



REVIEW: METHODS FOR DETECTING SHORT-CHAIN FATTY ACIDS (SCFA) IN INDUSTRIAL AND BIOLOGICAL

Hutri Puspita Sari, Aster Rahayu*, Dhias Cahya Hakika, Zahrul Mufrodi, dan Gita Indah Budiarti
Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan,
Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 Jan 2025,
Revised 06 Oct 2025,
Accepted 27 Oct 2025
Available online 12 Nov 2025

Keywords:

- ✓ Short-Chain Fatty Acids;
- ✓ SCFA Detection;
- ✓ Industrial Waste;
- ✓ Biological Waste;
- ✓ Chromatography;
- ✓ LC-MS/MS

*corresponding author:

aster.rahayu@che.uad.ac.id

Phone: +6285213500747;

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i4.805)

[15i4.805](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i4.805)

ABSTRACT

Industrial and biological wastes are major contributors to environmental pollution and contain high levels of organic matter that can generate short-chain fatty acids (SCFA) through microbial fermentation. SCFAs are important not only as bioenergy precursors in industrial waste management but also as key biomarkers of gut microbiota activity in biological samples. This review provides a comparative analysis of analytical methods used to detect SCFAs in both industrial and biological matrices, focusing on High-Performance Liquid Chromatography (HPLC), Gas Chromatography with Flame Ionization Detection (GC-FID), and Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS). The findings reveal that HPLC—particularly Ion-Exclusion HPLC—is most effective for analyzing complex industrial waste samples such as waste-activated sludge (WAS) and palm oil mill effluent (POME), whereas GC-FID is more suitable for volatile-rich wastes like vinasse. Meanwhile, LC-MS/MS demonstrates exceptional accuracy and sensitivity for biological matrices such as feces, serum, and urine, allowing detection at ultra-trace concentrations. These insights underscore the need for optimized, waste-specific detection techniques to enhance environmental monitoring, waste valorization, and health-related SCFA research. Future studies should focus on developing rapid, cost-effective, and IoT-integrated detection systems to support real-time monitoring of both industrial and biological wastes.

ABSTRAK

Review: Metode Untuk Mendeteksi Asam Lemak Rantai Pendek (SCFA) dalam Proses Industri dan Biologis

Limbah industri dan limbah biologis merupakan sumber utama pencemaran lingkungan yang mengandung kadar bahan organik tinggi dan berpotensi menghasilkan asam lemak rantai pendek (*short-chain fatty acids*/SCFA) melalui proses fermentasi mikroba. SCFA berperan penting tidak hanya sebagai prekursor bioenergi dalam pengelolaan limbah industri, tetapi juga sebagai *biomarker* utama aktivitas mikrobiota usus pada sampel biologis. Kajian ini membandingkan berbagai metode analitik yang digunakan untuk mendeteksi SCFA pada kedua jenis limbah tersebut, yaitu *High-Performance Liquid Chromatography* (HPLC), *Gas Chromatography* dengan *Flame Ionization Detection* (GC-FID), dan *Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry* (LC-MS/MS). Hasil analisis menunjukkan bahwa HPLC, khususnya jenis *Ion-Exclusion HPLC*, paling efektif untuk menganalisis limbah industri kompleks seperti *waste activated sludge* (WAS) dan *palm oil mill effluent* (POME), sementara GC-FID lebih sesuai untuk limbah yang kaya senyawa volatil seperti vinasse. Untuk limbah biologis seperti feses, serum, dan urin, LC-MS/MS memberikan sensitivitas dan akurasi tertinggi dalam mendeteksi SCFA pada kadar yang sangat rendah. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan metode deteksi yang sesuai dengan karakteristik limbah guna meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah, pemantauan lingkungan, serta penelitian kesehatan berbasis SCFA. Arah penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan sistem deteksi yang lebih cepat, hemat biaya, dan terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung pemantauan limbah industri dan biologis secara *real-time*.

Kata kunci: Asam Lemak Rantai Pendek, Deteksi SCFA, Limbah Industri, Limbah Biologis, Kromatografi, LC-MS/MS

PENDAHULUAN

Limbah merupakan hasil samping dari berbagai aktivitas manusia yang berasal dari proses industri, pertanian, dan domestik (Oktavia,

2018). Limbah dapat dikategorikan menjadi berbagai jenis, termasuk limbah padat, cair, dan gas, yang masing-masing memiliki karakteristik dan dampak lingkungan yang berbeda. Pengelolaan limbah yang efektif menjadi salah



satu tantangan besar di era modern, pertumbuhan populasi dan aktivitas industri yang terus meningkat berkontribusi pada akumulasi limbah (Purwanti, 2018). Tanpa pengelolaan yang tepat, limbah dapat menyebabkan pencemaran, kerusakan ekosistem, dan dampak kesehatan serius bagi manusia dan makhluk hidup lainnya (Yu et al., 2025).

Salah satu aspek penting dalam pengelolaan limbah adalah memahami kandungan kimia dari limbah tersebut, termasuk senyawa-senyawa tertentu yang dapat memiliki efek positif atau negatif. Efek positifnya antara lain dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif, bahan baku bioplastik, dan indikator aktivitas mikroba yang bermanfaat dalam proses bioremediasi. Namun, efek negatifnya meliputi potensi pencemaran air dan tanah akibat akumulasi asam organik berlebih, peningkatan keasaman lingkungan yang dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, serta risiko toksisitas bagi organisme akuatik dan manusia apabila terpapar pada konsentrasi tinggi (Rakhmah et al., 2023). Dalam konteks ini, limbah organik sering mengandung asam lemak rantai pendek (*Short-Chain Fatty Acids/SCFA*), yaitu asam lemak organik dengan berat molekul rendah yang dihasilkan melalui fermentasi mikroba (Aisah & Octaria, 2024). SCFA diklasifikasikan berdasarkan panjang rantai karbon dan tingkat saturasi (Olonimoyo et al., 2025; Xu et al., 2017) serta berperan penting dalam berbagai proses biologis dan lingkungan.

SCFA dihasilkan melalui proses fermentasi oleh mikroorganisme dalam limbah organik, termasuk limbah pertanian, makanan, dan industri. Proses ini melibatkan pemecahan karbohidrat kompleks di bawah kondisi tertentu, yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroba (Ahmed et al., 2023; Gardana et al., 2017; Patel et al., 2021; Wang et al., 2019). SCFA tidak hanya berfungsi sebagai indikator kualitas limbah tetapi juga memiliki potensi sebagai sumber energi atau bahan baku untuk produk lain yang menunjukkan keberhasilan proses fermentasi (Dias et al., 2024). Dari sisi kesehatan manusia, SCFA berperan penting karena dihasilkan melalui fermentasi serat oleh mikrobiota usus (Koh et al., 2016). Senyawa seperti asam asetat, asam propionat, dan asam butirat berperan dalam menjaga kesehatan saluran pencernaan, mengatur peradangan, serta memengaruhi metabolisme glukosa (Patel et al., 2021). Dengan demikian, kadar SCFA yang seimbang dalam tubuh berkontribusi pada pencegahan penyakit seperti diabetes dan

kardiovaskular (Yali Wang et al., 2017). Urgensi deteksi SCFA terletak pada kemampuannya untuk menjadi indikator kondisi lingkungan dan kesehatan, sehingga pemantauan yang akurat terhadap senyawa ini sangat dibutuhkan.

