

## **“Clean smoke”: solusi inovatif dan efektif untuk mengurangi emisi gas karbon dan partikulat berbahaya pada asap**

### ***“Clean smoke”: innovative and effective solutions to reduce carbon gas emissions and hazardous particulates in smoke***

Muhammad Khairul Mahmud<sup>1</sup>, Fadel Izza<sup>1</sup>, Nadya Fildzah Juniar<sup>1</sup>, Alqauliyah<sup>1</sup>, Alif Rahmawan Syam<sup>2</sup>, Rahmiah Sjafruddin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Kimia, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, Indonesia

<sup>2</sup> Departemen Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, Indonesia

#### **Abstrak.**

Polusi udara akibat pembakaran biomassa berskala kecil hingga besar menjadi salah satu masalah lingkungan utama yang dihadapi secara global. Kontributor utama partikulat (PM<sub>2.5</sub>) dan zat organik berbahaya seperti CO masing-masing dapat ditemukan di asap dari proses pembakaran yang berpotensi untuk menyebabkan berbagai dampak buruk pada kesehatan manusia. Oleh karena itu, Penelitian ini merancang alat *Clean Smoke* untuk menurunkan emisi berbahaya dari asap biomassa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu menurunkan zat berbahaya dengan efisiensi sebesar 78,65% dan terbukti menjepit senyawa organik dalam asap. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwasanya sisa cairan buangan atau asap cair yang dihasilkan alat ini menunjukkan perubahan yang signifikan dari angka kekeruhan sebesar 4,16 NTU menjadi 25,5 NTU dimana kenaikan angka ini mengindikasikan bahwasanya alat dan karbon aktif yang menjadi penyerap, mampu mengikat partikulat organik berbahaya dan melarutkannya pada air secara signifikan. Penggunaan *Clean Smoke* berpotensi besar dalam mengurangi paparan emisi beracun dari pembakaran di sektor industri kecil, menengah, hingga besar, serta mendukung pencapaian target *global zero-net emission* dan lingkungan yang lebih sehat.

Kata kunci: *Clean Smoke*, emisi, partikulat, karbon aktif, asap

#### **Abstract.**

Many environmental problems currently faced globally are related to air pollution, primarily originating from biomass combustion on both small or large scales. Major contributors to particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and harmful organic substances such as CO can be found in the smoke from the combustion process. These particulates and toxic substances have been known to have adverse effects on human health. This study presents the design and development of a device called *Clean Smoke*, which has an efficiency rate of 78.65% in reducing harmful substances in air emissions and effectively trapping organic compounds from biomass. In addition, the test results showed that the residual waste liquid or liquid smoke produced by this tool showed a significant turbidity increase from 4.16 NTU to 25.5 NTU, indicating the ability of the tool and activated carbon to bind hazardous particulates in water. With further development, *Clean Smoke* device could significantly reduce exposure to emissions and toxic substances from combustion processes in small to large-scale industries, thereby contributing to a healthier environment and supporting the global goal of achieving zero-net emissions.

Keywords: *Clean Smoke*, emission, particulate, activated carbon, smoke

## **1. PENDAHULUAN**

Saat ini, polusi udara sudah menjadi penyebab kematian terbesar di dunia jika dibandingkan dengan rokok tembakau, infeksi parasit, AIDS dan penyakit menular lainnya (Martins dan da Graça 2023). Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mengakui bahwa polusi udara merupakan ancaman yang paling signifikan bagi manusia (World Health Organization 2021). Sumber polusi yang signifikan di daerah pemukiman adalah pembakaran biomassa dari pembakaran kayu yang telah terbukti

---

\*Korespondensi Penulis  
Email : [rahmiah.sjafruddin@poliupg.ac.id](mailto:rahmiah.sjafruddin@poliupg.ac.id)

menghasilkan distribusi partikel dengan ukuran yang bervariasi tergantung dari fase pembakarannya (Harni *et al.* 2023).

