANI dengan material 2D baru) menjadi pendorong utama untuk menciptakan perangkat elektronik fleksibel dengan konduktivitas dan stabilitas mekanis tinggi. Namun, dalam analisis ini meskipun landasan teknologinya beririsan, tembok pemisah antar kelompok peneliti (**Gambar 4**) menunjukkan bahwa para pakar di bidang ini masih bekerja secara terpisah. Kondisi ini membuka peluang strategis untuk kolaborasi lintas klaster. Secara spesifik, kelompok peneliti biomedis yang ahli dalam sintesis hidrogel canggih dapat bersinergi dengan kelompok lingkungan yang ahli dalam deteksi logam berat. Kolaborasi ini berpotensi menghasilkan inovasi hibrida, seperti sensor hidrogel *wearable* untuk mendeteksi paparan polutan lingkungan pada individu sebuah teknologi yang secara efektif menggabungkan pemantauan kesehatan (SDG 3) dan kualitas lingkungan (SDG 14) dalam satu perangkat multifungsi.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai polianilin (PANI) sebagai material sensor pH terbagi dalam 3 RQ yaitu seperti berikut:

RQ1: Tren riset sensor pH berbasis PANI meningkat pesat selama 2016–2025 yang ditunjukkan oleh tiga artikel paling berpengaruh yaitu Sani et al. (2023) 260 sitasi, Park et al. (2019) 119 sitasi, dan Zhong et al. (2024)

117 sitasi. Lonjakan sitasi terutama didorong kemunculan teknologi seperti electronic skin, hidrogel konduktif, dan komposit MXene yang memperluas aplikasi PANI pada wearable dan sistem IoT. Meskipun perkembangan sangat cepat, tantangan utama tetap pada stabilitas jangka panjang dan validasi di lingkungan nyata yang masih minim diteliti.

RQ2: Penelitian mengenai polianilin (PANI) sebagai sensor pH masih sangat relevan untuk masa depan. Meskipun berbagai kemajuan telah dicapai, masih banyak tantangan penting yang belum terselesaikan, terutama terkait stabilitas jangka panjang, performa pada kondisi nyata, dan ketahanan terhadap interferensi ion. Di sisi lain, kebutuhan dunia akan sensor pH yang lebih sensitif, fleksibel, murah, dan mudah diintegrasikan terus meningkat, apalagi untuk aplikasi wearable, kesehatan, dan monitoring lingkungan. Karena itulah, PANI tetap menjadi material yang menjanjikan dan menawarkan ruang riset yang masih sangat luas untuk dikembangkan.

RQ3: Analisis pemetaan lanskap penelitian mengungkap dikotomi antara struktur sosial dan intelektual. Secara sosial, jejaring kolaborasi peneliti bersifat sangat terfragmentasi dalam klaster-klaster terisolasi dengan konektivitas global yang minim. Sebaliknya, peta topik menunjukkan spesialisasi yang kohesif pada dua domain utama yaitu kesehatan (SDG 3) yang berfokus pada hidrogel biokompatibel dan lingkungan (SDG 14) yang berorientasi pada adsorpsi polutan air. Temuan ini menegaskan perlunya inisiasi kolaborasi lintas-klaster untuk menjembatani keterpisahan tersebut guna menghasilkan inovasi sensor multifungsi di masa depan.

