

UJI KUALITATIF DAN KUANTITATIF DALAM IDENTIFIKASI ALKOHOL PADA KASUS TOKSIKOLOGI FORENSIK: SEBUAH TINJAUAN SISTEMATIS

Dimas Maulana Agustian*, Suhartini

Departemen Ilmu Kedokteran Forensik dan Medikolegal Fakultas Kedokteran, Kesehatan Masyarakat, dan Keperawatan Universitas Gadjah Mada Yogyakarta / RSUP Dr. Sardjito Yogyakarta

*Corresponding author: Telp: +6281233717277, email: dimasmaulanaagustian@gmail.com

ABSTRAK

Identifikasi etanol dalam toksikologi forensik memegang peranan penting dalam penegakan hukum, terutama dalam kasus kecelakaan lalu lintas, kematian mendadak, atau dugaan keracunan. Dua metode utama yang banyak digunakan dalam konteks ini adalah Conway Microdiffusion sebagai uji kualitatif, serta Gas Chromatography-Flame Ionization Detection (GC-FID) dan varian headspace-nya (HS-GC-FID) sebagai metode kuantitatif. Tinjauan ini disusun secara sistematis berdasarkan literatur dari basis data PubMed, Scopus, dan sumber lainnya, dengan kriteria inklusi mencakup studi observasional atau eksperimental yang mengevaluasi uji etanol secara laboratorium pada spesimen biologis manusia. Tujuh studi yang relevan dianalisis berdasarkan desain, metode analitik, dan konteks forensik. Hasil menunjukkan bahwa metode Conway dan Toxi-Lab Microdiffusion efektif digunakan sebagai uji skrining awal yang hemat biaya dan cepat, meskipun bersifat semi-kuantitatif dan tidak sah sebagai bukti tunggal di pengadilan. Sebaliknya, metode GC-FID dan HS-GC-FID terbukti akurat dan presisi tinggi, dengan rentang konsentrasi deteksi luas, sensitivitas tinggi (LOD hingga 0.006 g/L), serta valid untuk pembuktian hukum. *Dual-column confirmation* dan penggunaan standar internal turut memperkuat akurasi dan keabsahan hasil. Metode kualitatif dan kuantitatif saling melengkapi dalam praktik toksikologi forensik modern. Pemilihan metode sangat bergantung pada konteks kasus, sumber daya laboratorium, dan kebutuhan pembuktian hukum. Validasi teknis dan keterpaduan regulasi menjadi kunci keberhasilan implementasi di berbagai yurisdiksi.

Kata Kunci: *GC-FID, HS-GC-FID, identifikasi alkohol, identifikasi etanol, kromatografi gas, mikrodifusi Conway, mikrodifusi Toxi-Lab*

ABSTRACT

The identification of ethanol in forensic toxicology plays a crucial role in law enforcement, particularly in cases involving traffic accidents, sudden deaths, or suspected poisoning. Two primary types of methods are widely used in this context: Conway Microdiffusion, as a qualitative test, and Gas Chromatography-Flame Ionization Detection (GC-FID) along with its headspace variant (HS-GC-FID), as quantitative methods. This review was systematically compiled based on literature from the PubMed, Scopus, and other databases, with inclusion criteria encompassing observational or experimental studies that evaluated laboratory-based ethanol testing in human biological specimens. Seven relevant studies were analysed according to their study design, analytical methods, and forensic context. The results indicate that the Conway and Toxi-Lab Microdiffusion methods are effective as cost-efficient and rapid initial screening tests, although they are semi-quantitative in nature and not legally admissible as sole evidence in court. In contrast,

GC-FID and HS-GC-FID methods have demonstrated high accuracy and precision, with a wide detection concentration range, high sensitivity (limit of detection as low as 0.006 g/L), and are legally valid for forensic confirmation purposes. The use of dual-column confirmation and internal standards further enhances the accuracy and validity of the results. Qualitative and quantitative methods are complementary in modern forensic toxicology practice. The selection of methods depends heavily on the case context, laboratory resources, and legal evidentiary requirements. Technical validation and harmonization of regulations are key to successful implementation across different jurisdictions.

Keywords: *alcohol identification, Conway microdiffusion, ethanol identification, Gas chromatography, GC-FID, HS-GC-FID, Toxi-Lab microdiffusion*

PENDAHULUAN

Identifikasi etanol dalam kasus-kasus toksikologi forensik berperan krusial dalam proses penyidikan kasus kecelakaan lalu lintas, kematian mendadak, atau dugaan keracunan. Informasi mengenai keberadaan dan kadar etanol dalam spesimen biologis seperti darah, urin, atau humor vitreus kerap menjadi dasar ilmiah untuk menentukan penyebab, waktu, atau kontribusi alkohol terhadap kematian atau kecelakaan¹.

