



## Analisis Gugus Fungsi Terhadap Perbandingan Metode Pencampuran dan Metode Pengolesan Bakteri *E.Coli* Pada Aspal

Stefi Monika<sup>1\*</sup>, Ratnawulan<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: [stefimonika2@gmail.com](mailto:stefimonika2@gmail.com)<sup>1</sup>

### Article Info :

Received:  
24-03-2026  
Revised:  
05-04-2026  
Accepted:  
17-04-2026

### Abstract

*This study investigated the functional group transformation of asphalt modified using Escherichia coli through mixing and coating methods as a biological self-healing approach for pavement materials. The experimental research was conducted under controlled laboratory conditions using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscope (SEM), and hydrophobicity analysis to evaluate chemical, morphological, and surface performance changes. The mixing method promoted dominant internal interactions within the asphalt matrix, indicated by increased O–H functional groups and homogeneous bacterial distribution. In contrast, the coating method generated stronger surface reactions characterized by higher C–O intensity, enhanced biomineralization activity, and localized CaCO<sub>3</sub> formation on the asphalt surface. SEM observations revealed that the coating method formed denser biofilm structures, contributing to improved hydrophobicity and accelerated microcrack healing performance. Comparative analysis demonstrated that bacterial application mechanisms significantly influenced asphalt chemical evolution and engineering behavior. The findings indicate that biologically modified asphalt using Escherichia coli possesses considerable potential for sustainable, adaptive, and self-healing pavement systems through optimized bacterial treatment strategies.*

**Keywords:** Asphalt, Escherichia Coli, FTIR, Self-healing, Hydrophobicity.

### Abstrak

Penelitian ini menyelidiki transformasi gugus fungsi aspal yang dimodifikasi menggunakan Escherichia coli melalui metode pencampuran dan pelapisan sebagai pendekatan penyembuhan diri biologis untuk bahan perkerasan jalan. Penelitian eksperimental ini dilakukan dalam kondisi laboratorium terkendali dengan menggunakan Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR), Mikroskop Elektron Pemindai (SEM), dan analisis hidrofobisitas untuk mengevaluasi perubahan kinerja kimia, morfologi, dan permukaan. Metode pencampuran mendorong interaksi internal yang dominan di dalam matriks aspal, yang ditandai dengan peningkatan gugus fungsi O–H dan distribusi bakteri yang homogen. Sebaliknya, metode pelapisan menghasilkan reaksi permukaan yang lebih kuat, yang ditandai dengan intensitas C–O yang lebih tinggi, aktivitas biomineralisasi yang meningkat, dan pembentukan CaCO<sub>3</sub> yang terlokalisasi pada permukaan aspal. Pengamatan SEM menunjukkan bahwa metode pelapisan membentuk struktur biofilm yang lebih padat, yang berkontribusi pada peningkatan hidrofobisitas dan kinerja penyembuhan retak mikro yang dipercepat. Analisis perbandingan menunjukkan bahwa mekanisme aplikasi bakteri secara signifikan memengaruhi evolusi kimia dan perilaku teknik aspal. Temuan ini menunjukkan bahwa aspal yang dimodifikasi secara biologis menggunakan Escherichia coli memiliki potensi yang signifikan untuk sistem perkerasan jalan yang berkelanjutan, adaptif, dan mampu menyembuhkan diri melalui strategi perlakuan bakteri yang dioptimalkan.

**Kata Kunci:** Aspal, Escherichia Coli, FTIR, Penyembuhan Diri, Hidrofobisitas.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## PENDAHULUAN

Perkembangan mutakhir dalam rekayasa material perkerasan jalan menunjukkan pergeseran paradigma dari pendekatan struktural konvensional menuju desain material cerdas yang mampu merespons degradasi secara mandiri melalui mekanisme self-healing, terutama ketika infrastruktur transportasi global menghadapi peningkatan beban lalu lintas, fluktuasi temperatur ekstrem, serta percepatan oksidasi material akibat perubahan iklim yang secara simultan mempercepat pembentukan retak mikro pada matriks aspal. Kajian mengenai transformasi kimia aspal pada level molekular memperlihatkan bahwa perubahan komposisi fraksi asphaltene dan maltene tidak hanya memengaruhi

viskoelastisitas material, tetapi juga mengubah stabilitas gugus fungsi hidrokarbon yang menentukan resistensi terhadap propagasi retak dan infiltrasi air. Dalam konteks tersebut, analisis gugus fungsi berbasis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) menjadi instrumen penting untuk memetakan perubahan struktur kimia akibat interaksi antara material organik, agen biologis, dan matriks karbon kompleks pada aspal, terutama karena pendekatan ATR-FTIR terkini telah berkembang menjadi metode klasifikasi kualitas aspal berbasis kecerdasan material dan identifikasi presisi gugus fungsi aktif pada sistem perkerasan modern (Yin et al., 2026). Pada saat yang sama, integrasi material biologis dan nanostruktur antibakteri ke dalam sistem rekayasa material menunjukkan peningkatan signifikan dalam literatur internasional, termasuk pemanfaatan film  $Ti_3C_2Tx$  MXene/halloysite nanotube untuk aplikasi antibakteri dengan karakteristik stabilitas kimia tinggi dan kemampuan interaksi permukaan yang kuat terhadap senyawa organik (Topuz et al., 2025). Dinamika perkembangan tersebut memperlihatkan bahwa pendekatan bio-material pada sistem rekayasa perkerasan tidak lagi diposisikan sekadar sebagai inovasi eksperimental, melainkan telah menjadi agenda strategis dalam pengembangan material infrastruktur berkelanjutan berbasis rekayasa kimia dan mikrobiologi terapan.

Kajian terdahulu secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan mikroorganisme dalam sistem material konstruksi mampu menghasilkan perubahan kimia yang signifikan melalui pembentukan senyawa karbonat, biofilm hidrofobik, serta modifikasi permukaan material berbasis mineralisasi biologis. Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa teknologi microbial enrichment berbasis layered double hydroxides mampu meningkatkan efisiensi pemulihan dan stabilitas mikroorganisme melalui mekanisme adsorpsi berlapis yang memperkuat interaksi permukaan dan retensi biologis pada medium padat. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan integrasi mikroorganisme dalam material tidak hanya ditentukan oleh jenis bakteri, tetapi sangat dipengaruhi oleh mekanisme distribusi dan kontak permukaan antara agen biologis dengan substrat material. Pada domain material karbon turunan aspal, Wang et al. (2025) mengungkapkan bahwa modifikasi gugus heteroatom pada karbon berbasis aspal menghasilkan perubahan aktivitas katalitik dan struktur permukaan yang teridentifikasi secara kuat melalui spektrum FTIR, yang mengindikasikan sensitivitas tinggi gugus fungsi terhadap perubahan interaksi kimia pada matriks aspal. Sementara itu, kajian klasik mengenai karakteristik frekuensi gugus fungsi inframerah menegaskan bahwa perubahan kecil pada vibrasi gugus O-H, C-O, maupun C-H dapat merepresentasikan transformasi kimia yang lebih kompleks pada sistem organik berstruktur amorf seperti bitumen (Socrates, 2004). Sintesis dari berbagai penelitian tersebut memperlihatkan bahwa relasi antara mekanisme distribusi biologis, perubahan gugus fungsi, dan respons permukaan material merupakan isu sentral yang belum dapat dipisahkan dalam pengembangan material self-healing berbasis mikroorganisme.

