Jurnal Impresi Indonesia (JII)
e-ISSN: 2810-062x
Vol. 5, No. 11, November 2026, pp 6481-6492
DOI : 10.58344/jii.v5i11.8228

Pengembangan dan Validasi Metode Analisis Alkohol (Etanol dan Metanol) dalam Matriks *Blank Whole Blood* Menggunakan *Headspace Gas Chromatography–Tandem Mass Spectrometry* (HS-GC-MS/MS) untuk Pemeriksaan Toksikologi Forensik

Pancama Putra Hadi Wahana*, Saobikha Nahar, Yuvindra Yasodhara, Jihan Farradina, Novi Wulandari
Bidang Laboratorium Biomedik Rolabdokkes Pusdokkes Polri, Indonesia
Email : bidlabbiomedik.rolabdokkes@gmail.com*

Keywords:
Ethanol; Methanol; Forensic Toxicology; Headspace Gas Chromatography; Method Validation

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Riviera Publishing

Abstract

Reliable identification of methanol and ethanol in whole blood is important for forensic toxicology, particularly when results may support legal decisions. This study developed and evaluated a headspace gas chromatography–tandem mass spectrometry (HS-GC-MS/MS) procedure using fortified blank whole blood and subsequently examined actual detainee blood samples. The reported validation assessed system suitability, linearity, precision, recovery, limits of detection and quantification, selectivity, and robustness. System suitability met the area repeatability criterion, with relative standard deviations of 2.9% for methanol and 3.1% for ethanol. Calibration yielded reported coefficients of determination of 0.99823 and 0.99720, respectively. Mean recovery was 92.58% for methanol and 98.22% for ethanol. The reported detection limits were 154.74 ppm for methanol and 119.67 ppm for ethanol, while quantification limits were 468.89 ppm and 362.62 ppm. Among 40 detainee blood samples tested, neither analyte was detected under the analytical conditions used. These findings indicate promising method performance within the studied concentration range, but a negative result does not establish the absence of prior alcohol consumption. The validation record contains discrepancies in the number of calibration levels and selected response values that require reconciliation before routine forensic implementation. Further verification using traceable reference materials and authentic case samples is therefore recommended.

Kata Kunci:
Etanol; Metanol; Toksikologi Forensik; Kromatografi Gas Headspace; Validasi Metode

Abstrak

Identifikasi metanol dan etanol dalam darah utuh memerlukan metode analitik yang andal karena hasil pemeriksaan toksikologi forensik dapat digunakan dalam proses hukum. Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi metode *headspace gas chromatography–tandem mass spectrometry* (HS-GC-MS/MS) menggunakan *blank whole blood* yang ditambah larutan standar, kemudian menerapkannya pada sampel darah tahanan. Parameter validasi mencakup kesesuaian sistem, linearitas, presisi, perolehan kembali, batas deteksi, batas kuantitasi, selektivitas, dan robustness. Kesesuaian sistem memenuhi kriteria pengulangan luas area dengan RSD sebesar 2,9% untuk metanol dan 3,1% untuk etanol.

Koefisien determinasi kurva kalibrasi yang dilaporkan adalah 0,99823 untuk metanol dan 0,99720 untuk etanol. Rerata perolehan kembali mencapai 92,58% dan 98,22%, sedangkan batas deteksi masing-masing 154,74 ppm dan 119,67 ppm. Batas kuantitasi metanol dan etanol berturut-turut sebesar 468,89 ppm dan 362,62 ppm. Pada pemeriksaan 40 sampel darah tahanan, kedua analit tidak terdeteksi dengan kondisi metode yang digunakan. Hasil menunjukkan kinerja analitik yang menjanjikan dalam rentang pengujian, tetapi temuan negatif tidak membuktikan bahwa subjek tidak pernah mengonsumsi alkohol. Beberapa rincian validasi, termasuk jumlah tingkat kalibrasi dan nilai respons pada tabel yang berbeda, masih perlu dicocokkan dengan data instrumen asli. Verifikasi lanjutan menggunakan bahan acuan tertelusur serta sampel kasus nyata diperlukan sebelum metode digunakan secara rutin untuk pembuktian forensik.

PENDAHULUAN

Pemeriksaan toksikologi forensik membutuhkan metode analitik yang dapat mengidentifikasi dan mengukur senyawa secara andal karena hasil laboratorium dapat menjadi bagian dari pembuktian ilmiah. Untuk senyawa volatil dalam darah, mutu pengukuran dipengaruhi oleh preparasi matriks, kondisi instrumen, dan prosedur pengendalian mutu. Validasi metode perlu menilai karakteristik kinerja yang sesuai dengan tujuan penggunaan, sebagaimana dijelaskan dalam pedoman validasi yang dirujuk naskah.