Dalam praktik forensik, dua metode yang lazim digunakan adalah Conway Microdiffusion dan Gas Chromatography–Flame Ionization Detector (GC-FID). Conway Microdiffusion merupakan metode kualitatif serta semi-kuantitatif yang memanfaatkan reaksi redoks antara etanol dan larutan kalium dikromat dalam lingkungan tertutup. Metode ini menghasilkan perubahan warna sebagai indikator keberadaan alkohol. Adapun metode ini banyak digunakan di laboratorium forensik dengan keterbatasan sumber daya karena biayanya yang rendah dan pelaksanaannya yang sederhana².

Sementara itu, GC-FID merupakan metode kuantitatif berbasis pemisahan senyawa volatil dengan sensitivitas dan spesifisitas tinggi. GC-FID memungkinkan penentuan kadar etanol yang presisi, valid untuk keperluan hukum, serta dapat membedakan antara etanol yang berasal dari

konsumsi antemortem dengan etanol endogen yang terbentuk akibat dekomposisi postmortem^{2,3}.

Kedua metode ini saling melengkapi dalam praktik toksikologi forensik modern. Untuk itu, tinjauan sistematis ini bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan membandingkan studi-studi yang melaporkan penggunaan uji kualitatif dan kuantitatif dalam deteksi etanol pada kasus toksikologi forensik, terutama yang menggunakan metode Conway Microdiffusion dan/atau kromatografi gas.

METODE

Penelitian ini merupakan tinjauan pustaka dengan desain deskriptif. Metode deskriptif dilakukan dengan memaparkan hasil pencarian literatur terkait studi primer yang melibatkan pemeriksaan etanol secara kualitatif dan/atau kuantitatif dalam konteks toksikologi forensik. Data literatur akan dikumpulkan dari pencarian literatur sistematis yang sesuai dengan kriteria inklusi dan eksklusi.

Kriteria Inklusi

- Studi observasional, eksperimental, atau laporan kasus dengan konteks toksikologi forensik
- Fokus pada deteksi etanol dalam spesimen biologis manusia (darah, urin, humor vitreus, dll.)
- Menggunakan metode pemeriksaan kualitatif dan/atau kuantitatif

- Menyajikan hasil berupa keberadaan alkohol (positif/negatif) dan/atau kadar alkohol (angka)
- Artikel tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia dan memiliki teks lengkap

- Fokus utama pada zat toksik lain tanpa data etanol
- Artikel editorial, komentar, atau opini tanpa data primer

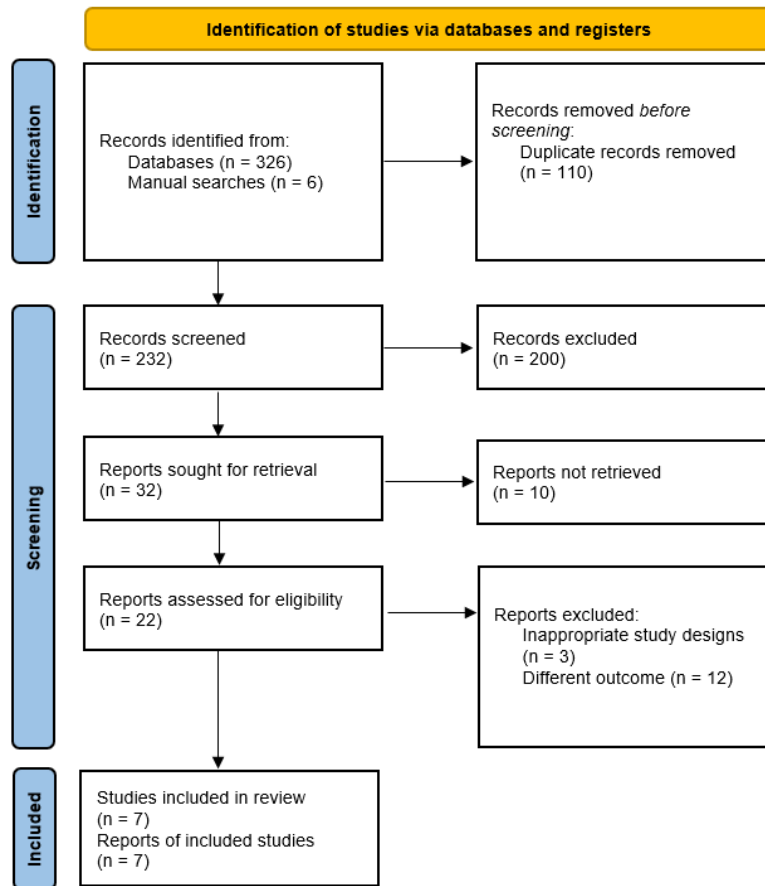
Metode pencarian literatur dilakukan di berbagai database ilmiah, termasuk Pubmed, Scopus, Google Scholar, dan pencarian mandiri yang relevan. Pencarian data dilakukan dengan kata kunci (*keyword*) termasuk “identifikasi etanol”, “kuantitatif”, “kualitatif”, “metode Conway”, “kromatografi gas”, dan “toksikologi forensik” beserta sinonim dan istilah terkait.