Berbagai metode analitik telah digunakan untuk mendeteksi SCFA, di antaranya kromatografi gas (GC-FID), kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC), dan kromatografi cair-spektrometri massa ganda (LC-MS/MS). Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan dalam hal sensitivitas, waktu analisis, dan biaya operasional (Lv et al., 2025; Thapa et al., 2024). GC-FID dikenal sederhana dan ekonomis untuk senyawa volatil, HPLC unggul dalam akurasi dan analisis senyawa kompleks, sedangkan LC-MS/MS menawarkan sensitivitas tertinggi untuk mendeteksi SCFA dalam konsentrasi sangat rendah. Analisis perbandingan metode ini menjadi penting untuk menentukan teknik paling efektif sesuai jenis sampel dan tujuan analisis (Ke et al., 2025).

Saat ini, kemajuan signifikan telah dicapai dalam pengembangan metode deteksi SCFA menggunakan teknologi kromatografi dan spektrometri. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi sensitivitas dan presisi di laboratorium berskala kecil. Sementara itu, penerapannya dalam sistem pengelolaan limbah terpadu dan pemantauan lingkungan secara *real-time* masih terbatas. Belum banyak penelitian yang membahas integrasi metode deteksi SCFA dengan sistem sensor cerdas atau teknologi berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan berkelanjutan. Oleh karena itu, terdapat peluang riset dalam pengembangan metode deteksi yang cepat, portabel, dan ramah lingkungan yang dapat mendukung efisiensi analisis SCFA di berbagai jenis limbah dan matriks biologis. Dengan demikian, tujuan dari *review* ini adalah untuk menganalisis berbagai metode deteksi SCFA, mengevaluasi efektivitas dan akurasi masing-masing metode, serta mengidentifikasi celah penelitian yang dapat dikembangkan. Pemahaman menyeluruh terhadap metodologi deteksi SCFA akan mendukung pengelolaan limbah yang lebih efisien, berkelanjutan, dan berdampak positif bagi kesehatan lingkungan dan manusia.

Metode Deteksi *Short Chain Fatty Acid* (SCFA) dalam Limbah Industri

Limbah industri merupakan sisa atau produk sampingan yang dihasilkan dari berbagai proses produksi di sektor industri. Limbah ini

dapat berupa limbah padat seperti sisa bahan mentah dan kemasan, limbah cair seperti air limbah proses yang mengandung bahan kimia, serta limbah gas yang berupa emisi dari proses industri (Martini et al., 2020). Limbah cair seperti air limbah domestik maupun industri sering kali mengandung berbagai kontaminan yang berpotensi mencemari sumber air jika tidak dikelola dengan baik. Salah satu jenis limbah cair yang signifikan adalah vinasse, yaitu produk sampingan dari proses fermentasi gula untuk produksi etanol. Vinasse dikenal memiliki kandungan bahan organik dan anorganik yang tinggi (Mayasri, 2023). Di sisi lain, limbah padat seperti *waste activated sludge* (WAS) yang berasal dari proses pengolahan air limbah juga mengandung zat organik seperti protein dan karbohidrat yang dapat dimanfaatkan kembali. Sementara itu, *palm oil mill effluent* (POME) merupakan limbah cair dari industri pengolahan minyak sawit yang kaya akan bahan organik. Ketiga jenis limbah tersebut vinasse, WAS, dan POME memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam produksi SCFA yang bernilai ekonomis sekaligus ramah lingkungan (Singh et al., 2019).

Dalam konteks pengelolaan limbah berkelanjutan, vinasse, WAS, dan POME menjadi fokus utama karena kandungan organiknya yang tinggi memungkinkan proses pencernaan anaerobik (*anaerobic digestion*) menghasilkan berbagai senyawa bernilai tambah, termasuk SCFA. Pada proses ini, SCFA seperti asam asetat (C_2), asam propionat (C_3), dan asam butirat (C_4) berperan sebagai produk antara yang penting dalam konversi bahan organik menjadi biogas (Veranica et al., 2024; Silva et al., 2021).

Namun, akumulasi SCFA dalam jumlah tinggi dapat berdampak negatif terhadap lingkungan, apabila limbah dibuang tanpa pengolahan yang memadai (Khair et al., 2023). Oleh karena itu, pemantauan kadar SCFA menjadi aspek penting dalam pengelolaan limbah organik. Konsentrasi SCFA yang melebihi kisaran 300–500 mg/L telah dilaporkan dapat mengindikasikan potensi pencemaran, meskipun ambang batas resmi secara regulasi belum ditetapkan (Michel & Prat, 2016). Selain itu, pada WAS, proses pencernaan anaerobik menghasilkan SCFA sebagai tahap antara menuju pembentukan metana. SCFA berperan penting dalam proses penghilangan nitrogen dan fosfor, serta dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku plastik *biodegradable* (Primec et al., 2017; Xu et al., 2017). Dengan demikian, keberadaan SCFA

dalam WAS bukan hanya indikator degradasi organik, tetapi juga peluang pemanfaatan energi dan sumber daya baru.

POME juga memiliki karakteristik serupa, yaitu kaya bahan organik yang dapat difermentasi menjadi SCFA. Proses pencernaan anaerobik pada POME melibatkan empat fase utama: hidrolisis, asidogenesis, asetonogenesis, dan metanogenesis. SCFA berfungsi sebagai sumber karbon utama dalam pembentukan metana (Y. Chen et al., 2018). Dengan demikian, deteksi dan pemanfaatan SCFA dari vinasse, WAS, dan POME tidak hanya membantu mengurangi dampak pencemaran, tetapi juga berkontribusi pada produksi energi terbarukan dan pengembangan bahan baku berkelanjutan.

Untuk mendukung pengelolaan limbah tersebut, berbagai metode analisis digunakan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1, yang memuat perbandingan alat, kondisi operasi, hasil deteksi, serta kelebihan dan kekurangan masing-masing metode. Secara umum, deteksi SCFA dilakukan setelah proses pra-perlakuan seperti sentrifugasi, penyaringan, dan pengenceran sampel (Pruksatrakul et al., 2017).

Limbah cair dan padat seperti vinasse, WAS, serta POME memiliki potensi besar dalam menghasilkan SCFA yang bernilai ekonomis dan ramah lingkungan (Nemutudi et al., 2025; Xin et al., 2025; Zheng et al., 2025). Hasil kajian terhadap berbagai metode analisis menunjukkan bahwa HPLC, khususnya jenis *Ion-Exclusion HPLC*, memberikan hasil deteksi SCFA yang lebih tinggi dan akurat dibandingkan *Gas Chromatography with Flame Ionization Detection* (GC-FID), terutama pada limbah WAS. Penggunaan HPLC menghasilkan konsentrasi SCFA sebesar 2.450,3 mg COD/L pada dosis 20% konsorsium *Alginate-Degrading Consortium* (ADC), sedangkan GC-FID menunjukkan hasil lebih rendah, seperti 271,1 mg COD/g VSS pada sampel serupa. HPLC memiliki keunggulan dalam memisahkan dan mengidentifikasi senyawa organik kompleks dengan presisi tinggi serta mampu mendeteksi berbagai komponen SCFA secara simultan dalam satu kali analisis dengan kondisi operasi yang terstandarisasi (Calvigioni et al., 2023).