Etanol dan metanol merupakan analit penting dalam berbagai pemeriksaan toksikologi, termasuk dugaan keracunan, kecelakaan, dan kasus yang memerlukan penilaian paparan alkohol. Kemiripan sifat volatil kedua senyawa menuntut pemisahan dan identifikasi yang selektif. Kesalahan identifikasi ataupun pelaporan konsentrasi dapat berdampak pada interpretasi medis dan hukum, sehingga hasil positif maupun negatif harus dibaca bersama batas kemampuan metode.

Kromatografi gas telah digunakan untuk analisis alkohol karena mampu memisahkan komponen campuran, sedangkan spektrometri massa memberikan informasi identitas berdasarkan ion yang terdeteksi. Penggunaan teknik headspace mengurangi masuknya komponen matriks nonvolatil ke sistem analitik. Dalam konteks darah utuh, metode *headspace gas chromatography–tandem mass spectrometry* (HS-GC-MS/MS) berpotensi menyediakan selektivitas dan kepekaan yang relevan, tetapi kinerja nyata tetap harus ditunjukkan melalui data validasi pada instrumen dan matriks setempat.

Penelitian terdahulu yang dirujuk dalam naskah, antara lain Wasfi et al., (2004) dan Xiao et al., (2014), membahas analisis senyawa volatil atau etanol dengan pendekatan headspace dan spektrometri massa. Kedua kajian memberi landasan teknis mengenai pemisahan serta pengukuran analit, tetapi hasilnya tidak dapat langsung dianggap mewakili kinerja kombinasi instrumen, kondisi kalibrasi, dan blank whole blood yang digunakan pada laboratorium penelitian ini.

Kesenjangan yang hendak dijawab ialah ketersediaan bukti validasi setempat untuk analisis etanol dan metanol secara bersamaan menggunakan HS-GC-MS/MS pada matriks *blank whole blood*. Aspek yang perlu ditunjukkan meliputi kesesuaian sistem, linearitas, presisi, recovery, sensitivitas, selektivitas, dan robustness, diikuti penerapan terbatas pada

sampel nyata. Perbedaan angka antarbagian tabel sumber masih perlu diverifikasi agar klaim kinerja metode berlandaskan hasil instrumen yang konsisten.

Urgensi penelitian berkaitan dengan kebutuhan laboratorium forensik untuk melaporkan hasil yang dapat ditelusuri serta menyatakan keterbatasan pengukurannya. Kebaruan yang dinyatakan penelitian ini bersifat penerapan dan validasi pada fasilitas serta kondisi analitik tertentu, bukan penemuan prinsip kromatografi baru. Karena itu, keberhasilan pengujian laboratorium perlu dipisahkan dari klaim klinis ataupun hukum terhadap riwayat konsumsi alkohol seseorang.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi metode HS-GC-MS/MS untuk pengukuran etanol dan metanol dalam darah utuh dengan parameter validasi yang dilaporkan, serta mendeskripsikan hasil pemeriksaan sampel darah tahanan. Hasilnya diharapkan mendukung penyusunan prosedur kerja, penjaminan mutu, dan penelitian lanjutan yang mengonfirmasi akurasi serta sensitivitas dengan bahan acuan dan sampel kasus yang sesuai.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan sebagai eksperimen laboratorium untuk validasi analisis etanol dan metanol pada blank whole blood yang diperkaya standar, disertai pemeriksaan deskriptif sampel darah tahanan. Kegiatan dilaporkan berlangsung pada Juni–Desember 2026 di Laboratorium Biomedik Rolabdokkes Pusdokkes Polri, sedangkan pengambilan darah dilakukan di Klinik Urkes Rumah Tahanan Polda Metro Jaya. Rancangan awal memuat sedikitnya 57 analisis validasi; sampel nyata direncanakan 44 dari populasi 50 orang melalui purposive sampling, tetapi data hasil mencakup 40 sampel aktual. Persyaratan sampel mencakup riwayat konsumsi alkohol berdasarkan asesmen medis, persetujuan partisipasi, dan kualitas spesimen yang layak. Nomor persetujuan etik, prosedur penyamaran identitas, dan alasan ketidaktercapaian target sampel memerlukan konfirmasi penulis.