Kriteria Eksklusi

- Studi yang tidak dilakukan dalam konteks toksikologi forensik
- Tidak menggunakan spesimen biologis manusia
- Tidak melibatkan uji laboratorium terhadap etanol

Tabel 1. Strategi penelusuran studi

Database	Keywords	Hits
Pubmed	("ethanol"[MeSH Terms] OR "blood alcohol concentration" OR "ethanol detection" OR "alcohol testing") AND ("Conway diffusion" OR "microdiffusion" OR "colorimetric alcohol test" OR "semi-quantitative ethanol") OR ("gas chromatography"[MeSH Terms] OR "GC-FID" OR "GC-MS") AND ("forensic toxicology"[MeSH Terms] OR "forensic investigation" OR "postmortem analysis")	31
Scopus	TITLE-ABS-KEY (ethanol AND (detection OR quantification) AND ("Conway" OR "microdiffusion" OR "colorimetric test") OR ("gas chromatography" OR "GC-FID" OR "GC-MS") AND (forensic OR "postmortem" OR "toxicology"))	295



Gambar 1. Bagan PRISMA 2020

HASIL

Tinjauan ini mengidentifikasi tujuh studi yang memenuhi kriteria inklusi dan relevan dengan tujuan sistematis, yaitu mengevaluasi metode identifikasi dan kuantifikasi etanol dalam konteks toksikologi forensik. Studi-studi ini berasal dari berbagai negara, termasuk Indonesia, India, Inggris, Amerika Serikat, Romania, dan Serbia, dengan desain penelitian yang bervariasi seperti eksperimen terapan maupun validasi metode laboratorium.

Tabel 2 menyajikan karakteristik umum dari studi-studi tersebut, meliputi desain studi, negara asal, jenis spesimen biologis yang digunakan, metode analisis baik kualitatif maupun kuantitatif, serta konteks atau tujuan forensik dari masing-masing penelitian. Tabel ini memberikan gambaran tentang cakupan metodologis dan kontribusi tiap studi terhadap pengembangan atau penerapan teknik analisis etanol.

Tabel 2. Karakteristik Studi

No	Peneliti, tahun	Desain studi	Negara studi	Spesimen biologis	Metode kualitatif	Metode kuantitatif	Tujuan Forensik
1	Cox dkk., 1990 ⁴	Eksperimental	Amerika Serikat	Darah, urin	Toxi-Lab Micro-diffusion	GC-FID	Evaluasi skrining etanol dalam darah dan urin menggunakan <i>microdiffusion</i> dan konfirmasi menggunakan GC-FID
2	Dorubet dkk., 2011 ⁵	Validasi metode	Romania	Darah	Tidak dilakukan	HS-GC-FID	Validasi metode cepat dan akurat untuk kuantifikasi etanol dalam konteks laboratorium forensik dan pengadilan
3	Kostić dkk., 2021 ⁶	Validasi metode	Serbia	Darah, urin, vitreous humor	Tidak dilakukan	HS-GC-FID	Validasi metode HS-GC-FID untuk analisis etanol dalam kasus klinis, forensik, dan produk non-biologis (herbal, kosmetik).
4	Mubarokah dkk., 2024 ²	Eksperimental	Indonesia	Darah, urin	Conway Micro-diffusion	GC-FID	Identifikasi kadar etanol pada pengemudi lakalantas untuk kepentingan pembuktian hukum
5	Sudhaker dkk., 2016 ⁷	Validasi metode	India	Darah, urin	Dichromate color test, Iodoform	HS-GC-FID	Validasi metode HS-GC-FID dengan standar internal propanol untuk kuantifikasi etanol

							test
6	Taylor dkk., 2020 ⁸	Eksperimental	Inggris	Darah vena, darah kapiler	Tidak dilakukan	HS-GC-FID	Evaluasi kesetaraan kadar alkohol antara darah kapiler dan vena serta kelayakan mikrosampling
7	Taylor dkk., 2022 ⁹	Validasi metode	Inggris	Darah	Tidak dilakukan	HS-GC-FID (<i>dual-column gas-tight syringe method</i>)	Validasi metode GC-FID untuk analisis etanol dalam kasus lalu lintas di Inggris