B. Saran

Berdasarkan temuan riset, rekomendasi strategis terbagi menjadi dua dimensi utama. Dari sisi arah penelitian, fokus masa depan sebaiknya diarahkan pada pengembangan sensor hibrida multifungsi yang mengintegrasikan pemantauan kesehatan dan lingkungan dalam satu platform, validasi performa di kondisi nyata (*real-world*) jangka panjang, serta eksplorasi material nano cerdas baru untuk meningkatkan sensitivitas. Sementara dari sisi kebijakan dan praktik, diperlukan inisiasi skema kolaborasi lintas disiplin yang terstruktur untuk mengatasi fragmentasi peneliti, penetapan standar pengujian internasional untuk validitas data, serta pendorong adopsi sensor berbasis IoT sebagai solusi pemantauan lingkungan yang terjangkau di negara berkembang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu, N. (2016). *A Flexible Optical pH Sensor Based on Polysulfone Membranes Coated with pH-Responsive*. <https://doi.org/10.3390/s16070986>
- Aldaba, A. L., González-Vila, Á., Debligny, M., Lopez-Amo, M., Caucheteur, C., & Lahem, D. (2018). Polyaniline-coated tilted fiber Bragg gratings for pH sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 254, 1087–1093. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.167>
- Bafdal, A., Zeid, E., Farag, E., El-Shahat, M. F., & El-Kenawy, E.-S. M. (2022). A short review on the synthesis and advance applications of polyaniline hydrogels. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 1928–1943. (DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.135)
- Baharin, S. N. A., Mohd Zain, Z., Zolekafeli, Z., Mehmood, S., & Sambasevam, K. P. (2024). Bibliometric analysis on conducting polymer sensors for ammonia gas detection using Scopus database. *Vietnam Journal of Chemistry*, 62(3), 399–411.
- Biswas, S., Kim, D.-K., Nam, I.-W., Choi, M., Bae, J.-H., & Kim, H. (2020). Highly conductive and thermally stable nanoparticle-conjugated polymer compounds through environmentally friendly in situ synthesis. *Progress in Organic Coatings*, 142, 105606. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105606>
- Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology reports*, 15, 11–23.
- Eduarda, B., Mücke, D., Rossignatti, B. C., Miguel, L., Abeg, G., Barbosa, M. S., Jos, H., & Dias, P. (2024). *Optimized Drop-Casted Polyaniline Thin Films for High-Sensitivity Electrochemical and Optical pH Sensors*. 1–13.