Peralatan utama meliputi HS-GC-MS/MS, *headspace autosampler*, vial 20 mL, *mikropipet, vortex mixer*, dan sarana penyimpanan dingin. Bahan mencakup *blank whole blood,* standar etanol, metanol, propanol sebagai standar internal, serta gas instrumen. Darah vena dikumpulkan menggunakan tabung pengawet dan antiseptik nonalkohol, lalu ditransportasi dengan pengendalian suhu sebagaimana dijelaskan dalam naskah asli. Sebanyak 0,5 mL aliquot ditempatkan dalam vial headspace, ditambah standar internal dan larutan standar, lalu diproses pada suhu headspace 60 °C selama sepuluh menit sebelum analisis. Sumber penelitian menyebut lima tingkat konsentrasi pada bagian preparasi, tetapi enam tingkat pada rancangan kalibrasi; ketidaksesuaian ini tidak diselesaikan tanpa data kerja asli.

Tabel 1. Rancangan jumlah pengujian validasi

Jenis pengujian	Jumlah
Blank whole blood	3
Blank + internal standard	3
Kalibrasi (6 konsentrasi × 3 replikasi)	18
QC rendah, sedang, dan tinggi (masing-masing 3 replikasi)	9
Uji recovery	9
Uji presisi	6
Uji akurasi	9
Total minimal pengujian	57 analisis

Sumber: rancangan penelitian. Jumlah dapat bertambah bila dilakukan pengulangan untuk optimasi atau evaluasi tambahan.

Analisis menggunakan kolom HP-5ms Ultra Inert (30 m × 0,25 mm × 0,25 µm), helium 1,2 mL/menit, mode split 100:1, ionisasi elektron, dan pemantauan transisi ion yang dicantumkan dalam Tabel 2. Data instrumen dievaluasi untuk kesesuaian sistem, linearitas melalui regresi respons terhadap konsentrasi, presisi menggunakan RSD, akurasi melalui recovery, selektivitas, robustness, serta LOD dan LOQ berdasarkan simpangan baku residual dan kemiringan kurva. Tinjauan hasil bersifat deskriptif dan kuantitatif terhadap parameter validasi; perangkat lunak pengolahan belum disebutkan secara jelas. Perbedaan nama standar internal serta nilai respons kalibrasi yang tidak konsisten antarbagian memerlukan verifikasi dari log instrumen sebelum digunakan sebagai dasar putusan forensik.

Tabel 2. Transisi MRM analit dan standar internal

Analit	Ion prekursor (m/z)	Ion produk (m/z)
Etanol	47,1	31; 27
Metanol	33	31; 29
Propanol (standar internal)	45	27; 29

Sumber: kondisi instrumen penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi dilakukan untuk memastikan metode memberikan hasil yang andal, konsisten, dan sesuai tujuan penggunaan. Parameter yang diuji meliputi kesesuaian sistem, linearitas, presisi, akurasi berdasarkan perolehan kembali, LOD dan LOQ, selektivitas, ripitabilitas, dan robustness.

Uji Kesesuaian Sistem

Uji kesesuaian sistem dilakukan dengan enam kali injeksi blanko darah yang ditambah standar metanol dan etanol, dengan parameter luas area dan waktu retensi (RT) dan kriteria keberterimaan RSD area ≤ 5,0% (Tabel 3). Rata-rata luas area metanol 683 (RSD 2,9%) dan etanol 1.655,8 (RSD 3,1%), keduanya di bawah batas keberterimaan, dan waktu retensi bervariasi sangat kecil (rata-rata 1,4302 menit untuk metanol dan 1,561 menit untuk etanol). Sistem menunjukkan respons analitik yang stabil dan memenuhi kriteria sebelum digunakan untuk analisis sampel.

Nilai RSD yang rendah menunjukkan bahwa injeksi berulang pada tingkat konsentrasi yang diuji memberikan respons area yang relatif seragam. Namun, kesesuaian sistem merupakan pemeriksaan kinerja instrumen sebelum atau selama rangkaian pengujian; hasil ini sendiri tidak membuktikan akurasi di seluruh rentang konsentrasi ataupun untuk setiap jenis spesimen kasus.