Masing-masing studi dianalisis lebih lanjut berdasarkan parameter analitik yang dilaporkan. Tabel 3 menyajikan evaluasi mendalam terhadap performa metodologi uji etanol yang digunakan, baik kualitatif maupun kuantitatif, termasuk sensitivitas (LOD/LOQ), akurasi, kelebihan operasional, dan keterbatasan forensiknya.

Tabel 3. Evaluasi Metodologi Uji Etanol

No	Metode	Peneliti, tahun	Tipe Uji	Bahan	Ruang Konsentrasi	LOD/LOQ	Akurasi	Kelebihan Operasional	Batasan forensik
1	Conway Microdiffusion	Mubarokah dkk, 2024	Kualitatif	Darah, urin	N/A (indikasi visual warna)	Estimasi LOD 0,01% BAC	Tidak dilaporkan	Murah, cepat, cocok untuk skrining awal; tidak butuh alat mahal	Semi-kuantitatif, tidak valid sebagai bukti tunggal di pengadilan
2	Toxi-Lab Microdiffusion	Cox dkk., 1990	Kualitatif/Semi kuantitatif	Darah, Urin	0.01–0.30% w/v (indikasi visual + spot diameter)	LOD: 0.01% w/v	Korelasi baik dengan GC; tidak ada beda ($p < 0.05$)	Cepat, cocok untuk <i>batch</i> besar, eliminasi sampel negatif	Subjektif; perlu konfirmasi GC; rentan terhadap alkohol lain
3	GC-FID	Mubarokah dkk., 2024	Kuantitatif	Urin	Etanol 0,0352%	Tidak dilaporkan; hasil mendeteksi 0,0352%	Tidak dilapor	Spesifik, kuantitatif, valid untuk analisis laboratorium terstandar	Butuh peralatan dan pelatihan khusus

4	GC-FID	Cox dkk., 1990	Kuantitati f	Darah, Urin	0.008–0.347% w/v	Tidak dilaporkan eksplisit; deteksi hingga T0.008%	Digunaka n sebagai <i>gold standard</i> ; referensi NBS SRM 1828	Kuantitatif, akurat, terstandar	Butuh alat keahlian teknis; kurang efisien untuk skrining awal
5	GC-FID	Taylor et al., 2020	Kuantitati f	Darah vena dan kapiler	~7–75 mg/100 mL	Tidak disebutkan	R ² > 0.999; CV 2.54– 3.76% pada volume 10–100 µL	Bisa digunakan pada 10 µL; relevan untuk kapiler dan skrining cepat	Konsentrasi kapiler lebih rendah; belum diakui sebagai pengganti konsentrasi kadar alkohol pada darah vena (<i>venous BAC</i>)
6	HS-GC- FID	Sudhaker et al., (2016)	Kuantitati f	Darah, urin	0.02–0.20 mg%	LOD dan LOQ dihitung pada rasio sinyal:noise 3:1 dan 10:1	R ² = 0.998– 0.999; %RSD 1.71– 6.57%; recovery 81–94%	Sensitif, otomatis, <i>matrix effect</i> dikurangi dengan standar internal propanol	Butuh destilasi dan peralatan khusus; validasi tambahan diperlukan untuk <i>breath analysis</i>
7	HS-GC- FID	Kostic et al., 2021	Kuantitati f	Darah, urin, vitreous humor	0.15–4.00 g/dm ³	LOD: 0.006 g/dm ³ ; LOQ: 0.020 g/dm ³	R ² = 0.999; Bias < ±10%; CV intra-day: 0.57%; inter-day: 0.03– 0.32%; recovery 99.12– 105.77%	ISO 17025:2017; presisi tinggi; mampu deteksi etanol dan metanol	Butuh peralatan khusus dan tenaga terampil; tidak cocok untuk skrining cepat