Table 1. Detection of Short Chain Fatty Acids (SCFA) in Industrial Waste

Limbah, Referensi	Alat Deteksi	Kondisi Operasi	Hasil	Kekurangan dan Kelebihan
Waste Activated Sludge (WAS) , (Ma et al., 2024)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)	Kondisi operasi (HPLC) menggunakan <i>Ion-Exclusion</i> HPLC (Waters e2695, kolom Aminex HPX-87H, Bio-Rad). Kolom Aminex HPX-87 H (300 × 7,8 mm, BioRad). Analisis HPLC dilakukan pada suhu 60°C, dengan fase gerak H ₂ SO ₄ mM pada 0,6 mL/mnt dan panjang gelombang deteksi 210 nm.	Konsentrasi SCFA pada dosis <i>Alginate-Degrading Consortium</i> (ADC) 10% sebesar 1.981,7 mg COD/L dan pada dosis 20%, sebesar 2.450,3 mg COD/L.	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan utama dari metode ini adalah peningkatan signifikan dalam konsentrasi asam lemak rantai pendek dalam cairan fermentasi mencapai 7471,7 mg COD/L, yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol. Selain itu, perlakuan CaO₂ secara efektif menghilangkan ion fosfat dan karbonat, yang dapat mengganggu proses ekstraksi SCFAs. Metode ini juga menunjukkan penghematan biaya yang signifikan dalam penggunaan sumber karbon tambahan, menjadikannya solusi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah di instalasi pengolahan air limbah. Kekurangan metode ini perlakuan kalsium peroksida (CaO₂) ini mungkin memerlukan biaya awal yang lebih tinggi untuk pengadaan bahan dan peralatan. Selain itu, ada potensi peningkatan kompleksitas dalam proses pengolahan lumpur aktif yang dapat memerlukan pemantauan dan pengendalian yang lebih ketat untuk mencapai hasil yang optimal.
Vinasse , (Cabrera-Díaz et al., 2017)	Gas Chromatography with Flame Ionization Detection (GC/FID) type (GC/FID-2010, Shimadzu, Jepang)	GC/FID dengan kolom (30 m × 0,54 mm × 40 µm). H ₂ digunakan sebagai gas pembawa pada aliran total 27 mL min ⁻¹ . Sampel disuntikkan pada suhu 160°C dengan split 1:5. Suhu detektor diatur pada 170°C, suhu oven awalnya dipertahankan pada 35°C selama 2 menit kemudian ditingkatkan suhu pada 60°C min ⁻¹ hingga 170°C.	Konsentrasi total asam lemak volatil sebesar 1,31 ± 0,41 g L ⁻¹ .	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan dari metode ini yaitu dari kombinasi kedua reaktor adalah efisiensi penghilangan COD yang tinggi mencapai 86,7%. Sistem ini juga menghasilkan kandungan CH₄ yang lebih tinggi dan H₂S yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor UASB yang berdiri sendiri. Selain itu, pengaturan rasio sulfat terhadap COD terbukti signifikan dalam meningkatkan kualitas biogas yang dihasilkan. Kekurangan: Metode <i>anaerobic digestion</i> menggunakan sistem UASB dan APBR memiliki beberapa kekurangan, seperti kebutuhan akan peralatan yang mahal dan kompleksitas dalam pengoperasian. Selain itu, reaktor UASB memerlukan waktu <i>start-up</i> yang lebih lama dan berisiko mengalami <i>washout</i> biomassa. Pengaruh dari konsentrasi sulfat yang tinggi dapat mempengaruhi kualitas biogas, terutama dalam menghasilkan H₂S.
Waste Activated Sludge (WAS) , (Feng et al., 2009)	High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) type ODS Hypersil, Thermo, U.S.A	Kondisi operasi HPLC menggunakan kolom fase terbalik dengan panjang 250 mm dan diameter 4,6 mm. Fase gerak dengan campuran air dan metanol dalam rasio 80:20 (v/v) dengan pH 3,0. Kecepatan aliran diatur pada 0,8 mL/menit dan suhu kolom dijaga pada 30°C	Konsentrasi SCFA mencapai 520,1 mg COD per gram <i>volatile suspended solids</i> .	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode ini konsorsium pengurai <i>alginat</i> (ADC) meningkatkan produksi asam lemak rantai pendek (SCFAs) hingga 1,78 kali lipat. ADC juga meningkatkan aktivitas enzim dan mengurangi hidrofobisitas lumpur, meningkatkan efisiensi fermentasi lumpur aktif. Kekurangan metode ini memerlukan waktu dan biaya untuk pengayaan konsorsium mikroba, serta pemantauan yang lebih ketat. Risiko kontaminasi mikroba juga dapat mempengaruhi hasil.
Palm Oil Mill Effluent (POME) , (Pruksatrakul et al., 2017)	Gas Chromatography with Flame Ionization Detection (GC/FID) type Agilent 6890 (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA)	GC/FID dengan gas pembawa helium (kemurnian 99,999%) pada laju aliran 2,0 mL/menit. Kolom kapiler polietilen glikol HP-INNOWax (30m x 0,25 mm x 0,25 µm). Program suhu oven awal, 95°C kemudian di tingkatkan menjadi 140°C pada 10°C min ⁻¹ hingga peningkat akhir pada suhu 200°C sedangkan pada suhu 40°C min ⁻¹ ditahan selama 5 menit. Suhu detektor adalah 240°C kemudian volume injeksi sampel sebanyak 2,0 µL dalam <i>mode split</i> (20:1).	Konsentrasi Asam asetat terdeteksi rentang 15 hingga 46 mM. Asam propionat dan butirat 4 hingga 7 mM dan 4 hingga 11 mM	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode SI-LME yang dikombinasikan dengan GC-FID menunjukkan keunggulan dalam hal presisi dan kecepatan ekstraksi asam lemak rantai pendek. Dengan efisiensi ekstraksi hingga 90% dan penggunaan pelarut yang lebih sedikit, metode ini merupakan pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, metode ini memungkinkan pemantauan yang efektif terhadap kualitas biogas, menjadikannya alat yang berguna dalam pengendalian kualitas di proses produksi biogas dari limbah pabrik kelapa sawit. Kekurangan metode ini dari segi efisien, mungkin memerlukan peralatan khusus yang dapat meningkatkan biaya operasional. Selain itu, meskipun SI-LME (<i>Sequential Injection-Liquid Microextraction</i>) mengurangi jumlah pelarut yang diperlukan kompleksitas prosedur dan kebutuhan untuk pengoptimalan kondisi ekstraksi dapat menjadi tantangan bagi laboratorium yang kurang berpengalaman.

Di sisi lain, GC-FID tetap menjadi metode penting dalam analisis senyawa volatil. Teknik ini efektif dalam memisahkan dan mengukur konsentrasi asam lemak rantai pendek seperti pada vinasse, dengan hasil mencapai 1,31 g/L total asam lemak volatil. Metode ini relatif lebih sederhana, cepat, dan ekonomis dalam operasional dan pemeliharaan (Muthmainna Basma et al., 2023). Namun, keterbatasan utamanya adalah ketidakmampuannya mendeteksi senyawa non-volatil atau senyawa yang mudah terurai pada suhu tinggi (Sanches-Silva et al., 2004). Dengan demikian, pemilihan metode analisis SCFA harus mempertimbangkan karakteristik limbah dan tujuan analisis. Untuk analisis kuantitatif dan karakterisasi komprehensif SCFA pada limbah kompleks seperti WAS dan POME, HPLC merupakan metode yang paling akurat. Sementara itu, GC-FID tetap relevan untuk analisis cepat terhadap senyawa volatil seperti pada vinasse. Kombinasi keduanya dapat memberikan pendekatan analisis yang lebih menyeluruh bagi pengelolaan limbah industri menuju energi terbarukan dan ekonomi sirkular.