Tabel 3. Hasil uji kesesuaian sistem (konsentrasi metanol 631,4 ppm; etanol 632,8 ppm)

Injeksi	Metanol: area	Metanol: RT (menit)	Etanol: area	Etanol: RT (menit)
1	**693**	**1,428**	**1.708**	**1,558**
2	703	1,430	1.592	1,559
3	680	1,430	1.664	1,560
4	651	1,430	1.651	1,562
5	699	1,430	1.714	1,561
6	672	1,431	1.606	1,563
Rata-rata	683	1,4302	1.655,8	1,561
SD	19,5	0,00	50,5	0,00
RSD (%)	2,9	0,03	3,1	0,10

Sumber: data penelitian. Kriteria keberterimaan RSD area ≤ 5,0%.

Linearitas

Linearitas diuji pada lima tingkat konsentrasi metanol (157,9-2.525,8 ppm) dan etanol (158,2-2.531,2 ppm) dengan kriteria $r^2 \geq 0{,}995$. Nilai r^2 kurva standar metanol adalah 0,99823 dan etanol 0,99720 sehingga keduanya memenuhi kriteria (Tabel 4). Nilai yang mendekati 1,000 menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara konsentrasi analit dan respons instrumen pada rentang yang diuji.

Koefisien determinasi yang mendekati satu menunjukkan keteraturan hubungan respons dan konsentrasi pada lima tingkat yang dicantumkan dalam tabel hasil. Meskipun demikian, angka r^2 tidak menunjukkan seluruh aspek ketepatan, khususnya pada konsentrasi rendah. Naskah sumber juga mencantumkan dua nilai area yang berbeda untuk etanol 158,2 ppm, sehingga data mentah dan persamaan kalibrasi perlu diperiksa sebelum hasil linearitas dinyatakan final.

Tabel 4. Data linearitas dan parameter regresi (y = a + bx)

Metanol: konsentrasi (ppm)	Metanol: luas area	Etanol: konsentrasi (ppm)	Etanol: luas area
157,9	106	158,2	228
315,7	270	316,2	511
631,4	599	632,8	1.609
1.262,9	1.451	1.265,6	3.793
2.525,8	3.181	2.531,2	8.214
Slope (b)	1,3105	Slope (b)	3,42
Intersep (a)	-161,41	Intersep (a)	-481,15
r^2	0,99823	r^2	0,99720

Sumber: data penelitian. Area etanol 158,2 ppm mengikuti tabel perhitungan LOD; tabel linearitas naskah asli menulis 288.

Presisi

Presisi diuji dengan enam kali injeksi blanko darah yang di-spike metanol (631,4 ppm) dan etanol (632,8 ppm) oleh dua analis berbeda, dengan kriteria RSD ≤ 2/3 CV Horwitz. RSD metanol adalah 2,862% (analis I) dan 3,589% (analis II), sedangkan etanol 3,050% dan 3,133%, seluruhnya di bawah 2/3 CV Horwitz (4,041% untuk metanol dan 4,040% untuk etanol; Tabel 5). Metode karenanya memberikan hasil yang konsisten antarpengulangan dan antaranalis, hal yang penting dalam laboratorium forensik karena hasil harus tetap konsisten meskipun dikerjakan analis atau waktu berbeda.

Perbandingan antaranalis pada Tabel 5 menunjukkan bahwa RSD pengulangan masing-masing masih berada di bawah nilai dua pertiga CV Horwitz yang dilaporkan. Temuan tersebut mendukung presisi dalam kondisi eksperimen ini, tetapi belum mewakili seluruh variasi antarhari, antar-instrumen, atau antarlaboratorium. Pengendalian mutu perlu dilanjutkan dengan bahan kontrol pada beberapa konsentrasi dan jadwal analisis yang berbeda.

Tabel 5. Hasil uji presisi (area puncak) oleh dua analis

Injeksi	Metanol: analis I	Metanol: analis II	Etanol: analis I	Etanol: analis II
1	**693**	**665**	**1.708**	**2.072**
2	703	688	1.592	2.017
3	680	662	1.664	1.950
4	651	623	1.651	1.965
5	699	640	1.714	1.935
6	672	638	1.606	1.900
RSD (%)	2,862	3,589	3,050	3,133
2/3 CV Horwitz (%)	4,041	4,041	4,040	4,040

Sumber: data penelitian.

Akurasi (Perolehan Kembali)

Akurasi dinilai dari perolehan kembali pada tiga tingkat konsentrasi (rendah, sedang, tinggi) dengan tiga replikasi. Perolehan kembali metanol berkisar 86,09-101,90% (rata-rata 92,58%) dan etanol 96,51-99,77% (rata-rata 98,22%), seluruhnya dalam kriteria 80-120% (Tabel 6). Hal ini menunjukkan preparasi dan analisis tidak menimbulkan kehilangan analit yang berlebihan maupun peningkatan respons yang signifikan.