8	HS-GC-FID	Taylor et al., 2022	Kuantitatif	Darah	10–400 mg/100 mL	LOD: ~5 mg/100 mL; LOQ: 10 mg/100 mL	R ² = 0.99985–0.99990; CV 0.009–0.014%; akurasi ±0.00048–0.00116%; ; expanded uncertainty 1.95–5.31%	Dual column/detect or; waktu analisis cepat (<5 menit); sesuai standar UK & California	Hanya diuji pada darah; belum dibandingkan langsung dengan sistem <i>pressure-balance</i> ; butuh ketelitian pipet mikro
9	HS-GC-FID	Dorubet et al., 2011	Kuantitatif	Darah	0,25-4.0 g/L	LOD: 0.067–0.072 g/L LOQ: 0.223–0.240 g/L	Recovery 98.57–103.12%; RSD ≤ 3.5%	Waktu analisis cepat (6 menit), tidak perlu proses sampel rumit	Terpengaruh homogenitas matriks darah; RSD naik bila darah tidak homogen

PEMBAHASAN

Tinjauan ini mencakup total tujuh studi yang secara umum dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori utama: studi eksperimental dan studi validasi metode. Studi eksperimental, seperti yang dilakukan oleh Taylor dkk. (2020) dan Mubarokah dkk. (2024), berfokus pada pengujian efektivitas metode dalam konteks aplikatif seperti pemeriksaan kadar etanol pada pengemudi kecelakaan lalu lintas atau perbandingan darah vena dan kapiler. Lima studi lainnya berorientasi pada validasi metode laboratorium, dengan fokus terhadap evaluasi akurasi, presisi, batas deteksi, dan kesesuaian prosedur analitik untuk penggunaan rutin dalam toksikologi forensik.

Secara geografis, studi-studi tersebut mencerminkan representasi yang cukup luas, mencakup wilayah Asia (Indonesia, India), Eropa (Serbia, Rumania, Inggris), dan Amerika Utara (Amerika Serikat). Variasi ini menunjukkan keberagaman dalam pendekatan teknis maupun kebijakan yang diterapkan dalam pemeriksaan toksikologi forensik lintas negara. Misalnya, standar yang digunakan di Inggris secara eksplisit mengikuti parameter ketat dari Code of Regulations California dan pedoman UKIAFT, sedangkan pendekatan di India dan Indonesia lebih adaptif terhadap ketersediaan teknologi laboratorium lokal.

Konteks forensik yang melandasi studi-studi ini juga cukup beragam. Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh Mubarokah dkk. (2024) dan Cox dkk. (1990), secara langsung berkaitan dengan pemeriksaan etanol pada pengemudi kecelakaan lalu lintas untuk keperluan pembuktian hukum. Studi lainnya, seperti Dorubet dkk. (2011) dan Kostić dkk. (2021), lebih berorientasi pada penguatan kapasitas laboratorium melalui validasi metode yang cepat, akurat, dan sesuai dengan standar internasional. Sementara itu, studi oleh Taylor dkk. (2020; 2022) menyoroti tantangan dan potensi penggunaan metode mikrovolum serta kapiler dalam konstelasi hukum lalu lintas modern di Inggris, menggambarkan tren menuju

efisiensi dan minimalisasi intervensi invasif dalam pengambilan sampel. Adapun keragaman desain studi, lokasi geografis, dan konteks penggunaannya menegaskan bahwa pengujian etanol dalam toksikologi forensik tidak hanya membutuhkan validitas ilmiah, tetapi juga adaptabilitas terhadap kebutuhan hukum dan logistik masing-masing yurisdiksi.

Tinjauan ini mengidentifikasi dua pendekatan utama yang digunakan dalam identifikasi kualitatif etanol, yaitu Conway Microdiffusion dan Toxi-Lab Microdiffusion Test, yang masing-masing diterapkan dalam studi Mubarokah et al. (2024) dan Cox et al. (1990). Metode ini dirancang untuk memberikan hasil cepat dan hemat biaya, terutama di lingkungan dengan keterbatasan sumber daya atau laboratorium tanpa akses terhadap kromatografi gas^{2,4}.

Kedua metode ini memanfaatkan sifat volatil dan reduktif etanol terhadap larutan dikromat dalam lingkungan tertutup. Dalam metode Conway, etanol dalam sampel biologis (darah/urin) berdifusi melalui celah udara menuju ruang reagen yang berisi larutan kalium dikromat dalam asam sulfat, mereduksi ion dikromat oranye ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) menjadi ion kromium hijau (Cr^{3+}), yang ditandai dengan perubahan warna.[2] Metode Toxi-Lab mengkomersialisasi prinsip yang sama dengan sel reagen siap pakai dan interpretasi hasil berdasarkan tabel warna hijau⁴.