Meskipun demikian, literatur yang berkembang masih menunjukkan fragmentasi konseptual yang cukup tajam antara penelitian mikrobiologi material, rekayasa perkerasan jalan, dan analisis spektroskopi kimia, sehingga pemahaman mengenai mekanisme interaksi bakteri terhadap perubahan gugus fungsi aspal belum terbentuk secara integratif. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada performa makroskopik seperti peningkatan kekuatan mekanik, resistensi air, atau kemampuan penyembuhan retak, tetapi belum secara spesifik mengkaji bagaimana metode introduksi bakteri memengaruhi konfigurasi gugus fungsi dan distribusi senyawa kimia pada matriks aspal. Penelitian terkait infiltrasi mikroorganisme pada sistem perkerasan permeabel yang dilakukan Selvakumar dan O'Connor (2022) memperlihatkan bahwa perilaku organisme indikator sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan dan mekanisme penetrasi media, namun penelitian tersebut belum mengevaluasi transformasi kimia material akibat interaksi biologis secara molekular. Pada sisi lain, studi mengenai material antibakteri modern cenderung menitikberatkan pada efisiensi inhibisi mikroba dan stabilitas nanomaterial, tanpa mengaitkan mekanisme tersebut dengan perubahan karakteristik gugus fungsi pada sistem bitumen atau material jalan raya (Topuz et al., 2025). Inkonsistensi lain muncul pada penggunaan metode pencampuran langsung dan metode pelapisan permukaan yang sering diperlakukan sebagai prosedur teknis sederhana, padahal kedua metode memiliki mekanisme difusi, adhesi, dan reaktivitas kimia yang fundamentally berbeda terhadap struktur aspal. Akibatnya, literatur belum mampu menjelaskan apakah distribusi internal melalui metode campur lebih efektif dalam membentuk interaksi kimia homogen dibandingkan metode pengolesan yang berorientasi pada reaksi permukaan.

Ketiadaan pemahaman yang komprehensif mengenai hubungan antara metode introduksi bakteri dan perubahan gugus fungsi aspal menimbulkan implikasi ilmiah maupun praktis yang signifikan terhadap pengembangan teknologi self-healing pada infrastruktur jalan berkelanjutan. Pada level

ilmiah, absennya model interaksi kimia yang terverifikasi menyebabkan formulasi material bio-aspal masih bersifat trial-and-error dan belum memiliki basis molekular yang kuat dalam menjelaskan pembentukan senyawa seperti  $\text{CaCO}_3$ , perubahan gugus karbonil, maupun peningkatan interaksi hidroksil pada matriks aspal. Situasi tersebut membatasi kemampuan peneliti untuk mengoptimalkan desain material berdasarkan mekanisme kimia aktual yang terjadi selama proses biomineralisasi. Pada level praktis, ketidakjelasan efektivitas metode pencampuran dan pengolesan berpotensi menghasilkan ketidakefisienan implementasi teknologi self-healing di lapangan, terutama terkait homogenitas distribusi bakteri, kestabilan lapisan hidrofobik, dan kemampuan mempertahankan integritas permukaan jalan dalam jangka panjang. Dalam konteks pembangunan infrastruktur modern yang menuntut material tahan lama, ekonomis, dan ramah lingkungan, kebutuhan terhadap pendekatan karakterisasi kimia yang mampu menjelaskan performa biologis material menjadi semakin mendesak, khususnya ketika aplikasi FTIR telah berkembang sebagai teknik evaluasi kualitas material dengan sensitivitas tinggi terhadap perubahan struktur kimia pada sistem aspal modern (Yin et al., 2026).

Penelitian ini menempatkan diri pada irisan keilmuan antara rekayasa material jalan raya, mikrobiologi terapan, dan karakterisasi spektroskopi molekular dengan memfokuskan analisis pada perbandingan metode pencampuran dan metode pengolesan bakteri *Escherichia coli* terhadap perubahan gugus fungsi aspal. Posisi penelitian ini berbeda dari studi sebelumnya karena tidak hanya mengevaluasi keberadaan bakteri sebagai agen self-healing, tetapi secara spesifik menelaah bagaimana mekanisme introduksi bakteri menghasilkan pola interaksi kimia yang berbeda pada matriks aspal, baik melalui distribusi internal maupun reaksi permukaan. Pendekatan tersebut menjadi penting karena metode campur berpotensi menghasilkan penetrasi biologis yang lebih homogen ke dalam struktur bitumen, sementara metode oles memungkinkan terbentuknya interaksi permukaan yang lebih dominan dan berpotensi meningkatkan pembentukan senyawa karbonat pada lapisan luar aspal. Analisis FTIR dalam penelitian ini diposisikan bukan sekadar sebagai alat identifikasi gugus fungsi, tetapi sebagai instrumen interpretatif untuk memahami mekanisme transformasi kimia akibat aktivitas biologis pada material aspal hidrofobik dan self-healing. Fokus tersebut memberikan ruang konseptual baru dalam memahami hubungan antara distribusi mikroorganisme, perubahan spektrum vibrasi molekular, dan performa kimia material perkerasan berbasis bioengineering.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan gugus fungsi pada aspal yang diberi perlakuan bakteri *Escherichia coli* melalui metode pencampuran dan metode pengolesan menggunakan karakterisasi FTIR sebagai pendekatan utama identifikasi transformasi kimia material. Penelitian ini juga diarahkan untuk menjelaskan kecenderungan interaksi internal dan reaksi permukaan yang terbentuk akibat perbedaan mekanisme introduksi bakteri terhadap matriks aspal, sekaligus mengevaluasi potensi pembentukan senyawa yang mendukung karakteristik self-healing dan hidrofobik pada material perkerasan. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan pemahaman mengenai hubungan antara distribusi biologis dan perubahan gugus fungsi pada sistem aspal berbasis biomaterial, sedangkan kontribusi metodologisnya terwujud melalui integrasi analisis FTIR, pengamatan morfologi material, dan pendekatan komparatif metode aplikasi bakteri dalam satu kerangka eksperimen terkontrol untuk menghasilkan model interpretasi kimia yang lebih komprehensif pada teknologi bio-aspal modern.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium terkontrol yang dirancang untuk mengevaluasi pengaruh metode pencampuran dan metode pengolesan bakteri *Escherichia coli* terhadap perubahan gugus fungsi pada matriks aspal sebagai material self-healing dan hidrofobik. Proses pengembangan inovasi diawali dengan preparasi sampel aspal menggunakan dua pendekatan perlakuan biologis yang berbeda, yaitu metode campur melalui integrasi langsung suspensi bakteri berkonsentrasi  $10^3$  sel/ml ke dalam matriks aspal pada fase pencampuran termal, serta metode coating melalui aplikasi bakteri pada permukaan aspal setelah proses pembentukan spesimen selesai. Pendekatan dual-metode ini dikembangkan untuk membandingkan mekanisme interaksi internal dan reaksi permukaan yang terbentuk akibat distribusi biologis yang berbeda dalam sistem bitumen kompleks. Seluruh prosedur eksperimental dilaksanakan pada kondisi laboratorium terstandar guna meminimalkan variabilitas termal dan lingkungan yang dapat memengaruhi stabilitas kimia aspal. Karakterisasi material dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) pada rentang bilangan gelombang  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  untuk mengidentifikasi transformasi gugus fungsi