Rata-rata recovery merupakan ringkasan hasil pada beberapa tingkat konsentrasi dan tidak boleh menutupi variasi pada setiap tingkat. Pada metanol, nilai terkecil sebesar 86,09% terjadi pada rentang uji yang dicatat dalam Tabel 6; pada etanol nilai terkecil sebesar 96,51%. Karena semua hasil yang dilaporkan masih berada di dalam kriteria 80–120%, kinerja akurasi pada tingkat yang diuji dapat dikatakan memenuhi kriteria tersebut, dengan tetap memperhatikan ketidakpastian dan persyaratan penggunaan khusus forensik.

Tabel 6. Hasil perolehan kembali (*recovery*)

Metanol: ppm	Area	Recovery (%)	Etanol: ppm	Area	Recovery (%)
157,9	172	100,73	158,2	413	99,77
157,9	174	101,90	158,2	406	98,08
157,9	170	99,56	158,2	407	98,32
631,4	596	87,26	632,8	1.644	99,29
631,4	588	86,09	632,8	1.626	98,20
631,4	596	87,26	632,8	1.598	96,51
2.525,8	2.459	90,01	2.531,2	6.465	97,61
2.525,8	2.494	91,29	2.531,2	6.514	98,35
2.525,8	2.435	89,13	2.531,2	6.483	97,88
Rata-rata		92,58	Rata-rata		98,22

Sumber: data penelitian. Kriteria keberterimaan 80-120%.

LOD dan LOQ

LOD dan LOQ ditentukan dari data regresi linearitas, yaitu LOD = 3,3 × S(y/x) / b dan LOQ = 10 × S(y/x) / b, dengan S(y/x) simpangan baku residual. Diperoleh LOD 154,7353 ppm dan LOQ 468,8949 ppm untuk metanol, serta LOD 119,6658 ppm dan LOQ 362,6235 ppm untuk etanol (Tabel 7). LOD menunjukkan konsentrasi terendah yang masih terdeteksi dan LOQ konsentrasi terendah yang dapat dikuantifikasi secara andal; keduanya perlu dipertimbangkan kesesuaiannya dengan tujuan penggunaan, terutama untuk sampel yang konsentrasinya di sekitar atau di bawah nilai tersebut.

Batas kuantitasi metanol yang dilaporkan sebesar 468,89 ppm lebih tinggi daripada tingkat kalibrasi terendah sebesar 157,9 ppm. Demikian pula, batas kuantitasi etanol sebesar 362,62 ppm lebih tinggi daripada tingkat kalibrasi terendah 158,2 ppm. Hal ini penting untuk interpretasi: konsentrasi rendah mungkin menghasilkan sinyal terdeteksi, tetapi pengukuran kuantitatifnya memerlukan verifikasi kinerja di sekitar batas kuantitasi yang ditetapkan.

Tabel 7. Perhitungan LOD dan LOQ

Parameter	Metanol	Etanol
Jumlah kuadrat residual $\Sigma(y-yi)^2$	11.328,115	46.076,041
S(y/x)	61,449	123,930
Slope (b)	1,3105	3,42
LOD (ppm)	154,7353	119,6658
LOQ (ppm)	468,8949	362,6235

Sumber: perhitungan dari data regresi linearitas (n = 5; derajat bebas = 3).

Selektivitas dan Ripitabilitas

Blanko darah tidak menghasilkan puncak pada waktu retensi metanol, etanol, maupun isopropanol, sehingga tidak ada interferensi matriks. Standar metanol (RT 1,409 menit), etanol (1,530 menit), dan isopropanol (1,669 menit) terpisah dengan baik, dan pada sampel darah yang ditambah standar, puncak metanol dan etanol terkonfirmasi pada posisi masing-masing (isopropanol sebagai standar internal terdeteksi pada 1,693 menit). Metode memiliki selektivitas yang baik untuk mengidentifikasi metanol dan etanol (Tabel 8). Pada uji ripitabilitas, tiga sampel blanko darah dan tiga blanko darah yang ditambah standar internal 2-propanol seluruhnya menunjukkan luas area dan konsentrasi metanol maupun etanol sebesar 0, sehingga tidak teramati respons yang dapat mengganggu identifikasi pada sampel blanko.