Metode Conway dan Toxi-Lab Microdiffusion memiliki prosedur pelaksanaan yang relatif sederhana dan tidak memerlukan instrumen kompleks. Dalam prosedur Conway, sekitar 0,2–0,5 mL darah atau urin diteteskan ke dalam ruang luar sel Conway, sementara ruang dalam diisi dengan larutan kalium dikromat dalam asam sulfat. Sel kemudian disegel dan diinkubasi selama 1 hingga 2 jam pada suhu kamar ($\pm 25^\circ\text{C}$), dan perubahan warna dari oranye menjadi hijau digunakan sebagai indikator keberadaan etanol. Sementara itu, metode Toxi-Lab menawarkan prosedur yang lebih terstandar dan efisien, karena menggunakan sel siap

pakai dan reagen pre-measured. Hanya 100 μ L sampel biologis diperlukan, dan waktu inkubasi cukup 30–60 menit. Intensitas warna hijau kemudian dibandingkan dengan skala warna referensi untuk mengestimasi kadar alkohol secara semi-kuantitatif^{2,4}.

Keunggulan utama dari metode microdiffusion terletak pada efisiensi biaya, kecepatan, dan kemudahan penggunaan. Keduanya sangat sesuai untuk skrining awal dalam kasus-kasus lalu lintas atau situasi darurat yang memerlukan keputusan cepat. Di samping itu, metode ini tidak menuntut pelatihan teknis lanjutan dan dapat diaplikasikan di laboratorium dengan sumber daya terbatas, termasuk fasilitas lapangan atau daerah terpencil yang tidak memiliki akses ke instrumen seperti GC-FID.

Meskipun praktis, metode ini memiliki sejumlah keterbatasan penting, terutama dalam konteks keabsahan forensik. Sensitivitasnya terbatas pada kisaran 0,01% BAC, dengan potensi gagal mendeteksi kadar etanol yang sangat rendah (di bawah 0,008%). Selain itu, zat-zat lain seperti metanol, aseton, isopropanol, atau formaldehida pada sampel postmortem dapat menimbulkan hasil positif palsu karena juga mampu mereduksi dikromat. Sifat semi-kuantitatif dari interpretasi warna juga menimbulkan keragaman hasil antar-analisis, yang dalam beberapa studi dilaporkan menyimpang hingga 15% dibandingkan hasil GC-FID. Oleh karena itu, hasil dari metode microdiffusion tidak memiliki kekuatan pembuktian yang cukup kuat untuk berdiri sendiri di pengadilan, dan umumnya harus disertai konfirmasi dengan metode kuantitatif yang terstandar seperti GC-FID.

Agar hasil pengujian lebih akurat, sejumlah aspek teknis perlu diperhatikan. Suhu inkubasi harus dijaga stabil pada $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ karena fluktuasi suhu dapat mempengaruhi laju difusi etanol dan reaktivitas reagen. Selain itu, integritas sampel juga krusial—darah yang mengalami hemolisis atau pembusukan dapat menghasilkan reduktan tambahan yang

mengganggu interpretasi warna. Dalam praktik laboratorium, larutan kalium dikromat dalam asam sulfat sebaiknya disiapkan secara berkala karena kestabilannya menurun dalam waktu singkat, meskipun versi komersial seperti Toxi-Lab telah distabilisasi untuk penggunaan hingga enam bulan. Sebagai langkah verifikasi, laboratorium sebaiknya melakukan pengujian silang pada sebagian sampel (minimal 10%) dengan GC sebagai bagian dari jaminan mutu, sebagaimana dianjurkan dalam kerangka ISO 17025⁴.

Analisis kuantitatif etanol dalam toksikologi forensik membutuhkan pendekatan metodologis yang tidak hanya presisi dan akurat, tetapi juga sah secara hukum dan dapat diterapkan pada berbagai jenis spesimen biologis yang kompleks. Dua metode yang paling luas digunakan dan diterima secara internasional adalah *Gas Chromatography* dengan *Flame Ionization Detection* (GC-FID) serta varian *headspace*-nya, HS-GC-FID. Keduanya telah menjadi pilar utama dalam penentuan konsentrasi alkohol dalam darah (Blood Alcohol Concentration/BAC), baik dalam konteks investigasi lalu lintas, pemeriksaan postmortem, maupun validasi laboratorium rutin.