Metode Deteksi *Short Chain Fatty Acid* (SCFA) dalam Limbah Biologis

Limbah biologis merupakan bahan sisa yang dihasilkan dari aktivitas biologis dan berpotensi mengandung patogen, sehingga memerlukan pengelolaan khusus untuk mencegah risiko kesehatan (Apriyani, 2017). Proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme terjadi melalui sistem enzimatik yang menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi. Salah satu hasil metabolisme penting dari proses tersebut adalah SCFA, yaitu asam organik rantai pendek yang berperan besar dalam berbagai proses biologis (Den Besten et al., 2013). SCFA dihasilkan oleh mikroorganisme dalam saluran pencernaan melalui fermentasi polisakarida, oligosakarida, protein, peptida, dan glikoprotein di usus besar (Pekmez et al., 2020). Proses fermentasi anaerobik ini memecah bahan organik menjadi SCFA, disertai pembentukan gas seperti CO₂, CH₄, dan H₂ (McDonald et al., 2018; Zhu et al., 2017). Sekitar 95% SCFA terdiri dari tiga komponen utama: asam asetat, asam propionat, dan asam butirat. Asam asetat ditemukan dalam kadar tertinggi baik di usus besar maupun tinja, sedangkan asam butirat dan isobutirat berfungsi sebagai sumber energi utama bagi sel kolonosit (Primec et al., 2017). Meskipun diproduksi terutama di saluran pencernaan, SCFA juga berperan penting di luar sistem pencernaan.

Molekul ini memengaruhi berbagai kondisi patologis seperti penyakit inflamasi, diabetes tipe II, obesitas, kanker, dan gangguan kardiovaskular melalui efeknya terhadap sistem imun (Yao et al., 2022).

Mekanisme kerja SCFA terhadap sistem kekebalan tubuh memodulasi sistem kekebalan dan proses inflamasi melalui dua mekanisme utama. Pertama, melalui transduksi sinyal sel, SCFA berinteraksi langsung dengan reseptor berpasangan protein G (*G-protein-coupled receptors*, GPCR) seperti FFAR2, FFAR3, dan GPR109A, yang terdapat di permukaan sel imun. Aktivasi reseptor ini mengatur jalur pensinyalan seperti MAPK dan NF-κB, serta memengaruhi konsentrasi Ca²⁺ intraseluler dan sintesis cAMP. Kedua, SCFA dapat menembus membran sel melalui difusi pasif atau protein transpor tertentu, menghambat enzim histon deasetilase (HDAC) yang berperan dalam regulasi ekspresi gen melalui modifikasi kromatin (Pikir & Hermawan, 2022; Pluznick et al., 2013; Tain, 2021). (Pikir & Hermawan, 2022; Pluznick et al., 2013; Tain, 2021). Dengan demikian, SCFA dapat menekan peradangan dan mendukung keseimbangan sistem imun dengan menurunkan aktivitas makrofag, neutrofil, dan sel dendritik serta memengaruhi diferensiasi sel T dan B (De Vos et al., 2022; Ríos-Covián et al., 2016). Selain itu, SCFA juga berperan dalam regulasi sel T regulator (Treg) yang penting untuk menjaga homeostasis imun. SCFA mendukung fungsi Treg melalui penghambatan HDAC serta menurunkan kadar kolesterol *low-density* lipoprotein (LDL) dan *very-low-density* lipoprotein (VLDL), yang berkontribusi dalam pencegahan arterosklerosis (Arpaia et al., 2013; Haghikia et al., 2022). Lebih lanjut, SCFA berperan dalam homeostasis glukosa dengan merangsang sel mukosa kolon untuk memproduksi *glucagon-like peptide 1* (GLP-1) melalui aktivasi reseptor FFAR2, serta meningkatkan proliferasi sel beta pankreas (Villa et al., 2016; Tolhurst et al., 2012).

SCFA sebagai biomarker biologis menunjukkan potensi besar sebagai biomarker untuk berbagai kondisi metabolik dan inflamasi. Sebagai molekul yang mencerminkan aktivitas mikrobiota, profil SCFA dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi fisiologis tubuh, serta memprediksi risiko penyakit kronis. Dengan peran biologisnya yang luas, SCFA tidak hanya dianggap sebagai produk metabolisme akhir, tetapi juga sebagai indikator penting dalam status kesehatan dan penyakit. Oleh karena itu, identifikasi dan kuantifikasi SCFA dalam

berbagai sampel biologis (feses, urin, serum) menjadi langkah krusial untuk diagnosis dini, pemantauan terapi, dan pengembangan target obat baru (Ashaq et al., 2022). Untuk mendapatkan hasil yang akurat, diperlukan metodologi analitik yang sensitif dan terstandarisasi. Proses persiapan dan derivatisasi sampel sangat memengaruhi hasil analisis SCFA. Rincian metodologi tersebut ditampilkan pada Tabel 2, yang memuat tahapan pra-analisis dan kondisi uji untuk berbagai jenis sampel biologis berdasarkan beberapa penelitian terkini.

Setelah memahami pentingnya deteksi SCFA pada matriks biologis, analisis serupa juga relevan diterapkan pada berbagai jenis limbah industri yang mengandung bahan organik tinggi. Limbah seperti vinasse, WAS, dan POME merupakan sumber potensial pembentukan SCFA melalui proses fermentasi anaerobik. Berbagai penelitian telah mengkaji efektivitas metode HPLC dan GC-FID dalam mendeteksi SCFA dari limbah-limbah tersebut. Rangkuman hasil penelitian tersebut ditampilkan pada Tabel 3.

Short-chain fatty acids (SCFA) berperan penting dalam menjaga keseimbangan

metabolisme dan sistem kekebalan tubuh manusia, serta berpotensi sebagai biomarker untuk berbagai penyakit metabolik dan inflamasi (Choe, 2025; Mannocho-russo et al., 2025; Nayak et al., 2025). Analisis SCFA menggunakan metode LC-MS/MS terbukti paling efektif karena mampu mendeteksi konsentrasi sangat rendah dengan akurasi dan sensitivitas tinggi pada berbagai matriks biologis. Profil SCFA berbeda antar jenis sampel: asam asetat mendominasi pada feses dan serum, sedangkan asam propionat dan butirrat ditemukan dalam kadar lebih rendah namun signifikan pada urin, konsentrasi SCFA jauh lebih kecil dan bervariasi antar individu (Kim et al., 2014). Perbedaan ini mencerminkan proses biologis yang berbeda fermentasi mikrobiota di kolon, distribusi sistemik dalam darah, dan ekskresi metabolik melalui urin. Dengan demikian, LC-MS/MS menjadi alat penting untuk memahami peran fisiologis SCFA sekaligus mendukung diagnosis dini, serta pengembangan terapi berbasis metabolit mikrobiota (Chalova et al., 2023).