Tidak adanya puncak yang berimpit dengan waktu retensi target pada blanko mendukung selektivitas dalam kondisi laboratorium yang dilaporkan. Namun, matriks darah kasus dapat mengandung senyawa endogen atau zat yang tidak muncul dalam blanko yang digunakan pada tahap pengembangan. Verifikasi identitas melalui transisi ion, rasio ion, dan waktu retensi pada sampel nyata tetap relevan untuk mengurangi risiko salah identifikasi.

Tabel 8. Hasil uji selektivitas

Larutan atau sampel	RT (menit)	Hasil pengamatan	Kesimpulan
Blanko darah	-	Tidak ada puncak pada RT metanol, etanol, dan isopropanol	Tidak ada interferensi
Standar etanol	1,530	Muncul satu puncak etanol	Identitas etanol dapat ditentukan
Standar metanol	1,409	Puncak terpisah dari puncak etanol	Tidak mengganggu etanol
Standar isopropanol	1,669	Puncak terpisah dari puncak etanol	Tidak mengganggu etanol
Sampel darah + standar internal	1,693	Puncak terpisah dari puncak etanol	Tidak mengganggu etanol
Sampel darah + standar metanol dan etanol	-	Puncak terkonfirmasi pada posisi metanol dan etanol	Mendukung identifikasi kedua analit

Sumber: data penelitian.

Robustness

Robustness diuji dengan melihat konsistensi respons area puncak standar metanol dan etanol pada lima hari berbeda, dengan dua kali pengukuran tiap hari (Tabel 9). RSD metanol berkisar 0,2-1,1% dan etanol 0,3-4,6% (hari ke-2 sampai ke-5), seluruhnya di bawah kriteria RSD ≤ 20%, sehingga variasi dua pengukuran pada tiap hari relatif kecil. Namun, area puncak kedua analit menurun dari hari pertama sampai hari keempat (metanol 586 menjadi 445; etanol 1.284 menjadi 901) dan kembali sedikit meningkat pada hari kelima (metanol 470; etanol 892); penurunan respons antarhari ini perlu diperhatikan dalam pemantauan stabilitas sistem.

Pengujian dua respons per hari selama lima hari memberikan informasi awal mengenai variasi harian, tetapi pergeseran area puncak antarmomen pengukuran juga tampak dalam data. Karena itu, penilaian robustness sebaiknya dipisahkan dari stabilitas respons lintas hari. Dokumentasi pengaturan instrumen, penyimpanan standar, dan penggunaan kontrol mutu berkala diperlukan untuk memastikan bahwa perubahan sinyal tidak memengaruhi penafsiran kadar analit.

Tabel 9. Hasil uji robustness (luas area standar)

Hari ke-	Standar	Area metanol	Area etanol
1	1	586	1.284
	2	560	1.143
2	1	510	1.039
	2	518	1.077
3	1	493	1.006
	2	488	1.014
4	1	445	901
	2	446	961
5	1	470	892
	2	476	896
RSD hari ke-2 / 3 / 4 / 5 (%)		1,1 / 0,7 / 0,2 / 0,9	2,5 / 0,6 / 4,6 / 0,3

Sumber: data penelitian. Kriteria keberterimaan RSD ≤ 20%.

Hasil Pemeriksaan Sampel Darah Tahanan

Dari 40 sampel darah tahanan yang diperiksa, seluruhnya (100%) negatif atau tidak terdeteksi etanol maupun metanol pada kondisi analisis yang digunakan, dan tidak ada sampel positif (Tabel 10). Usia subjek berkisar 20-51 tahun (rerata 34,3 tahun). Jumlah sampel aktual (40 orang) lebih sedikit daripada rencana (44 responden), yang dicatat sebagai keterbatasan pelaksanaan.

Tabel 10. Distribusi hasil pemeriksaan sampel darah tahanan

Hasil pemeriksaan	Jumlah sampel	Persentase
Positif alkohol	0	0%
Negatif alkohol	40	100%
Total	40	100%

Sumber: data penelitian.