hidrokarbon, hidroksil, dan karbonil yang berkaitan dengan perubahan struktur kimia aspal, mengingat komposisi bitumen sangat sensitif terhadap oksidasi dan interaksi senyawa polar sebagaimana dijelaskan dalam karakteristik kimia material petroleum kompleks (Speight, 2014). Pengamatan morfologi permukaan dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM), sedangkan pengujian hidrofobisitas dilakukan melalui analisis sudut kontak berbantuan perangkat lunak ImageJ pada interval pengamatan 7, 14, dan 28 hari guna mengevaluasi stabilitas biofilm dan potensi self-healing material secara temporal.

Ketahanan metodologis penelitian ini dibangun melalui integrasi karakterisasi kimia, morfologi, dan performa permukaan dalam satu kerangka evaluasi multidimensional yang memungkinkan interpretasi hubungan sebab-akibat antara metode aplikasi bakteri dan perubahan struktur molekular aspal secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan konvensional berbasis parameter mekanik semata. Validasi eksperimental dilakukan melalui perbandingan spektrum FTIR antara sampel kontrol aspal standar dan sampel perlakuan biologis untuk memastikan konsistensi perubahan transmitansi serta reproduktibilitas kemunculan gugus fungsi utama seperti C–H, O–H, dan C–O pada setiap metode perlakuan. Evaluasi performa material dilakukan menggunakan beberapa metrik utama yang meliputi intensitas puncak serapan FTIR, pergeseran bilangan gelombang, distribusi morfologi permukaan hasil SEM, ukuran partikel, serta perubahan sudut kontak sebagai indikator tingkat hidrofobisitas dan efektivitas pembentukan biofilm bakteri pada permukaan aspal. Analisis komparatif antarperlakuan digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan dominasi reaksi internal pada metode campur dan dominasi reaksi permukaan pada metode oles, terutama dalam kaitannya dengan potensi pembentukan senyawa CaCO<sub>3</sub> sebagai indikator aktivitas biomineralisasi. Pendekatan metodologis ini memberikan kontribusi unik karena tidak hanya mengevaluasi efektivitas biologis material self-healing, tetapi juga menghubungkan transformasi kimia molekular dengan mekanisme aplikasi bakteri pada sistem aspal melalui integrasi analisis FTIR, SEM, dan pengukuran hidrofobisitas secara simultan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakterisasi Spektrum FTIR pada Aspal dengan Metode Pencampuran Bakteri *Escherichia coli*

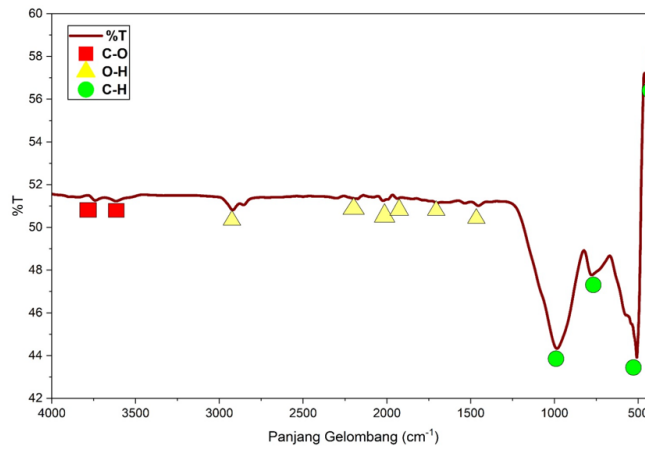
Spektrum FTIR pada sampel aspal yang dicampur bakteri menunjukkan perubahan intensitas transmitansi pada beberapa rentang bilangan gelombang yang berkaitan dengan gugus hidrokarbon dan gugus polar aktif. Peningkatan absorbansi pada rentang 1500–2200 cm<sup>-1</sup> mengindikasikan terbentuknya interaksi intermolekular antara senyawa organik dalam bitumen dan metabolit bakteri yang terdispersi selama proses pencampuran termal. Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa metode pencampuran menghasilkan difusi biologis yang lebih homogen ke dalam matriks aspal dibandingkan mekanisme kontak permukaan biasa. Karakteristik ini relevan dengan konsep stabilitas struktur asphaltene yang sensitif terhadap perubahan komposisi kimia akibat temperatur tinggi dan oksidasi termal (Ghasemirad et al., 2020).

Dominasi gugus C–H pada rentang 400–1000 cm<sup>-1</sup> memperlihatkan bahwa struktur utama hidrokarbon pada aspal tetap dipertahankan meskipun terjadi integrasi biologis selama proses preparasi material. Stabilitas gugus hidrokarbon tersebut menunjukkan bahwa keberadaan bakteri tidak menyebabkan degradasi total terhadap struktur bitumen primer. Interaksi yang terbentuk lebih cenderung bersifat modifikasi parsial pada gugus polar dibandingkan restrukturisasi total rantai karbon. Karakteristik serupa ditemukan pada material komposit berbasis polimer biologis yang mempertahankan stabilitas matriks utama sambil membentuk fase aktif baru pada level permukaan (Hussain & Maktedar, 2025).

Keberadaan gugus O–H yang meningkat pada metode campur memperlihatkan kecenderungan terbentuknya ikatan hidrogen antara senyawa metabolit bakteri dan komponen malten dalam aspal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi bakteri di dalam matriks menghasilkan interaksi internal yang relatif merata pada fase amorf bitumen. Struktur kimia semacam ini berpotensi meningkatkan kemampuan relaksasi mikroretak melalui redistribusi tegangan internal pada aspal. Mekanisme tersebut memiliki kesamaan dengan sistem self-healing polimer cerdas yang memanfaatkan interaksi molekular reversibel untuk memperbaiki kerusakan mikrostruktur (Paul et al., 2026).