Table 2. Pre-Analysis Stages And Test Conditions For Various Types Of Biological Samples

Jenis Sampel	Tahapan Persiapan	Kondisi Operasi / Perlakuan Utama	Referensi
Feses	Pengenceran dan homogenisasi dengan larutan NaOH 5 mM yang mengandung <i>internal standard</i> (asam kaproat-D ₃)	Disentrifugasi 13,2 gram, 20 menit, 4 °C; supernatan diambil untuk derivatisasi dengan propanol/piridin dan propil kloroformat	(Ramos-Garcia et al., 2022)
Urin	Pencampuran sampel dengan NaOH 5 mM dan <i>internal standard</i>	Derivatisasi menggunakan propanol/piridin (3:2) dan propil kloroformat; ekstraksi dengan <i>n</i> -heksana, sentrifugasi 2,000 g, 25°C	(Ramos-Garcia et al., 2022)
Serum	Presipitasi protein menggunakan asetonitril dingin	Inkubasi dalam es 20 menit; sentrifugasi dan pemisahan fase asetonitril	(Shafaei et al., 2021)
Semua sampel	Penyimpanan pascapersediaan	Disimpan pada suhu -80°C sebelum analisis GC/FID atau HPLC	(Chen et al., 2019; Mayo-Martínez et al., 2024)

Table 3. Detection of Short Chain Fatty Acids (SCFA) in Biological Waste

Limbah, Referensi	Alat Deteksi	Kondisi Operasi	Hasil	Kekurangan dan Kelebihan
Urine dan Feses, (Ramos-Garcia et al., 2022)	Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) type Agilent 7890B yang digabungkan dengan <i>detektor spektrometri massa quadrupole Agilent 5977A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)</i>	GC-MS dengan kolom kapiler HP-5 MS dan injeksi dalam <i>mode split</i> dengan rasio 10:1. Suhu oven 50°C selama 2 menit, kemudian dinaikkan hingga 290°C selama 8 menit. Gas pembawa helium dengan aliran 1 mL/menit, temperatur inlet dan transfer line diatur pada 260°C dan 290°C, dengan energi elektron diatur pada -70 eV.	Kadar asam asetat yaitu 2 hingga 8593 µM, konsentrasi asam propionat 0,5 hingga 8927 µM dan konsentrasi asam butirat 0,1 hingga 1619 µM.	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode ini menunjukkan kemampuan untuk mengukur SCFAs dan BCAAs secara akurat dalam volume sampel yang kecil, dengan validasi yang menunjukkan akurasi dan presisi tinggi. Penelitian ini juga memberikan referensi konsentrasi metabolit di dalam <i>fezes</i> dan urin, serta mengidentifikasi perbedaan signifikan antara ibu dan bayi, yang penting untuk memahami kesehatan mikrobiota dan dampak gizi. Kekurangan metode ini memerlukan derivatisasi dan langkah analisis yang kompleks, yang dapat meningkatkan waktu dan biaya. Selain itu, pengambilan sampel urin dari bayi baru lahir dapat menimbulkan tantangan, dan potensi kontaminasi dari alat pengumpul dapat mempengaruhi hasil.
Feses, (Han et al., 2015)	Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry type Ultimate 3000 RSLC (LC-MS/MS) (Dionex Inc., Amsterdam, Belanda) digabung dengan <i>spektrometer massa triple-quadrupole 4000 QTRAP (AB Sciex, Concord, ON, Kanada)</i>	LC-MS/MS menggunakan pemisahan kromatografi dilakukan pada kolom UPLC Waters BEH C18 (2,1 100 mm, 1,7mm), menggunakan air:asam format (100:0,01, v/v; pelarut A) dan asetonitril:asam format (100:0,01, v/v; pelarut B) sebagai fase gerak untuk <i>elusi gradien</i> . Laju aliran kolom adalah 0,35 mL min ⁻¹ ; suhu kolom adalah 40°C, dan autosampler dijaga pada 5°C. <i>Gradien elusi</i> pelarut biner dioptimalkan pada 15% B selama 2 menit, 15%–55% B dalam 9 menit, dan kemudian ditahan pada 100% B selama 1 menit. Kolom diseimbangkan selama 3 menit pada 15% B di antara injeksi.	Konsentrasi SCFA antara 93,1% hingga 108,4%	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode ini menunjukkan sensitivitas tinggi dengan batas deteksi yang sangat rendah (femtomolar) dan akurasi kuantifikasi yang baik (93–108%). Penggunaan derivatisasi dengan 3-nitrophenylhydrazine (3-NPH) memungkinkan analisis yang stabil dan dapat diandalkan, meningkatkan pemahaman tentang peran SCFAs dalam kesehatan manusia. Penelitian ini juga memberikan wawasan baru tentang hubungan antara metabolit dan kondisi kesehatan. Kekurangan metode ini memerlukan langkah derivatisasi yang kompleks, yang dapat menambah waktu analisis. Selain itu, ada risiko potensi kehilangan senyawa selama proses derivatisasi dan analisis.
Plasma, (Mayo-Martinez et al., 2024)	Liquid Chromatography Quadrupole Mass Spectrometry LC-QqQ-MS type Degasser (seri 1260 Infinity, Agilent)	LC-QqQ-MS menggunakan kolom fase terbalik (<i>Acquity BEH C8</i>) dengan ukuran 100 mm x 2,1 mm dan partikel 1,7 µm, dipanaskan suhu 60°C. Aliran <i>mobile phase</i> 0,350 mL/menit, dengan dua <i>eluen</i> : <i>eluen</i> A terdiri dari 5% asetonitril (ACN) dan 0,1% asam format dalam air <i>ultrapure</i> , sedangkan <i>eluen</i> B adalah 0,1% asam format dalam ACN.	SCFA dalam plasma dan <i>fezes</i> dengan konsentrasi antara 0,2 hingga 200 µM	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode ini mencakup akurasi dan presisi tinggi dalam kuantifikasi asam lemak rantai pendek (SCFAs), serta kemampuan untuk menganalisis beberapa jenis SCFAs secara simultan. Waktu analisis yang singkat dan sensitivitas terhadap konsentrasi rendah dalam matriks biologis menjadikannya pilihan yang efisien untuk penelitian. Kekurangan pada metode ini yaitu kebutuhan akan peralatan mahal dan prosedur yang kompleks, yang memerlukan keahlian teknis tinggi. Hasil analisis juga dapat dipengaruhi oleh efek matriks, dan meskipun analisisnya cepat, waktu persiapan sampel dapat mengurangi efisiensi. Selain itu, penggunaan bahan kimia berpotensi menghasilkan limbah berbahaya yang memerlukan pengelolaan ketat.