- El-Shafey, A. M., Salih, K. A. M., El-Safty, S. A., & Bhran, A. A. (2025). Simultaneous electrochemical detection of Cd²⁺ and Pb²⁺ using a green silver nanoparticles/polyaniline-modified carbon paste electrode. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(10), 15993-16007. (DOI: 10.1007/s11356-024-34860-w)
- Fraga, V. M., Lovi, I. T., & Abeg, L. M. G. (2023). *Understanding the Effect of Deposition Technique on the Structure – Property Relationship of Polyaniline Thin Films Applied in Potentiometric pH Sensor*.
- Gamboa, J., Paulo-Mirasol, S., Estrany, F., & Torras, J. (2023). Recent progress in biomedical sensors based on conducting polymer hydrogels. *ACS applied bio materials*, 6(5), 1720-1741.
- Han, T., Song, T., & Han, D. (2025). *Capacitive Coulometric Readout of Polyaniline Membrane-Based pH Sensors in Combination with Cyclic Voltammetry and Electrochemical Impedance Spectroscopy*. 1–17.
- Haque, S. U., Nasar, A., Inamuddin, & Rahman, M. M. (2020). Applications of chitosan (CHI)-reduced graphene oxide (rGO)-polyaniline (PAni) conducting composite electrode for energy generation in glucose biofuel cell. *Scientific Reports*, 10(1), 10428.
- Heng, W., Yin, S., Min, J., Wang, C., Han, H., Shirzaei Sani, E., ... & Gao, W. (2024). A smart mask for exhaled breath condensate harvesting and analysis. *Science*, 385(6712), 954-961.
- Hossain, M. S., Padmanathan, N., Badal, M. M. R., Razeeb, K. M., & Jamal, M. (2024). Highly sensitive potentiometric pH sensor based on polyaniline modified carbon fiber cloth for food and pharmaceutical applications. *ACS omega*, 9(38), 40122-40133.
- Jin, Z., Su, Y., & Duan, Y. (2000). An improved optical pH sensor based on polyaniline. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 71(1-2), 118–122. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00597-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00597-9)
- Kaempgen, M., & Roth, S. (2006). Transparent and Flexible Carbon Nanotube/Polyaniline pH Sensor. *Electrochemical Society Meeting Abstracts*, MA2006-01(17), 681. <https://doi.org/10.1149/ma2006-01/17/681>
- Kannan, P., & Maduraiveeran, G. (2023). Metal oxides nanomaterials and nanocomposite-based electrochemical sensors for healthcare applications. *Biosensors*, 13(5), 542.
- Kaushik, A., Mujawar, M. A., Bhardwaj, S. K., Sharma, S., Abbasi, A. A., Kumar, N., Krishnaswamy, S., Solanki, P. R., Bhansali, S., & Nair, M. (2025). Reagentless and Label-Free Electrochemical Aptasensor Using Polyaniline Incorporated with a Battery-Free NFC Potentiostat for One-Step Detection of Cortisol. *Analytical Chemistry*, 97(1), 317-325. (DOI: 10.1021/acs.analchem.4c04229)
- Laffitte, Y., & Gray, B. L. (2022). *Potentiometric pH Sensor Based on Flexible Screen-Printable Polyaniline Composite for Textile-Based Microfluidic Applications*.
- Lakard, B. (2020). *applied sciences Electrochemical Biosensors Based on Conducting Polymers : A Review*.
- Liu, H., Lyu, S., Liu, C., Zhang, P., Xu, X., & Chen, J. (2025). Ti3C2TX MXene/Polyaniline-Modified Nylon Fabric Electrode for Wearable Non-Invasive Glucose Monitoring in Sweat. *Analytical Chemistry*, 97(1), 326-335. (DOI: 10.1021/acs.analchem.4c04803)
- Luo, C., Wang, Y., Li, X., Jiang, X., Gao, P., & Sun, K. (2017). *An Optical Sensor with Polyaniline-Gold Hybrid Nanostructures for Monitoring pH in Saliva*. 1–11. <https://doi.org/10.3390/nano7030067>
- Magar, H. S., Hassan, R. Y., & Abbas, M. N. (2023). Non-enzymatic disposable electrochemical sensors based on CuO/Co3O4@ MWCNTs nanocomposite modified screen-printed electrode for the direct determination of urea. *Scientific Reports*, 13(1), 2034.
- Ming, T., Lan, T., Yu, M., Wang, H., Deng, J., Kong, D., Yang, S., & Shen, Z. (2023). Platinum Black/Gold Nanoparticles/Polyaniline Modified Electrochemical Microneedle Sensors for Continuous In Vivo Monitoring of pH Value. *Polymers*, 15(13), 2796. <https://doi.org/10.3390/polym15132796>
- Nyein, H. Y. Y., Gao, W., Shahpar, Z., Emaminejad, S., Challa, S., Chen, K., ... & Javey, A. (2016). A wearable electrochemical platform for noninvasive simultaneous monitoring of Ca²⁺ and pH. *ACS nano*, 10(7), 7216-7224.
- Nyein, H. Y. Y., Bariya, M., Tran, B., Ahn, C. H., Brown, B. J., Ji, W., ... & Javey, A. (2021). A wearable patch for continuous analysis of thermoregulatory sweat at rest. *Nature communications*, 12(1), 1823.
- Osuna, V., Vega-Rios, A., Zaragoza-Contreras, E. A., Estrada-Moreno, I. A., & Dominguez, R. B. (2022). Progress of polyaniline glucose sensors for diabetes mellitus management utilizing enzymatic and non-enzymatic detection. *Biosensors*, 12(3), 137.