Hasil negatif menunjukkan etanol dan metanol tidak terdeteksi pada batas kemampuan analitik metode, dan tidak dapat ditafsirkan sebagai bukti bahwa subjek tidak pernah mengonsumsi alkohol. Penilaian toksikologi forensik harus mempertimbangkan waktu konsumsi terakhir, interval pengambilan darah, proses metabolisme dan eliminasi, serta keterbatasan sensitivitas metode. Kriteria inklusi didasarkan pada riwayat konsumsi alkohol dalam asesmen medis, yang tidak menjamin alkohol masih berada di sirkulasi saat darah diambil; ketidaksesuaian antara riwayat dan waktu pengambilan spesimen dapat menjelaskan hasil negatif, meskipun hubungan sebabnya tidak dapat dipastikan tanpa data waktu konsumsi terakhir. Hasil negatif juga harus dibaca bersama LOD (154,7 ppm untuk metanol dan 119,7 ppm untuk etanol): tidak terdeteksi berarti tidak ada sinyal yang memenuhi ketentuan deteksi, bukan konsentrasi nol. Karena itu hasil sampel tahanan tidak dapat menjadi dasar tunggal untuk menilai sensitivitas, spesifisitas, atau akurasi metode, yang tetap dirujuk pada data validasi in vitro; validasi lanjutan atau verifikasi pada spesimen kasus dengan konsentrasi analit yang diketahui dapat melengkapi bukti kinerja metode.

KESIMPULAN

Dalam kondisi pengujian yang dilaporkan, metode HS-GC-MS/MS menunjukkan RSD kesesuaian sistem 2,9% untuk metanol dan 3,1% untuk etanol, dengan r^2 masing-masing 0,99823 dan 0,99720. Rerata recovery ialah 92,58% dan 98,22%; batas deteksi metanol dan etanol sebesar 154,74 ppm dan 119,67 ppm, sementara batas kuantitasinya 468,89 ppm dan 362,62 ppm. Pada 40 sampel darah tahanan, kedua analit tidak terdeteksi pada batas pengukuran yang digunakan. Hasil ini mendukung potensi penerapan metode, tetapi belum dapat diperlakukan sebagai pembuktian bahwa subjek tidak memiliki riwayat konsumsi alkohol.

Sebelum penggunaan rutin, laboratorium perlu merekonsiliasi jumlah titik kalibrasi, identitas standar internal, dan perbedaan angka respons pada tabel, lalu mendokumentasikan verifikasi dengan bahan acuan tertelusur serta sampel kasus yang relevan. Penelitian selanjutnya juga perlu melaporkan prosedur persetujuan etik, perlindungan identitas subjek, waktu sejak konsumsi terakhir, dan evaluasi akurasi di sekitar batas kuantitasi. Penerapan forensik harus mengikuti bukti validasi yang telah dikonfirmasi, bukan hanya kesimpulan umum dari pengujian awal.

PENDANAAN

Penelitian ini didanai melalui hibah dari pemerintah. Para penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan pendanaan tersebut.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini. Para penulis juga tidak memiliki hubungan komersial maupun finansial dengan pihak mana pun yang berpotensi memengaruhi pelaksanaan penelitian, analisis hasil, maupun penyajian temuan dalam naskah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Seluruh penulis berkontribusi secara seimbang dalam pengembangan gagasan, pelaksanaan analisis, serta penyusunan dan penyempurnaan naskah.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Dalam penyusunan naskah ini, para penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) secara terbatas, yaitu hanya untuk membantu perbaikan tata bahasa dan pemeriksaan ketepatan penggunaan bahasa. Seluruh gagasan, analisis, dan substansi naskah sepenuhnya merupakan hasil pemikiran dan tanggung jawab para penulis.

REFERENSI

Bell, Suzanne. (2006) Forensic Chemistry. New Jersey: Pearson, 2006.

Biswas, Gautam. (2012) Review of Forensic Medicine and Toxicology. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers, 2012.

Currier, G. W., Trenton, A. J., & Walsh, P. G. (2006) "Relative Accuracy of Breath and Serum Alcohol Readings in the Psychiatric Emergency Service." Psychiatric Services, vol. 57, no. 1, 2006, hlm. 34–36.

Dean, R. A., Thomasson, H. R., Dumaual, N., Amann, D., & Li, T. K. (1996) "Simultaneous Measurement of Ethanol and Ethyl-d5 Alcohol by Stable Isotope Gas Chromatography-Mass Spectrometry." Clinical Chemistry, vol. 42, no. 3, 1996, hlm. 367–342.

Dubowski, Kurt (1974). "Absorption, Distribution and Elimination of Alcohol." Journal of Studies on Alcohol 35, no. 1 (1974): 98–108.

Fokunang, Treston, et al. (2018) "Forensic Toxicology and Its Relevance." Journal of Forensic Research 9, no. 2 (2018): 1–5.