Serum, (Shafaei et al., 2021)	Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS) type Thermo Scientific Ultimate 3000	LC-MS/MS menggunakan Sampel yang dipisahkan pada kolom <i>Thermo Hypersil aQ</i> dan ACE C18-PFP (100 mm × ID 2,1 mm, partikel 1,7 µm) dengan fase gerak air (A) dan asetoneitril (B). Kondisi awal fase gerak adalah 99% A dan 1% B, ditahan selama 2 menit, kemudian A dikurangi menjadi 90% selama 2 menit, dan 10% selama 5 menit. Laju aliran 0,2 mL/min dan suhu kolom 30°C. Suhu kolom ditetapkan pada 45°C dengan laju aliran 0,3 mL/min dan volume injeksi 2 µL. Ionisasi <i>elektrospray</i> mode ion negatif dengan tegangan semprotan 2500 V, suhu gas tambahan 350°C, dan suhu kapiler 350°C.	Konsentrasi asam asetat 14,627 ng/mL pada kolom 1 dan 14,933 ng/mL pada kolom 2. Asam propionat konsentrasi 1,271 ng/mL di kolom 1 dan 1,200 ng/mL di kolom 2. Asam butirat konsentrasi 1,387 ng/mL pada kolom 1 dan 1,479 ng/mL pada kolom 2.	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan metode ini menunjukkan kemampuan deteksi yang sangat sensitif, dengan batas deteksi rendah (1-7 ng/mL) dan pemulihan yang baik (94-114%). Penggunaan kromatografi dan spektrometri massa yang tinggi resolusi memungkinkan identifikasi yang akurat dan pengukuran SCFAs dalam serum, yang penting untuk memahami hubungan antara kesehatan usus dan penyakit. Metode ini juga menunjukkan potensi untuk aplikasi klinis dalam pemantauan kesehatan. Metode ini memerlukan langkah derivatisasi yang kompleks untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi interferensi, yang dapat menambah waktu dan biaya analisis. Selain itu, kehadiran senyawa isomerik dapat mempengaruhi akurasi hasil.
Serum, (Chen et al., 2019)	Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (LC MS/MS) type Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, AS	LC MS/MS menggunakan kolom <i>AscentisVR Express Phenyl-Hexyl</i> (5 cm 2,1 mm ID, 2,7 µm, <i>Supelco, Inc., Bellefonte, PA, USA</i>) pada suhu 45°C. Volume injeksi 1,0 µL dan fase gerak 5 mM amonium asetat berair (A), isopropanol (B) dan metanol (C) pada laju aliran 200 µL/menit. <i>Elusi gradien</i> berikut diterapkan selama 5 menit 65% A dan 35% C; 0,5–1,0 menit 30% A, 20% B, 50% C; 1,04,5 menit 5% A, 30% B, 65% C; 4,5–5,0 menit 33% B, 67% C; rasio ini dipertahankan selama 8,0 menit; 8,0–10,0 menit. Tegangan semprot 3000 V. Nitrogen sebagai gas selubung dan gas tambahan ditetapkan pada 50 psi dan 10 psi. Suhu <i>vaporizer</i> dan suhu kapiler 350°C dan 200°C. Tekanan gas tabrakan (argon) 1,8 mTorr.	SCFA yang dihasilkan konsentrasi asam butirat (FA 4:0) tercatat sebesar 162,4 ± 76,4 µmol/L, asam kaproat (FA 6:0) mencapai 2,0 ± 2,5 µmol/L..	<ol style="list-style-type: none"> Kelebihan Metode ini menunjukkan sensitivitas tinggi dengan batas deteksi yang rendah (5 pmoL untuk FA 4:0 dan 0.12 pmoL untuk FA 6:0). Selain itu, metode ini mampu mengukur bentuk esterifikasi dan bentuk bebas SCFAs secara akurat dalam serum manusia, memberikan wawasan penting tentang hubungan antara SCFAs dan kesehatan. Kekurangan Metode ini memerlukan langkah derivatisasi yang kompleks, yang dapat menambah waktu dan biaya analisis. Selain itu, ada potensi interferensi dari senyawa lain yang dapat mempengaruhi akurasi hasil.

KESIMPULAN

Analisis berbagai jenis limbah menunjukkan HPLC merupakan metode paling efektif untuk mendeteksi SCFA pada limbah industri seperti WAS dan POME karena mampu memberikan hasil akurat pada senyawa kompleks, sedangkan GC-FID lebih sesuai untuk limbah yang mengandung senyawa volatil seperti vinasse. Sementara itu, untuk limbah biologis seperti feses, serum, dan urin, metode LC-MS/MS menunjukkan sensitivitas dan presisi tertinggi dalam mengukur SCFA pada konsentrasi sangat rendah. Temuan ini memiliki implikasi praktis terhadap peningkatan efisiensi pengolahan limbah dan pemantauan kesehatan lingkungan maupun manusia melalui pemanfaatan SCFA sebagai indikator biologis. Penelitian ke depan perlu difokuskan pada pengembangan sistem deteksi cepat, portabel, dan berkelanjutan, termasuk integrasi teknologi sensor berbasis IoT dan bioteknologi mikroba, guna memperkuat pengawasan *real-time* terhadap limbah industri dan biologis dalam mendukung ekonomi sirkular dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. E., Hammam, A. R. A., Ali, A. E. F., Alsaleem, K. A., Elfaruk, M. S., Kamel, D. G., & Moneeb, A. H. M. (2023). Measurement of carbohydrates and organic acids in varieties of cheese using high-performance liquid chromatography. *Food Science and Nutrition*, *11*(5), 2081–2085. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2438>
- Aisah, N. N., & Octaria, Y. C. (2024). *Dampak serat terhadap produksi asam lemak rantai 2024*, *5*, 1102–1112.
- Apriyani, N. (2017). Penurunan kadar surfaktan dan sulfat dalam limbah laundry. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, *2*(1), 37–44. <https://doi.org/10.33084/mitl.v2i1.132>
- Arpaia, N., Campbell, C., Fan, X., Dikiy, S., Van Der Veeken, J., Deroos, P., Liu, H., Cross, J. R., Pfeffer, K., Coffey, P. J., & Rudensky, A. Y. (2013). Metabolites produced by commensal bacteria promote peripheral regulatory T-cell generation. *Nature*, *504*(7480), 451–455. <https://doi.org/10.1038/nature12726>
- Ashaq, I., Ahmad Sheikh, A., Beri, N., Mittal, S., Javed Naim, M., Alam, O., & Bawa, S. (2022). Withdrawn: biomarkers in disease diagnosis and the role of LC-MS and NMR: A Review. *Current Pharmaceutical Design*, *28*, 2022. <https://doi.org/10.2174/1381612828666220408233542>
- Cabrera-Díaz, A., Pereda-Reyes, I., Oliva-Merencio, D., Lebrero, R., & Zaiat, M. (2017). Anaerobic digestion of sugarcane vinasse through a methanogenic UASB reactor followed by a packed bed reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *183*(4), 1127–1145. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2488-2>
- Calvigioni, M., Bertolini, A., Codini, S., Mazzantini, D., Panattoni, A., Massimino, M., Celandroni, F., Zucchi, R., Saba, A., & Ghelardi, E. (2023). HPLC-MS-MS quantification of short-chain fatty acids actively secreted by probiotic strains. *Frontiers in Microbiology*, *14*(March), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1124144>
- Chalova, P., Tazky, A., Skultety, L., Minichova, L., Chovanec, M., Ciernikova, S., Mikus, P., & Piestansky, J. (2023). Determination of short-chain fatty acids as putative biomarkers of cancer diseases by modern analytical strategies and tools: A Review. *Frontiers in Oncology*, *13*(June), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1110235>
- Chen, Y., Wu, Y., Wang, D., Li, H., Wang, Q., Liu, Y., Peng, L., Yang, Q., Li, X., Zeng, G., & Chen, Y. (2018). Understanding the mechanisms of how poly aluminium chloride inhibits short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of waste activated sludge. In *Chemical Engineering Journal*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.064>
- Chen, Z., Wu, Y., Shrestha, R., Gao, Z., Zhao, Y., Miura, Y., Tamakoshi, A., Chiba, H., & Hui, S. P. (2019). Determination of total, free and esterified short-chain fatty acid in human serum by liquid chromatography-mass spectrometry. *Annals of Clinical Biochemistry*, *56*(2), 190–197. <https://doi.org/10.1177/0004563218801393>
- Choe, U. (2025). Role of dietary fiber and short-chain fatty acids in preventing neurodegenerative diseases through the gut-