Secara prinsip, GC-FID bekerja dengan memisahkan etanol dari matriks biologis melalui perbedaan interaksi dengan fase diam dan fase gerak, lalu mendeteksinya berdasarkan sinyal ionisasi yang dihasilkan dalam nyala api. Sementara itu, metode HS-GC-FID menawarkan keuntungan tambahan dengan menguapkan etanol secara selektif dari sampel tertutup yang dipanaskan, sehingga hanya senyawa volatil seperti etanol yang masuk ke sistem kromatografi, meminimalkan gangguan dari protein atau lipid dalam darah atau urin³.

Berdasarkan temuan hasil studi yang dikaji, sebagian besar metode kuantitatif dalam tinjauan ini memanfaatkan GC-FID dan HS-GC-FID dengan berbagai konfigurasi teknis. Studi oleh Sudhaker dkk. (2016), Kostić dkk. (2021), Taylor dkk. (2020, 2022),

dan Dorubet dkk. (2011) menampilkan penggunaan kolom DB-ALC1 dan DB-ALC2, baik dalam sistem satu kolom maupun dua kolom, serta variasi pemanasan pada *headspace* antara 60–80°C selama 5–7 menit. Parameter-parameter ini disesuaikan untuk mengoptimalkan pelepasan etanol ke dalam ruang uap dan memastikan kesesuaian waktu retensi dengan standar referensi.

Kinerja analitik metode-metode ini menunjukkan konsistensi yang tinggi. Hampir seluruh studi melaporkan *linearity* yang sangat baik (koefisien determinasi $R^2 > 0.999$) dalam rentang kalibrasi yang bervariasi antara 0.02–4.0 g/L. Batas deteksi (LOD) yang dicapai berkisar antara 0.006 hingga 0.072 g/L, dengan batas kuantifikasi (LOQ) mulai dari 0.01% BAC atau 10 mg/100 mL, tergantung pada jenis kolom dan konfigurasi sistem. Dalam konteks presisi dan akurasi, nilai koefisien variasi (CV) umumnya dilaporkan berada di bawah 3.5%, dengan tingkat *recovery* yang mengesankan, mencapai lebih dari 99% dalam beberapa studi validasi seperti yang dilakukan oleh Kostić dan Dorubet^{5,6}.

Keunggulan operasional GC-FID dan HS-GC-FID tidak hanya terletak pada sensitivitasnya yang tinggi, tetapi juga pada kemampuannya untuk mengidentifikasi dan mengatasi potensi interferensi. Penggunaan dua kolom dengan polaritas berbeda memungkinkan pemisahan etanol dari senyawa serupa seperti aseton atau isofluran yang dapat muncul pada pasien pasca-operasi. Di sisi lain, penggunaan standar internal seperti n-propanol juga menjadi praktik umum untuk meningkatkan reliabilitas kuantifikasi⁷.

Dalam praktik forensik, metode ini telah terbukti efektif untuk berbagai jenis spesimen, mulai dari darah vena dan kapiler, urin, hingga vitreous humor pada kasus postmortem. Sebagai contoh, Taylor dkk. (2020) mengevaluasi kesetaraan konsentrasi etanol antara darah vena dan darah kapiler menggunakan HS-GC-FID, dan hasilnya mendukung penerapan *microsampling* dalam

konteks skrining cepat. Studi lain oleh Taylor dkk. (2022) menyempurnakan sistem injeksi melalui *gas-tight syringe* yang memungkinkan akurasi tinggi meskipun hanya menggunakan 100 µL darah, serta menunjukkan ketepatan waktu analisis kurang dari lima menit per sampel^{8,9}.

Walaupun demikian, tantangan teknis tetap ada. Risiko *carryover* diatasi melalui purging jarum dengan nitrogen dan pembakaran kolom suhu tinggi antar analisis. Homogenitas sampel juga menjadi perhatian penting, terutama dalam darah postmortem yang telah mengalami koagulasi atau pembusukan. Dalam konteks regulasi, metode ini telah disesuaikan dengan standar ISO 17025, dan pelaporan hasil harus menyertakan ketidakpastian pengukuran (biasanya $\pm 0.005\%$ BAC), serta dokumentasi lengkap dari proses pengambilan sampel hingga interpretasi laboratorium.