Helander, A., & Beck, O. (2004) "Mass Spectrometric Identification of Ethyl Sulfate as an Ethanol Metabolite in Humans." Clinical Chemistry, vol. 50, no. 5, 2004, hlm. 936–937.

ICH. (2005) Validation of Analytical Procedures Q2(R1). Geneva: International Conference on Harmonisation, 2005.

Jones, A. W. (2000) "Medicolegal Alcohol Determinations—Breath- or Blood-Alcohol Concentrations?" Forensic Science Review, vol. 12, no. 1, 2000, hlm. 23–47.

Jones, Alan Wayne. "Measuring Alcohol in Blood and Breath." Forensic Science Review 14, no. 2 (2002): 91–103.

Kolb, Bruno, dan Leslie Ettre. (2006) Static Headspace-Gas Chromatography. New Jersey: Wiley, 2006.

Levine, Barry. Principles of Forensic Toxicology. Washington DC: AACC Press, 2010.

Maeda, H., Zhu, B. L., Ishikawa, T., et al. (2006) "Evaluation of Postmortem Ethanol Concentrations in Pericardial Fluid and Bone Marrow Aspirate." Forensic Science International, vol. 161, no. 2–3, 2006, hlm. 141–143.

McMahon, Mary H. (2011) Alcohol and Health. New York: Springer, 2011.

McNair, Harold, dan James Miller. (2009) Basic Gas Chromatography. New Jersey: Wiley, 2009.

Meyers, Robert. (2000) Encyclopedia of Analytical Chemistry. Chichester: Wiley, 2000.

Navianti, D., Tarmizi, M. I., & Holifah, S. N. (2018) "The Presence of Methanol in Alcoholic Beverages Analyzed Using Qualitative Method." Jurnal Teknologi Laboratorium, vol. 7, no. 2, 2018, hlm. 46–52.

Puji Lestari, T. R. (2019). Menyoal Pengaturan Konsumsi Minuman Beralkohol di Indonesia. Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial, 7(2), 127–141. https://doi.org/10.46807/aspirasi.v7i2.1285

Pribadi, S. M.A., Wilayah, D.I (2020). Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Perilaku Remaja Terhadap Konsumsi Alkohol Pada Siswa SMA Negeri Di Wilayah Kecamatan Boja. Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal), 8(1), 1-8.

Rasyid, N. Q., Muawanah, & Suardi. (2021). Metode Sederhana untuk Mendeteksi Keracunan Alkohol dalam Saliva. Jurnal Madia Analisis Kesehatan, 12(2), 86–93. https://doi.org/10.32382/mak.v12i2.2395

Saferstein, Richard. (2015) Criminalistics: An Introduction to Forensic Science. New Jersey: Pearson Education, 2015.

Skoog, Douglas A., et al. (2017) Principles of Instrumental Analysis. Boston: Cengage Learning, 2017.

Solina, Arisdiani, T., (2018). Hubungan Peran Orang Tua Dengan Perilaku Konsumsi Minuman Alkohol Pada Remaja Laki-Laki the Relation Between the Parents 'Role and Male Adolescents' Alcohol Consumption Behavior. Jurnal Keperawatan, 6(1), 36.

United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC)., (2009) Guidance for the Validation of Analytical Methodology. New York: United Nations, 2009.

Wasfi, I. A., Al-Awadhi, A. H., Al-Hatali, Z. N., Al-Rayami, F. J., & Al Katheeri, N. A., (2004) "Rapid and Sensitive Static Headspace Gas Chromatography–Mass Spectrometry Method for the Analysis of Ethanol and Abused Inhalants in Blood." Journal of Chromatography B, vol. 799, 2004, hlm. 331–336.

Winek CL, Carfagna M. (1987) Comparison of plasma, serum, and whole blood ethanol concentrations. J Anal Toxicol 1987;11:

Winek, C. L., & Carfagna, M. "Comparison of Plasma, Serum, and Whole Blood Ethanol Concentrations." Journal of Analytical Toxicology, vol. 11, 1987, hlm. 267–268.

World Health Organization. (2014) Global Status Report on Alcohol and Health. Geneva: WHO Press, 2014.

Xiao, H., He, L., Tong, R., Yu, J., Chen, L., Zou, J., Li, J., Bian, Y., & Zhang, Y., (2014) "Rapid and Sensitive Headspace Gas Chromatography–Mass Spectrometry Method for the Analysis of Ethanol in the Whole Blood." Journal of Clinical Laboratory Analysis, 2014.