- brain axis. *Journal of Functional Foods*, 129(March), 106870. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2025.106870>
- De Vos, W. M., Tilg, H., Van Hul, M., & Cani, P. D. (2022). Gut microbiome and health: mechanistic insights. *Gut*, 71(5), 1020–1032. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2021-326789>
- Den Besten, G., Van Eunen, K., Groen, A. K., Venema, K., Reijngoud, D. J., & Bakker, B. M. (2013). The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism. *Journal of Lipid Research*, 54(9), 2325–2340. <https://doi.org/10.1194/jlr.R036012>
- Dias, A. S., Carneiro, P. A., Boloy, R. A. M., César, A. da S., & de Oliveira, U. R. (2024). Advancements in vinasse application: An integrated analysis of patents, literature and research profile. *Cleaner Engineering and Technology*, 22(June). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100795>
- Feng, L., Chen, Y., & Zheng, X. (2009). Enhancement of waste activated sludge protein conversion and volatile fatty acids accumulation during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition: the effect of pH. *Environmental Science & Technology*, 43, 4373–4380.
- Gardana, C., Del Bo, C., & Simonetti, P. (2017). Validation and application of an ultrahigh-performance liquid chromatographic-orbitrap mass spectrometric method for the simultaneous detection and quantification of volatile and non-volatile organic acids in human faecal samples. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 141, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.04.006>
- Haghikia, A., Zimmermann, F., Schumann, P., Jasina, A., Roessler, J., Schmidt, D., Heinze, P., Kaisler, J., Nageswaran, V., Aigner, A., Ceglarek, U., Cineus, R., Hegazy, A. N., Van Der Vorst, E. P. C., Doring, Y., Strauch, C. M., Nemet, I., Tremaroli, V., Dwibedi, C., Landmesser, U. (2022). Propionate attenuates atherosclerosis by immune-dependent regulation of intestinal cholesterol metabolism. *European Heart Journal*, 43(6), 518–533. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab644>
- Han, J., Lin, K., Sequeira, C., & Borchers, C. H. (2015). An isotope-labeled chemical derivatization method for the quantitation of short-chain fatty acids in human feces by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 854, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.11.015>
- Ke, S., Wang, A., Yu, P., Wang, X., Chen, G., Lin, Y., Blanchard, C., Zhou, Z., & Zhao, G. (2025). Further understanding the unique structure derived from interaction of soy proteins with acylated starch of various chain-length short-chain fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 356(February), 123417. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123417>
- Khair, A. S. E., Elfaig, A. H. I., Yassen, M. E., Purwanto, & Sunoko, H. R. (2023). Environmental pollution from cane sugar factories: a study of chemical features variations in the wastewater. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 12(1), 32–42. <https://doi.org/10.15294/jpii.v12i1.40116>
- Kim, C. H., Park, J., & Kim, M. (2014). Gut microbiota-derived short-chain fatty acids, T cells, and inflammation. *Immune Network*, 14(6), 277. <https://doi.org/10.4110/in.2014.14.6.277>
- Koh, A., De Vadder, F., Kovatcheva-Datchary, P., & Bäckhed, F. (2016). From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites. *Cell*, 165(6), 1332–1345. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.05.041>
- Ma, K., Li, Q., Han, X., Du, Y., Jiang, Y., Yan, X., Cui, Y., Kang, W., Meng, L., & Cao, Z. (2024). Unleashing the potential of short-chain fatty acids: alginate-degrading consortium boosts anaerobic sludge fermentation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112178. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112178>
- Mannocho-russo, H., Charron-lamoureux, V., Faassen, M. Van, Siegel, D., Knight, R., Dorrestein, P. C., Mannocho-russo, H., Charron-lamoureux, V., Faassen, M. Van, & Lamichhane, S. (2025). Resource the microbiome diversifies long- to short-chain fatty acid-derived N -acyl lipids . *Cell*, 188(15)

- <https://doi.org/10.1016/j.cell.2025.05.015>
- Martini, S., Yuliwati, E., & Kharismadewi, D. (2020). Pembuatan teknologi pengolahan limbah cair industri. *Jurnal Distilasi*, 5(2), 26. <https://doi.org/10.32502/jd.v5i2.3030>
- Mayasri, A. (2023). Fermentasi molase dari tetes tebu sebagai alternatif bahan bakar terbarukan. *Lantanida Journal*, 11(1), 83. <https://doi.org/10.22373/lj.v11i1.15474>
- Mayo-Martínez, L., Paz Lorenzo, M., Martos-Moreno, G., Graell, M., Barbas, C., Rupérez, F. J., Argente, J., & García, A. (2024). Short-chain fatty acids in plasma and feces: an optimized and validated LC-QqQ-MS method applied to study anorexia nervosa. *Microchemical Journal*, 200(February). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110255>
- McDonald, J. A. K., Mullish, B. H., Pechlivanis, A., Liu, Z., Brignardello, J., Kao, D., Holmes, E., Li, J. V., Clarke, T. B., Thursz, M. R., & Marchesi, J. R. (2018). Inhibiting growth of *Clostridioides difficile* by restoring valerate, produced by the intestinal microbiota. *Gastroenterology*, 155(5), 1495-1507.e15. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2018.07.014>
- Michel, L., & Prat, A. (2016). One more role for the gut: Microbiota and blood brain barrier. *Annals of Translational Medicine*, 4(1), 4–6. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2305-5839.2015.10.16>
- Muthmainna Basma, N., Syamsi Dhuha, N., Yenny Nonci, F., & Anggraeni, R. (2023). Studi literatur perbandingan metode GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) dan HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) dalam identifikasi kandungan lemak babi pada produk olahan daging. *Ritma*, 1(2), 22–29.
- Nayak, S. P. R. R., Das, A., Choi, K. C., Arasu, M. V., Raja Namasivayam, S. K., Guru, A., & Arockiaraj, J. (2025). Molecular insights into the impact of environmental pollution on gut microbiota and short chain fatty acids (SCFA) mediated metabolic dysregulation. *Medicine in Microecology*, 25(March), 100133. <https://doi.org/10.1016/j.medmic.2025.100133>
- Nemutudi, B., Pikinini, S., McFadzean, B., Zhang, X., Zhu, Y., Han, L., Ngoepe, P. E., & Mkhonto, P. P. (2025). pH effect on adsorption and performance of xanthate, dithiocarbamate and s-triazine collectors on sperrylite mineral surface. *Minerals Engineering*, 224(September 2024), 109191. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109191>
- Oktavia, S. (2018). Analisis kualitas badan air dan kualitas air sumur di sekitar pabrik gula Rejo Agung Baru Kota Madiun. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(1), 1–12. <https://pdfs.semanticscholar.org/105b/b836826836d6adcb9cdc47871138df30f20d.pdf>
- Olonimoyo, E. A., Amradi, N. K., Lansing, S., Asa-Awuku, A. A., & Duncan, C. M. (2025). An improved underivatized, cost-effective, validated method for six short-chain fatty organic acids by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography Open*, 7(October 2024), 100193. <https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2024.100193>
- Patel, A., Mahboubi, A., Horváth, I. S., Taherzadeh, M. J., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2021). Volatile Fatty Acids (VFAs) generated by anaerobic digestion serve as feedstock for freshwater and marine oleaginous microorganisms to produce biodiesel and added-value compounds. *Frontiers in Microbiology*, 12(January), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.614612>
- Pekmez, C. T., Larsson, M. W., Lind, M. V., Vazquez Manjarrez, N., Yonemitsu, C., Larnkjær, A., Bode, L., Mølgaard, C., Michaelsen, K. F., & Dragsted, L. O. (2020). Breastmilk lipids and oligosaccharides influence branched short-chain fatty acid concentrations in infants with excessive weight gain. *Molecular Nutrition and Food Research*, 64(3), 1–10. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201900977>
- Pikir, & Hermawan. (2022). *Pemrograman ulang sel untuk regenerasi kardiomyosit*. Airlangga University Press. Airlangga University Press.
- Pluznick, J. L., Protzko, R. J., Gevorgyan, H., Peterlin, Z., Sipos, A., Han, J., Brunet, I., Wan, L. X., Rey, F., Wang, T., Firestein, S. J., Yanagisawa, M., Gordon, J. I., Eichmann,