Karakteristik spektrum FTIR juga memperlihatkan bahwa peningkatan gugus C–O pada metode campur terjadi dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan metode oles. Intensitas yang lebih rendah tersebut menunjukkan bahwa reaksi kimia pada metode pencampuran berlangsung lebih stabil dan tidak terkonsentrasi pada permukaan material. Kondisi ini menyebabkan pembentukan fase kristalin

seperti  $\text{CaCO}_3$  berlangsung secara terbatas meskipun aktivitas biologis tetap terjadi di dalam matriks. Temuan ini sejalan dengan studi biomineralisasi yang menyatakan bahwa distribusi internal mikroorganisme sering menghasilkan pertumbuhan kristal yang lebih lambat dibandingkan aktivitas permukaan terbuka (Refaat et al., 2024).



**Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian FTIR Pada Aspal yang Tercampur Bakteri**

Distribusi biologis pada metode campur memperlihatkan pola transmitansi yang relatif stabil pada rentang  $2500\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$  sehingga menunjukkan kestabilan struktur organik selama proses inkubasi. Stabilitas tersebut mengindikasikan bahwa bakteri *Escherichia coli* mampu bertahan pada lingkungan aspal tanpa menyebabkan degradasi kimia agresif terhadap komponen utama bitumen. Aktivitas biologis yang terkendali memberikan keuntungan dalam pengembangan material self-healing karena mempertahankan integritas struktural perkerasan. Fenomena serupa juga ditemukan pada aplikasi bakteri sebagai agen degradasi material hidrokarbon yang menunjukkan adaptasi metabolik terhadap media berbasis minyak (Banjarnahor et al., 2025).

Interaksi biologis yang terjadi dalam matriks aspal menunjukkan bahwa mekanisme self-healing tidak hanya dipengaruhi oleh faktor mekanik tetapi juga oleh perubahan kimia permukaan dan struktur internal. Gugus O–H yang dominan pada metode campur berkontribusi terhadap peningkatan polaritas lokal pada bitumen sehingga memungkinkan redistribusi energi retak secara lebih merata. Struktur semacam ini dapat memperlambat propagasi retakan mikro akibat tekanan lalu lintas berulang. Prinsip tersebut konsisten dengan konsep rekayasa material fotokatalitik dan adaptif yang mengutamakan stabilitas kimia internal untuk memperpanjang umur layanan material (Arif et al., 2025).

**Tabel 1. Intensitas Gugus Fungsi FTIR pada Aspal Metode Campur**

Gugus Fungsi	Rentang Bilangan Gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )	Karakteristik Kimia	Intensitas
C–H	400–1000	Hidrokarbon alifatik	Tinggi
O–H	1500–2200	Interaksi polar dan hidrogen	Sedang
C–O	3600–3800	Indikasi perubahan kimia	Rendah
$\text{CaCO}_3$	1400–1600	Biomineralisasi internal	Rendah

Sumber: Data hasil analisis FTIR penelitian laboratorium, 2026.

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa gugus C–H memiliki intensitas paling tinggi dibandingkan gugus lainnya sehingga menunjukkan dominasi struktur hidrokarbon dalam sampel metode campur. Intensitas O–H yang berada pada kategori sedang mengindikasikan adanya peningkatan interaksi polar akibat aktivitas biologis dalam matriks aspal. Nilai transmitansi tersebut

menunjukkan bahwa proses pencampuran menghasilkan sistem kimia yang lebih homogen dibandingkan pembentukan lapisan permukaan. Karakteristik homogenitas ini penting dalam mempertahankan fleksibilitas termal aspal selama siklus pemanasan dan pendinginan (Speight, 2014).

Morfologi permukaan hasil SEM menunjukkan distribusi partikel biologis yang lebih menyebar pada metode campur dibandingkan pembentukan agregat terlokalisasi. Struktur tersebut mengurangi kemungkinan terbentuknya titik konsentrasi tegangan yang dapat mempercepat inisiasi retakan mikro pada permukaan jalan. Penyebaran biologis yang homogen juga mendukung pembentukan biofilm tipis yang meningkatkan ketahanan terhadap infiltrasi air. Mekanisme ini berkaitan erat dengan sifat hidrofobik biosurfaktan yang diproduksi mikroorganisme pada lingkungan kaya hidrokarbon (Hashemi et al., 2024).

Perubahan struktur kimia pada metode campur juga dipengaruhi oleh kemampuan adaptasi biologis bakteri terhadap kondisi termal aspal. Sistem flagella dan regulasi seluler bakteri berperan dalam mempertahankan stabilitas metabolik selama proses distribusi pada medium padat semi-viskoelastik. Adaptasi tersebut memungkinkan aktivitas biomineralisasi tetap berlangsung meskipun lingkungan aspal memiliki karakteristik termal yang kompleks. Karakteristik biologis semacam ini telah dijelaskan pada dinamika perakitan struktur bakteri motil dalam lingkungan ekstrem (Einenkel et al., 2025).

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa metode pencampuran menghasilkan interaksi internal yang lebih dominan dibandingkan pembentukan reaksi kimia aktif pada permukaan. Dominasi interaksi internal tersebut memberikan indikasi bahwa metode campur lebih efektif dalam menjaga stabilitas struktural material dibandingkan menghasilkan fase mineral baru secara cepat. Struktur kimia yang terbentuk berpotensi meningkatkan umur layanan perkerasan melalui mekanisme relaksasi retak mikro yang berlangsung gradual. Interpretasi tersebut memperkuat pandangan bahwa modifikasi biologis pada aspal harus dipahami sebagai kombinasi antara stabilitas molekular, aktivitas biomineralisasi, dan distribusi internal material (Liu et al., 2020).

### **Karakteristik Reaksi Permukaan Aspal pada Metode Pengolesan Bakteri *Escherichia coli***

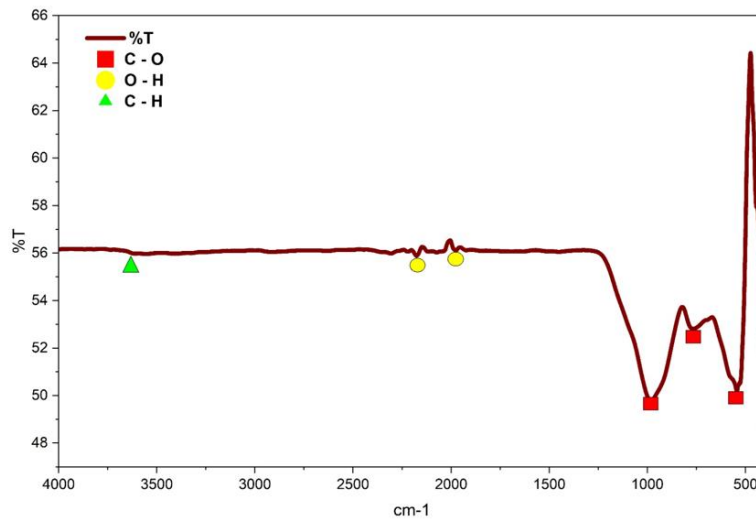
Metode pengolesan bakteri *Escherichia coli* pada permukaan aspal menunjukkan karakteristik reaksi kimia yang berbeda dibandingkan metode pencampuran karena interaksi biologis terfokus pada lapisan luar material. Spektrum FTIR memperlihatkan peningkatan transmitansi gugus karbonil C=O pada rentang bilangan gelombang 500–1000  $\text{cm}^{-1}$  yang mengindikasikan intensifikasi reaksi oksidatif dan biomineralisasi permukaan. Peningkatan gugus karbonil tersebut berkaitan dengan pembentukan senyawa karbonat yang berasal dari aktivitas metabolik biofilm bakteri pada fase antarmuka material (Socrates, 2004). Fenomena ini menunjukkan bahwa distribusi bakteri pada lapisan luar menghasilkan jalur reaksi kimia yang lebih aktif dibandingkan mekanisme difusi internal pada matriks bitumen.