Secara keseluruhan, integrasi GC-FID dan HS-GC-FID ke dalam kerangka kerja toksikologi forensik memberikan jaminan kualitas, ketepatan ilmiah, dan validitas hukum yang sangat dibutuhkan dalam penegakan hukum berbasis bukti. Inovasi seperti penggunaan volume sampel kecil, sistem kolom ganda, dan otomatisasi injeksi menjadikan metode ini semakin adaptif terhadap kebutuhan masa kini. Dengan berkembangnya teknologi GC portabel, kombinasi akurasi laboratorium dan fleksibilitas lapangan akan memperkuat posisi GC-FID dan HS-GC-FID sebagai metode utama dalam analisis etanol forensik.

KESIMPULAN

Tinjauan ini menunjukkan bahwa pendekatan kombinasif antara metode kualitatif seperti Conway Microdiffusion dan metode kuantitatif berbasis GC-FID atau HS-GC-FID memberikan spektrum solusi yang luas dalam praktik toksikologi forensik. Uji microdiffusion unggul dalam konteks lapangan atau skrining cepat, sementara GC-FID dan variannya sangat andal dalam analisis konfirmasi yang memerlukan

ketelitian dan akuntabilitas hukum. Meskipun metode microdiffusion masih banyak digunakan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya, hasilnya harus divalidasi lebih lanjut dengan metode kuantitatif apabila diperlukan sebagai alat bukti di pengadilan.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan akurasi ilmiah dan integritas hukum dalam investigasi forensik, penting bagi laboratorium toksikologi untuk tidak hanya mempertimbangkan sensitivitas dan presisi, tetapi juga memastikan kesesuaian prosedur dengan standar internasional seperti ISO 17025. Inovasi dalam teknologi GC, termasuk otomasi, injeksi mikrovolum, dan pengembangan sistem portabel, membuka jalan bagi penerapan metode yang lebih efisien dan adaptif. Dengan demikian, uji alkohol dalam toksikologi forensik diharapkan semakin berkontributif terhadap proses keadilan yang berbasis bukti ilmiah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Dra. Suhartini, Apt., S.U. atas kontribusinya dalam analisis data, penelaahan kritis, serta masukan ilmiah yang berarti selama proses penyusunan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. P. J. Perry, S. Doroudgar, and P. V. Dyke, "Ethanol Forensic Toxicology".
2. L. Mubarakah and M. R. S. Efendi, "Qualitative and Quantitative Identification of Alcohol using the Conway Microdiffusion Method and Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC- FID) on Evidence at the East Java Regional Police (Polda) Forensic Laboratory," 2024.
3. E. Bernal, "Determination of Volatile Substances in Forensic Samples by Static Headspace Gas Chromatography," in *Gas Chromatography in Plant Science, Wine Technology, Toxicology and Some Specific Applications*, B. Salih, Ed., InTech, 2012. doi: 10.5772/31758.
4. R. A. Cox and J. A. Crifasi, "A Comparison of a Commercial Microdiffusion Method and Gas Chromatography for Ethanol Analysis," *Journal of Analytical Toxicology*, vol. 14, no. 4, pp. 211–212, Jul. 1990, doi: 10.1093/jat/14.4.211.
5. D. Dorubeț, C. Mircea, and E. Butnaru, "Validation of a GC/HS method for ethanol quantitative analysis using as internal standard tert-butanol," *Farmacia*, vol. 59, 2011.
6. E. Kostic, M. Vujovic, and B. Milosavljevic, "Validation of a method for ethanol analysis in biological and non-biological samples and its toxicological application," *Hem Ind*, vol. 75, no. 3, pp. 175–183, 2021, doi: 10.2298/HEMIND201201016K.
7. S. Sudhaker and R. Jain, "Effect of using Propanol as internal standard on quantitative determination of ethanol in different biological matrices by head space-Gas Chromatography-Flame Ionization Detector," *Madridge J Anal Sci Instrum*, vol. 1, no. 1, pp. 1–3, Jul. 2016, doi: 10.18689/mjai-1000101.
8. L. Taylor *et al.*, "Determination of ethanol in micro-volumes of blood by headspace gas chromatography: Statistical comparison between capillary and venous sampling sites," *Med Sci Law*, vol. 61, no. 2, pp. 86–96, Apr. 2021, doi: 10.1177/0025802420928632.
9. L. Taylor *et al.*, "Development of a Gas-Tight Syringe Headspace GC-FID Method for the Detection of Ethanol, and a Description of the Legal and Practical Framework for Its Analysis, in Samples of English and Welsh Motorists' Blood and

Urine,” *Molecules*, vol. 27, no. 15, p. 4771,
Jul. 2022, doi:
10.3390/molecules27154771.