- A., Peti-Peterdi, J., & Caplan, M. J. (2013). Olfactory receptor responding to gut microbiota-derived signals plays a role in renin secretion and blood pressure regulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(11), 4410–4415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215927110>
- Primec, M., Mičetić-Turk, D., & Langerholc, T. (2017). Analysis of short-chain fatty acids in human feces: A scoping review. *Analytical Biochemistry*, *526*, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2017.03.007>
- Pruksatrakul, T., Phoopraintra, P., Wilairat, P., Chaiyen, P., & Chantiwas, R. (2017). Development of a sequential injection-liquid microextraction procedure with GC-FID for analysis of short-chain fatty acids in palm oil mill effluent. *Talanta*, *165*, 612–618. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.01.010>
- Purwanti, A. A. (2018). The processing of hazardous and toxic hospital solid waste in Dr. Soetomo Hospital Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, *10*(3), 291. <https://doi.org/10.20473/jkl.v10i3.2018.291-298>
- Rakhmah, A. A., Ramadhan, D., Zahراسيwi, R. F., & Kurniawati, W. (2023). Pemanfaatan potensi sampah sebagai sumber energi. *Jurnal Penelitian Teknologi Informasi Dan Sains*, *1*(4), 133–141. <https://doi.org/10.54066/jptis.v1i4.1391>
- Ramos-Garcia, V., Ten-Doménech, I., Moreno-Giménez, A., Campos-Berga, L., Parra-Llorca, A., Solaz-García, Á., Lara-Cantón, I., Pinilla-Gonzalez, A., Gormaz, M., Vento, M., Kuligowski, J., & Quintás, G. (2022). GC-MS analysis of short chain fatty acids and branched chain amino acids in urine and faeces samples from newborns and lactating mothers. *Clinica Chimica Acta*, *532*(April), 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2022.05.005>
- Ríos-Covián, D., Ruas-Madiedo, P., Margolles, A., Gueimonde, M., De los Reyes-Gavilán, C. G., & Salazar, N. (2016). Intestinal short chain fatty acids and their link with diet and human health. *Frontiers in Microbiology*, *7*(FEB), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00185>
- Shafaei, A., Vamathevan, V., Pandohee, J., Lawler, N. G., Broadhurst, D., & Boyce, M. C. (2021). Sensitive and quantitative determination of short-chain fatty acids in human serum using liquid chromatography mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *413*(25), 6333–6342. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03589-w>
- Silva, J. J., da Silva, B. F., Stradiotto, N. R., Petrović, M., Gros, M., & Gago-Ferrero, P. (2021). Identification of organic contaminants in vinasse and in soil and groundwater from fertigated sugarcane crop areas using target and suspect screening strategies. *Science of the Total Environment*, *761*(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143237>
- Singh, P., Singh, V. K., Singh, R., Borthakur, A., Madhav, S., Ahamad, A., Kumar, A., Pal, D. B., Tiwary, D., & Mishra, P. K. (2019). Bioremediation: A sustainable approach for management of environmental contaminants. In *Abatement of Environmental Pollutants: Trends and Strategies*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00001-1>
- Tain, Y. (2021). *Rat Offspring against Hypertension Programmed by Perinatal TCDD Exposure*. 1–13.
- Veranica, Rahayu, A., Maryudi, Hakika, Dhias, C., Lim, Lee, W., & Anggresani, L. (2024). Isotherm adsorption of ion phosphate from vinasse waste using quaternary ammonium polymer as adsorbent. *Jurnal Sains Natural*, *14*, 91–97.
- Villa, S. R., Priyadarshini, M., Fuller, M. H., Bhardwaj, T., Brodsky, M. R., Angueira, A. R., Mosser, R. E., Carboneau, B. A., Tersey, S. A., Mancebo, H., Gilchrist, A., Mirmira, R. G., Gannon, M., & Layden, B. T. (2016). Loss of free fatty acid receptor 2 leads to impaired islet mass and beta cell survival. *Scientific Reports*, *6*, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep28159>
- Wang, Y., Chen, J., Wang, Q., Qin, Q., Ye, J., Han, Y., Li, L., Zhen, W., Zhi, Q., Zhang, Y., & Cao, J. (2019). Increased secondary aerosol contribution and possible processing on polluted winter days in China.

- Environment International*, 127, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.021>
- Xin, X., Li, L., Cheng, J., Wang, Y., Lu, B., Yang, Y., Li, L., & Wong, J. W. C. (2025). Synchronous production of bioethanol and short-chain fatty acids associated with microbial mechanisms via the short-term cultivation of waste molasses inoculated with *Aspergillus oryzae*. *Journal of Environmental Management*, 380, 124888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124888>
- Xu, Q., Li, X., Ding, R., Wang, D., Liu, Y., Wang, Q., Zhao, J., Chen, F., Zeng, G., Yang, Q., & Li, H. (2017). Understanding and mitigating the toxicity of cadmium to the anaerobic fermentation of waste activated sludge. *Water Research*, 124, 7. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.067>
- Yao, Y., Cai, X., Fei, W., Ye, Y., Zhao, M., & Zheng, C. (2022). The role of short-chain fatty acids in immunity, inflammation, and metabolism. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1854675>
- Yu, X., Zeng, W., Zhang, J., Lu, S., & Peng, Y. (2025). Potassium ferrate pretreatment enhances short-chain fatty acid production and phosphorus recovery in co-fermentation system of waste activated sludge and corn stover. *Chemical Engineering Journal*, 511, 162052. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162052>
- Zheng, D., Wu, Y., Zhao, S., Sun, F., Su, B., & Song, X. (2025). Peroxymonosulfate-steel slag combination enhances short-chain fatty acids production from waste activated sludge anaerobic fermentation: Microbial community and metabolism analyses. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 117547. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117547>
- Zhu, X., Zhou, Y., Wang, Y., Wu, T., Li, X., Li, D., & Tao, Y. (2017). Production of high-concentration n-caproic acid from lactate through fermentation using a newly isolated Ruminococcaceae bacterium CPB6. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0788-y>