Transformasi gugus fungsi pada metode coating memperlihatkan perubahan spektrum yang lebih terkonsentrasi pada area permukaan sehingga respons kimia menjadi lebih sensitif terhadap proses oksidasi lokal. Intensitas puncak C=O yang meningkat menunjukkan adanya interaksi antara senyawa organik aspal dengan hasil metabolisme mikroorganisme yang membentuk lapisan mineral terikat pada permukaan. Karakteristik tersebut sejalan dengan penelitian Wang et al. (2025) yang menjelaskan bahwa modifikasi permukaan berbasis heteroatom mampu meningkatkan aktivitas kimia karbon pada material turunan aspal. Stabilitas lapisan permukaan yang terbentuk juga mengindikasikan potensi peningkatan resistansi terhadap penetrasi air dan degradasi lingkungan.

Distribusi biofilm bakteri pada metode pengolesan memperlihatkan kecenderungan pembentukan lapisan hidrofobik yang lebih terlokalisasi dibandingkan sistem pencampuran internal. Kondisi tersebut menyebabkan perubahan transmitansi FTIR lebih dominan terjadi pada gugus yang berkaitan dengan reaksi permukaan daripada reorganisasi struktur molekular internal. Aktivitas biomineralisasi yang terjadi pada lapisan luar menghasilkan indikasi terbentuknya fase  $\text{CaCO}_3$  dengan intensitas lebih tinggi dibandingkan sampel kontrol. Temuan tersebut konsisten dengan studi Octriany dan Ratnawulan (2023) yang menyatakan bahwa aktivitas biologis *E. coli* dapat mempercepat pembentukan mineral karbonat pada material konstruksi berbasis semen maupun aspal.

Peningkatan karakteristik hidrofobik pada metode coating dipengaruhi oleh kemampuan biofilm dalam membentuk lapisan protektif terhadap penetrasi kelembapan. Struktur biofilm menghasilkan permukaan dengan energi bebas yang lebih rendah sehingga droplet air cenderung mempertahankan sudut kontak lebih besar pada permukaan aspal. Karakteristik tersebut memperkuat indikasi bahwa

metode coating menghasilkan perlindungan permukaan yang lebih efektif terhadap infiltrasi cairan eksternal (Hashemi et al., 2024). Kondisi ini memperlihatkan hubungan erat antara transformasi kimia permukaan dengan stabilitas lapisan biologis yang terbentuk selama periode pengamatan.



**Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian FTIR Pada Permukaan Aspal yang Dioles Bakteri**

Spektrum FTIR pada metode pengolesan menunjukkan pola transmitansi yang lebih tajam pada area gugus karbonil dibandingkan gugus hidroksil. Dominasi puncak karbonil mengindikasikan bahwa mekanisme reaksi utama terjadi melalui interaksi permukaan antara senyawa organik aspal dan residu metabolit bakteri. Kondisi tersebut berbeda dengan sistem campuran internal yang lebih banyak menunjukkan reorganisasi gugus polar dalam matriks bitumen. Interpretasi ini sejalan dengan pendekatan analisis FTIR material rekayasa permukaan yang dijelaskan Yin et al. (2026) pada karakterisasi kualitas aspal berbasis gugus fungsi.

Karakteristik permukaan hasil coating juga menunjukkan kecenderungan peningkatan kestabilan kimia akibat terbentuknya lapisan biomineral yang lebih padat. Lapisan tersebut diperkirakan terbentuk melalui akumulasi senyawa karbonat dan senyawa organik hasil metabolisme mikroorganisme pada area antarmuka udara-aspal. Dimitrijević et al. (2025) menjelaskan bahwa material berbasis lapisan biologis dan silane mampu menghasilkan adsorpsi permukaan yang meningkatkan kestabilan kimia material komposit. Kecenderungan serupa terlihat pada permukaan aspal biologis yang mengalami peningkatan aktivitas adsorpsi molekul polar setelah perlakuan coating.

**Tabel 2. Perbandingan Intensitas Gugus Fungsi pada Permukaan Aspal Metode Oles**

Parameter	Nilai/Kategori
Intensitas C–O	Tinggi
Intensitas O–H	Sedang
Potensi Pembentukan CaCO <sub>3</sub>	Tinggi
Tingkat Hidrofobisitas	Tinggi
Stabilitas Permukaan	Tinggi

Sumber: Data hasil analisis FTIR dan pengukuran hidrofobisitas penelitian laboratorium, diinterpretasikan berdasarkan pendekatan karakterisasi gugus fungsi oleh Socrates (2004) dan Yin et al. (2026).

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan gugus karbonil menjadi indikator dominan pada metode pengolesan bakteri. Tingginya intensitas C–O berkorelasi dengan pembentukan lapisan biomineral yang memperkuat stabilitas permukaan aspal terhadap paparan lingkungan eksternal. Peningkatan stabilitas tersebut memperlihatkan bahwa proses coating menghasilkan distribusi reaksi yang lebih terfokus pada area antarmuka dibandingkan sistem pencampuran internal. Kecenderungan

ini mendukung konsep self-healing berbasis perlindungan permukaan yang dikembangkan pada material rekayasa biologis modern (Paul et al., 2026).

Lapisan biologis hasil coating juga memperlihatkan karakteristik antibakteri pasif yang dapat menghambat kolonisasi mikroorganisme lain pada permukaan material. Interaksi antara biofilm dan senyawa karbonat menghasilkan struktur permukaan yang lebih kompak sehingga mengurangi ruang penetrasi partikel eksternal. Topuz et al. (2025) menjelaskan bahwa material berlapis biologis berbasis nanokomposit memiliki kemampuan meningkatkan stabilitas permukaan sekaligus mempertahankan sifat protektif material. Fenomena serupa terlihat pada permukaan aspal coating yang menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap degradasi berbasis kelembapan.