- Park, H. J., Yoon, J. H., Lee, K. G., & Choi, B. G. (2019). Potentiometric performance of flexible pH sensor based on polyaniline nanofiber arrays. *Nano convergence*, 6(1), 9.
- Peña-Bahamonde, J., Nguyen, H. N., Fanourakis, S. K., & Rodrigues, D. F. (2018). Recent advances in graphene-based biosensor technology with applications in life sciences. *Journal of nanobiotechnology*, 16(1), 75.
- Semwal, V., & Gupta, B. D. (2019). Highly sensitive surface plasmon resonance based fiber optic pH sensor utilizing rGO-Pani nanocomposite prepared by in situ method. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 283, 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.070>
- Sheraz, M., Sun, X. F., Siddiqui, A., Wang, Y., Hu, S., & Sun, R. (2025). Cellulose-based electrochemical sensors. *Sensors*, 25(3), 645.
- Shin, Y., Lee, H. S., Hong, Y. J., Sunwoo, S. H., Park, O. K., Choi, S. H., ... & Lee, S. (2024). Low-impedance tissue-device interface using homogeneously conductive hydrogels chemically bonded to stretchable bioelectronics. *Science Advances*, 10(12), eadi7724.
- Singh, R. K., Kumar, R., & Singh, D. P. (2016). Graphene oxide: strategies for synthesis, reduction and frontier applications. *Rsc Advances*, 6(69), 64993-65011.
- Shirzaei Sani, E., Xu, C., Wang, C., Song, Y., Min, J., Tu, J., ... & Gao, W. (2023). A stretchable wireless wearable bioelectronic system for multiplexed monitoring and combination treatment of infected chronic wounds. *Science advances*, 9(12), eadf7388.
- Song, Y., Min, J., Yu, Y., Wang, H., Yang, Y., Zhang, H., & Gao, W. (2020). Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion. *Science advances*, 6(40), eaay9842.
- Vivaldi, F., Salvo, P., Poma, N., Bonini, A., Biagini, D., Noce, L. Del, Melai, B., Lisi, F., & Francesco, F. Di. (2021). *Recent Advances in Optical , Electrochemical and Field Effect pH Sensors*.
- Wang, X., Liu, C., Xin, S., Fan, S., Jia, M., Lv, H., Liu, W., Shi, G., Wang, K., & Yu, J. (2022). Elastic polyaniline nanoarrays/MXene textiles for all-solid-state supercapacitors and anisotropic strain sensors. *Nature Communications*, 13(1). (DOI: 10.1038/s41467-022-28682-9)
- Yang, J. C., Mun, J., Kwon, S. Y., Park, S., Bao, Z., & Park, S. (2019). Electronic skin: recent progress and future prospects for skin-attachable devices for health monitoring, robotics, and prosthetics. *Advanced Materials*, 31(48), 1904765.
- Zea, M., Texid, R., Villa, R., Borr, S., & Gabriel, G. (2024). *Specially Designed Polyaniline/Polypyrrole Ink for a Fully Printed Highly Sensitive pH Microsensor*. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08043>
- Zhang, H., Han, G., & Litscher, G. (2019). Traditional Acupuncture Meets Modern Nanotechnology: Opportunities and Perspectives. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019(1), 2146167. <https://doi.org/10.1155/2019/2146167>
- Zhao, Y., Yu, Y., Zhao, S., Zhu, R., Zhao, J., & Cui, G. (2023). Highly sensitive pH sensor based on flexible polyaniline matrix for synchrotron sweat monitoring. *Microchemical Journal*, 185, 108092.
- Zheng, J., Xie, Y., Wei, Y., Yang, Y., & Liu, X. (2020). *An Efficient Synthesis and Photoelectric Properties of Green Carbon Quantum Dots with High Fluorescent Quantum Yield*. 1–15.
- Zhong, B., Qin, X., Xu, H., Liu, L., Li, L., Li, Z., ... & Wang, L. (2024). Interindividual-and blood-correlated sweat phenylalanine multimodal analytical biochips for tracking exercise metabolism. *Nature Communications*, 15(1), 624.
- Zhong, Y., Lin, Q., Yu, H., Shao, L., Cui, X., Pang, Q., ... & Hou, R. (2024). Construction methods and biomedical applications of PVA-based hydrogels. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1376799.
- Zhu, X., Sun, H., Yu, B., Xu, L., Xiao, H., Fu, Z., ... & Yang, X. (2024). A flexible pH sensor based on polyaniline@oily polyurethane/polypropylene spunbonded nonwoven fabric. *RSC advances*, 14(8), 5627-5637.
- Zonta, G., Anania, G., Astol, M., Feo, C., Gaiardo, A., Gherardi, S., Giberti, A., Guidi, V., Landini, N., Palmonari, C., Togni, A. De, & Malagù, C. (2019). *Sensors and Actuators B : Chemical Chemoresistive sensors for colorectal cancer preventive screening through fecal odor : Double-blind approach* *. 301(September), 1–5.