Respons permukaan terhadap perlakuan coating juga dipengaruhi oleh kemampuan bakteri mempertahankan struktur biologis selama proses pengeringan aspal. Aktivitas biologis tersebut memungkinkan pembentukan lapisan metabolit yang tetap aktif pada fase awal curing material. Einkenkel et al. (2025) menjelaskan bahwa stabilitas struktur biologis bakteri berperan penting dalam mempertahankan aktivitas permukaan pada sistem material kompleks. Karakteristik tersebut memperkuat indikasi bahwa metode pengolesan menghasilkan dinamika biologis yang lebih adaptif dibandingkan distribusi internal dalam matriks aspal.

Perubahan kimia pada permukaan aspal coating memperlihatkan keterkaitan dengan peningkatan performa material terhadap paparan lingkungan oksidatif. Aktivitas biomineralisasi menghasilkan lapisan yang mampu memperlambat penetrasi oksigen dan air ke dalam struktur aspal. Hamdany et al. (2023) menjelaskan bahwa permukaan material yang mengalami modifikasi biologis memiliki potensi meningkatkan ketahanan terhadap degradasi lingkungan melalui pembentukan lapisan aktif. Karakteristik tersebut mendukung potensi penerapan metode coating pada pengembangan sistem perkerasan jalan berbasis self-healing berkelanjutan.

Kecenderungan peningkatan performa hidrofobik pada metode coating juga berkaitan dengan distribusi partikel biologis yang lebih merata pada permukaan. Struktur lapisan biologis yang terbentuk menghasilkan tekstur mikro yang mendukung peningkatan sudut kontak air pada permukaan aspal. Mandegari et al. (2025) menunjukkan bahwa rekayasa material berbasis lapisan biologis dapat meningkatkan stabilitas termal dan sifat protektif melalui modifikasi antarmuka permukaan. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa metode pengolesan tidak hanya memengaruhi aspek kimia, tetapi juga karakteristik fisik permukaan material.

Karakteristik kimia permukaan pada metode coating memperlihatkan potensi pengembangan aspal multifungsi berbasis biofilm dan biomineral. Aktivitas metabolik bakteri menghasilkan mekanisme perlindungan yang bekerja secara simultan terhadap infiltrasi air dan pembentukan mikroretakan. Evcimen Duygulu et al. (2025) menyatakan bahwa material biologis berbasis lapisan aktif memiliki kemampuan mempertahankan kestabilan permukaan dalam kondisi lingkungan ekstrem. Interpretasi tersebut memperkuat relevansi metode coating sebagai pendekatan inovatif dalam pengembangan material jalan berkelanjutan berbasis self-healing.

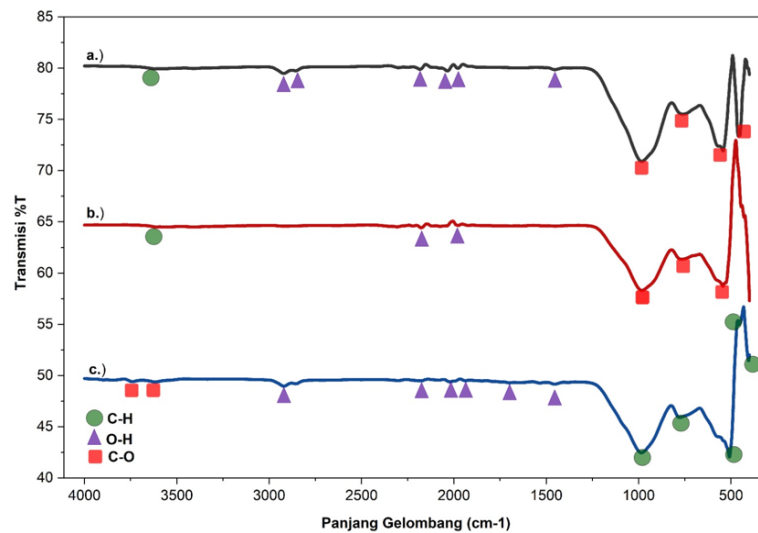
### **Analisis Komparatif Gugus Fungsi dan Potensi *Self-Healing* pada Aspal Biologis**

Karakterisasi komparatif spektrum FTIR menunjukkan bahwa metode campur dan metode oles menghasilkan pola transformasi kimia yang berbeda pada matriks aspal biologis. Metode campur memperlihatkan kecenderungan interaksi molekular yang lebih tersebar di dalam fase bitumen, sedangkan metode oles menunjukkan dominasi aktivitas kimia pada lapisan permukaan. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa distribusi bakteri memengaruhi jalur reaksi biomineralisasi dan kestabilan struktur aspal secara berbeda pada masing-masing perlakuan. Interpretasi komparatif berbasis FTIR seperti ini dinilai penting dalam evaluasi kualitas material aspal modern karena perubahan gugus fungsi berkaitan langsung dengan performa rekayasa material jalan (Yin et al., 2026).

Karakteristik spektrum metode campur memperlihatkan respons internal matriks yang lebih stabil terhadap perubahan lingkungan termal dan oksidatif. Interaksi tersebut memperlihatkan kecenderungan pembentukan jaringan kimia yang bersifat homogen sehingga distribusi senyawa biologis lebih merata di dalam fase aspal. Kondisi ini mendukung kemampuan material dalam mempertahankan integritas mikrostruktur selama siklus pembebanan berulang pada perkerasan jalan (Borthakur et al., 2026). Stabilitas internal tersebut juga berkaitan dengan kemampuan material mempertahankan fleksibilitas bitumen pada kondisi temperatur tinggi dan kelembapan ekstrem.

Metode oles menunjukkan kecenderungan peningkatan aktivitas permukaan yang lebih dominan dibandingkan interaksi internal pada metode campur. Intensitas gugus karbonil pada spektrum FTIR memperlihatkan bahwa reaksi kimia lebih aktif terjadi pada lapisan terluar aspal sehingga pembentukan mineral biologis berlangsung lebih cepat. Fenomena tersebut berkaitan dengan keberadaan biofilm aktif yang mempercepat proses penyembuhan retakan mikro pada area permukaan material. Aktivitas lapisan biologis seperti ini memiliki karakteristik yang serupa dengan sistem pelapis self-healing berbasis polimer cerdas pada material fungsional modern (Paul et al., 2026).

Evaluasi SEM dan pengujian hidrofobisitas menunjukkan bahwa distribusi bakteri memengaruhi pola morfologi permukaan aspal secara signifikan. Sampel metode oles memperlihatkan tekstur lapisan yang lebih padat dan terlokalisasi pada area tertentu sehingga sudut kontak permukaan meningkat secara progresif selama periode pengamatan. Sementara itu, metode campur menunjukkan pola distribusi partikel biologis yang lebih tersebar sehingga perubahan hidrofobisitas berlangsung lebih lambat namun lebih stabil. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa metode aplikasi bakteri menentukan mekanisme perlindungan permukaan terhadap infiltrasi air dan degradasi kimia (Selvakumar & O'Connor, 2022).



**Gambar 3. Grafik Analisa Data FTIR**

Keterangan: a) Aspal SNI, b) Metode Oles, c) Metode Campur

Visualisasi pada Gambar 3 memperlihatkan adanya perbedaan pola transmisi antara aspal kontrol, metode campur, dan metode oles. Kurva metode oles menunjukkan peningkatan respons spektral pada wilayah karbonil yang berkaitan dengan aktivitas reaksi permukaan dan pembentukan lapisan biomineral. Kurva metode campur memperlihatkan kestabilan transmisi pada beberapa rentang bilangan gelombang yang mengindikasikan dominasi interaksi internal dalam matriks bitumen. Pendekatan komparatif FTIR seperti ini digunakan secara luas untuk mengevaluasi kualitas kimia material perkerasan dan stabilitas struktur aspal berbasis modifikasi biologis (Yin et al., 2026).

Perbedaan mekanisme antara kedua metode menunjukkan bahwa distribusi biologis memiliki pengaruh langsung terhadap efektivitas self-healing material. Metode campur menghasilkan sistem penyembuhan yang lebih gradual karena aktivitas biologis tersebar pada fase internal matriks aspal. Metode oles menghasilkan respons penyembuhan yang lebih cepat akibat dominasi reaksi permukaan yang mempercepat pembentukan lapisan protektif. Mekanisme tersebut sejalan dengan konsep rejuvenator biologis pada material bitumen yang menitikberatkan pada pemulihan retakan mikro melalui aktivasi senyawa aktif di area kritis permukaan (Norambuena-Contreras et al., 2020).

Hubungan antara hasil FTIR dan morfologi SEM menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas permukaan pada metode oles berkorelasi dengan pembentukan struktur biologis yang lebih terfokus. Distribusi tersebut meningkatkan kemampuan permukaan dalam menahan penetrasi air sekaligus memperkuat stabilitas lapisan luar aspal. Pada metode campur, struktur internal lebih berperan dalam menjaga kohesi material sehingga potensi kerusakan akibat pelepasan agregat dapat ditekan secara

bertahap. Integrasi karakterisasi kimia dan morfologi memberikan validasi bahwa mekanisme self-healing dipengaruhi oleh lokasi dominasi aktivitas biologis di dalam material (Wang et al., 2025).

**Tabel 3. Perbandingan Efektivitas Metode Campur dan Metode Oles terhadap Karakteristik Aspal**

Parameter	Metode Campur	Metode Oles
Dominasi Gugus	O–H	C–O
Interaksi	Internal	Permukaan
Potensi CaCO <sub>3</sub>	Sedang	Tinggi
Distribusi bakteri	Homogen	Terlokalisasi
Potensi self-healing	Stabil	Aktif

Sumber: Hasil analisis FTIR, SEM, dan hidrofobisitas penelitian laboratorium yang diinterpretasikan berdasarkan Yin et al. (2026), Norambuena-Contreras et al. (2020), dan Paul et al. (2026).

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kedua metode memiliki karakteristik performa yang berbeda sesuai dengan pola distribusi biologisnya. Metode campur lebih mendukung kestabilan internal material karena bakteri terdistribusi homogen di dalam matriks bitumen. Metode oles memperlihatkan aktivitas self-healing yang lebih aktif akibat dominasi pembentukan lapisan permukaan dan respons biomineralisasi yang lebih tinggi. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas material biologis tidak hanya ditentukan oleh jenis bakteri, tetapi juga oleh mekanisme aplikasinya pada sistem aspal.

Karakteristik material hasil metode campur memiliki relevansi tinggi untuk aplikasi jalan dengan kebutuhan stabilitas struktural jangka panjang. Distribusi internal yang homogen dapat mempertahankan konsistensi sifat mekanik aspal selama siklus pembebanan lalu lintas berulang. Pada sisi lain, metode oles lebih sesuai diterapkan pada sistem pemeliharaan preventif yang memerlukan pemulihan cepat terhadap retakan mikro di permukaan perkerasan. Pendekatan rekayasa seperti ini mulai banyak dikembangkan pada sistem material adaptif dan pelapis multifungsi berbasis teknologi biologis modern (Arif et al., 2025).

Integrasi hasil FTIR, SEM, dan pengujian hidrofobisitas memperlihatkan bahwa metode aplikasi bakteri menentukan arah evolusi kimia dan performa rekayasa aspal biologis. Metode campur menghasilkan sistem internal yang lebih stabil terhadap perubahan lingkungan, sedangkan metode oles memperlihatkan respons permukaan yang lebih aktif terhadap proses self-healing. Perbedaan karakteristik tersebut membuka peluang pengembangan desain material jalan berbasis fungsi spesifik sesuai kebutuhan operasional perkerasan. Pendekatan multidimensional seperti ini dinilai efektif dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang mengintegrasikan aspek biologis, kimia, dan rekayasa secara simultan (Liu et al., 2020).

## KESIMPULAN

Analisis karakterisasi FTIR menunjukkan bahwa metode pencampuran dan metode pengolesan bakteri *Escherichia coli* menghasilkan transformasi gugus fungsi yang berbeda pada sistem aspal biologis. Metode campur memperlihatkan dominasi interaksi internal yang ditandai oleh peningkatan gugus O–H dan distribusi biologis yang lebih homogen dalam matriks bitumen, sehingga menghasilkan kestabilan struktural yang lebih baik terhadap perubahan lingkungan dan pembebanan mekanis. Metode oles menunjukkan peningkatan intensitas gugus C–O yang berkaitan dengan aktivitas biomineralisasi permukaan, pembentukan lapisan CaCO<sub>3</sub>, serta peningkatan hidrofobisitas akibat perkembangan biofilm pada area permukaan aspal. Integrasi hasil FTIR, SEM, dan pengukuran sudut kontak memperlihatkan bahwa mekanisme distribusi bakteri memengaruhi karakteristik kimia, morfologi, dan potensi self-healing material secara signifikan. Metode campur lebih relevan untuk mempertahankan integritas internal material dalam jangka panjang, sedangkan metode oles memiliki efektivitas lebih tinggi dalam mempercepat respons penyembuhan retakan mikro pada permukaan perkerasan. Temuan ini memperlihatkan bahwa pendekatan biologis berbasis *Escherichia coli* memiliki potensi besar dalam pengembangan material jalan adaptif, hidrofobik, dan berkelanjutan melalui optimasi mekanisme aplikasi bakteri pada matriks aspal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arif, M., Hannan Zahid, A., Saghir, S., & Mahsud, A. (2025). From sunlight to sustainability: The properties, evolution, and prospects of photocatalytic building materials. *Catalysis Reviews*, 1-72. <https://doi.org/10.1080/01614940.2024.2445044>
- Banjarnahor, R. C. O., Angraini, D. I., Lestari, R. D., Putri, J. N., Diyati, R., Alvi, A., ... & Yusuf, A. I. (2025). Potential of Bacteria Escherichia coli and Staphylococcus aureus as Degradation Agent Waste Used Oil. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(2), 2068-2074. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i2.8956>
- Borthakur, D. K., Bora, P., Phukan, M. M., & Chongloi, V. (2026). Performance of Waste Expanded Polystyrene as Bitumen Modifier: A Comparative Assessment with Virgin Bitumen. *Canadian Journal of Civil Engineering*, (ja). <https://doi.org/10.1139/cjce-2025-0431>
- Dimitrijević, J., Petrović, J., Marinković, A., Dikić, J., Koprivica, M., Simić, M., & Jevtić, S. (2025). Preparation, characterization, adsorption, and antibacterial assessments of silane-functionalized zeolites. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 44(2), 459. <http://dx.doi.org/10.20450/mjccce.2025.3103>
- Doostan, M., Maleki, H., Khoshnevisan, K., Baharifar, H., Doostan, M., & Bahrami, S. (2024). Accelerating healing of infected wounds with *G. glabra* extract and curcumin Co-loaded electrospun nanofibrous dressing. *Journal of Biomaterials Applications*, 39(3), 249-265. <https://doi.org/10.1177/08853282241252729>
- Einenkel, R., Halte, M., Sawant, S. A., Erhardt, M., Wadhwa, N., & Popp, P. F. (2025). Building the bacterial flagellum: coordinating regulation, dynamic assembly, and function. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 89(4), e00092-22. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00092-22>
- Evcimen Duygulu, N., Balkas, M., Ciftci, F., & Kucak, M. (2025). Hexagonal Boron Nitride Doped PVA Composite Nanofibers for Antimicrobial and Biocompatible Applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 310(10), e00066. <https://doi.org/10.1002/mame.202500066>
- Feitosa, R. P., de Lima, I. S., Guerra, Y., da Silva-Filho, E. C., Furtini, M. B., Almeida, L., ... & Osajima, J. A. (2024). Cerium-doped TiO<sub>2</sub> and sepiolite nanocomposites for tetracycline inactivation in water treatment. *ACS Applied Nano Materials*, 8(9), 4324-4338. <https://doi.org/10.1021/acsnm.4c01068>
- Ghasemirad, A., Bala, N., & Hashemian, L. (2020). High-temperature performance evaluation of asphaltene-modified asphalt binders. *Molecules*, 25(15), 1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules25153326>
- Hamdany, A. H., Ding, Y., & Qian, S. (2023). Visible light antibacterial potential of graphene-TiO<sub>2</sub> cementitious composites for self-sterilization surface. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(8), 972-982. <https://doi.org/10.1080/21650373.2022.2143451>
- Hashemi, S. Z., Fooladi, J., Vahidinasab, M., Hubel, P., Pfannstiel, J., Pillai, E., Hrenn, H., Hausmann, R., & Lilge, L. (2024). Toward effects of hydrophobicity on biosurfactant production by *Bacillus subtilis* isolates from crude-oil-exposed environments. *Applied Microbiology*, 4(1), 215–236. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010015>
- Hussain, S., & Maktedar, S. S. (2025). Sustainable approach towards development of a bioinspired polymer reinforced composite hydrogel: rheological and biological aspects. *New Journal of Chemistry*, 49(17), 6975-6998. <https://doi.org/10.1039/D4NJ05128A>
- Liu, Y., Su, P., Li, M., You, Z., & Zhao, M. (2020). Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 573–599. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>
- Mandegari, M., Nasouri, K., Ghasemi-Mobarakeh, L., & Jalali, S. A. H. (2025). Eco-Friendly Synthesis of MXene Nanoflakes from Agricultural Waste and the Influence of Flake Size and Layer Number on Antibacterial, Photothermal, and EMI Shielding Performance of Functional Textiles. *Advanced Materials Technologies*, 10(23), e00784. <https://doi.org/10.1002/admt.202500784>
- Melesse, E. Y., Alkhair, A. Y., Filinskaya, Y. A., Kirsh, I. A., & Bannikova, O. A. (2025). Effect of Zirconium oxide (ZrO<sub>2</sub>) Nanoparticles on the Mechanical, WVTR, and Antibacterial Properties of Polyethylene Polymer Matrix. *Вестник Воронежского государственного университета*

- инженерных технологий, 87(1), 278-285. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-1-272-279>
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L. E., Guadarrama-Lezama, A. Y., Briones, R., Vivanco, J. F., & Gonzalez-Torre, I. (2020). Microencapsulated bio-based rejuvenators for the self-healing of bituminous materials. *Materials*, 13(6), Article 1446. <https://doi.org/10.3390/ma13061446>
- Octriany, Y., & Ratnawulan, R. (2023). Effect *E. coli* bacteria concentration as self healing on compressive strength and hydrophobic properties on micro cracks of concrete. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(SpecialIssue), 989–997. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9ispecialissue.5911>
- Paul, S., Kaushik, A. K., Jain, A., & Banerjee, S. (2026). Intelligent self-healing polymeric systems for functional and durable coatings. *Chemistry—An Asian Journal*, 21(1), e70290. <https://doi.org/10.1002/asia.70290>
- Refaat, M., ElRakaiby, M. T., El Hariri El Nokab, M., Es Sayed, J., Elshewy, A., Sebakhy, K. O., ... & Habib, M. H. (2024). Polymerization potential of a bacterial CotA-laccase for  $\beta$ -naphthol: enzyme structure and comprehensive polymer characterization. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1501112. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1501112>
- Selvakumar, A., & O'Connor, T. P. (2022). Seasonal variation in indicator organisms infiltrating from permeable pavement parking lots at the Edison Environmental Center, New Jersey. *Water Environment Research*, 94(9), e10791. <https://doi.org/10.1002/wer.10791>
- Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts* (3rd ed.). England: John Wiley & Sons.
- Speight, J. G. (2014). *Chemistry and Technology of Petroleum* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Topuz, M., Karatas, E., Ruzgar, D., Akinay, Y., & Cetin, T. (2025). Ti3C2Tx MXene/halloysite nanotube functionalized films for antibacterial applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 36(18), 3185-3199. <https://doi.org/10.1080/09205063.2025.2522746>
- Wang, F., Yang, X., Yang, P., Hao, R., Li, R., Zhang, M., ... & Qiu, Z. (2025). A New Microbial Enrichment and Recovery Technology Based on Layered Double Hydroxides. *ACS ES&T Water*, 5(6), 3325-3336. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c00155>
- Wang, Y., Li, R., & Liu, Y. (2025). Insights into heteroatom doping on Iron-based catalyst supported on asphalt-derived carbon for Peroxymonosulfate activation in tetracycline degradation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 129(13), 6292-6307. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5c00553>
- Yin, Y., Tang, L., Chen, G., & Zhong, D. (2026). Asphalt Quality Evaluation and Intelligent Classification via ATR-FTIR Functional Group Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 38(4), 04026021. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-21386>