Partikulat PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2,5</sub> telah menjadi perhatian regulasi kualitas udara di berbagai negara maju (Andrew Price-Allison *et al.* 2021). Hampir 50% populasi dunia telah terpapar polusi udara dari pembakaran bahan bakar padat seperti kayu untuk memasak, pemanasan dan kebutuhan energi (Pillarisetti *et al.* 2023). Kabut asap menyebabkan setidaknya 84,5% populasi menderita penyakit jantung, 76,8% iritasi mata, 44,8% iritasi hidung, 45,5% iritasi tenggorokan dan penderita batuk meningkat sebesar 41,6% (Chanana *et al.* 2023). Partikulat PM<sub>2,5</sub> berasal dari proses pembakaran yang berkontribusi terhadap 10,2 juta kematian dini setiap tahunnya (Flanagan *et al.* 2023).

Asap pembakaran juga mengeluarkan bahan kimia beracun seperti karbon monoksida (CO) yang menghambat respirasi seluler, formaldehida (HCHO) yang bersifat karsinogenik dan nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) yang memicu iritasi sistem pernapasan hingga asma (Kashtan *et al.* 2023). Selain itu, paparan partikulat PM<sub>2,5</sub> dalam waktu atau jangka pendek dan jangka panjang dari pembakaran kayu telah terbukti berdampak negatif pada proses metabolisme yang melibatkan stres oksidatif dan inflamasi (Nassan *et al.* 2021). Partikulat (PM) yang dilepaskan dari proses pembakaran biomassa juga mampu mempengaruhi kondisi atmosfer pada tingkat radiasinya melalui efek langsung, yakni menyerap dan menyebarkan radiasi matahari sehingga berujung pada perubahan iklim global dan tidak langsung, yakni peningkatan albedo awan melalui akumulasi inti kondensasi awan (Suriyawong *et al.* 2023).

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menurunkan dan mengurangi dampak asap terutama partikulat (PM) dan gas-gas berbahaya yang ditimbulkan dari proses pembakaran kayu ataupun biomassa adalah dengan terobosan proses pencucian asap melalui pembuatan alat yang diberi nama "Clean Smoke". Perancangan alat pencucian asap telah dirancang oleh Bianchini *et al.* (2018) dengan menggunakan tabung silinder isian pelat dengan sistem pencucian polutan dengan aliran yang berlawanan. Sama halnya dengan yang dilakukan oleh Sukmajaya *et al.* (2023) dengan merancang alat filter asap yang dilengkapi penyaring berbahan spons atau busa dan ruang pencuci asap dengan air. Hasil yang diperoleh adalah kandungan gas tak berwarna dan beracun serta berbau tidak enak (HCHO) sebesar 0,123, senyawa

organik volatil total (TVOC) sebesar 0,690 dan pH air sebesar 5,3 pada pembakaran sampah sebanyak 3,5 kg dengan lama waktu 4 jam.

Rancangan alat *Clean Smoke* merupakan inovasi alat pencucian asap yang dilengkapi dengan penyaring dan penjerap berupa karbon aktif untuk menurunkan atau menghilangkan kandungan polutan yang berbahaya pada asap. Kelebihan penggunaan karbon aktif sebagai penyaring dan penyerap karena memiliki luas pori yang besar sehingga efisiensi penjerapan bahan polutan dari asap lebih maksimal. Karbon aktif dipasang pada pelat dengan bentuk hexagonal dan menjadi bahan isian pada alat *Clean Smoke*. Karbon dibuat dari ampas tebu yang akan diaktivasi menggunakan larutan kalium hidroksida 5N (KOH). Menurut Sjafruddin et al. (2021) dengan menggunakan karbon aktif teraktivasi berbahan ampas tebu memiliki daya jerap terhadap zat organik (zat warna) dengan kisaran 169,91 - 198,22 mg adsorbat/g adsorben dan persen removal MB 96-99%. Kebaruan dari rancangan alat ini adalah adanya susunan pelat yang berisi karbon aktif pada menara *Clean Smoke*. Karbon yang digunakan sudah diaktivasi dengan tujuan agar proses penyaringan dan penyerapan polutan-polutan yang terkandung di dalam asap terjadi secara optimal sehingga asap betul-betul bersih dari kandungan polutan. tujuan penelitian ini dilakukan adalah untuk menentukan kemampuan alat *Clean Smoke* dalam menurunkan kandungan gas karbon monoksida (CO) yang tercuci dengan air dan menentukan pengaruh alat karbon aktif pada kolom atau menara *Clean Smoke* untuk menurunkan kandungan gas karbon monoksida (CO).

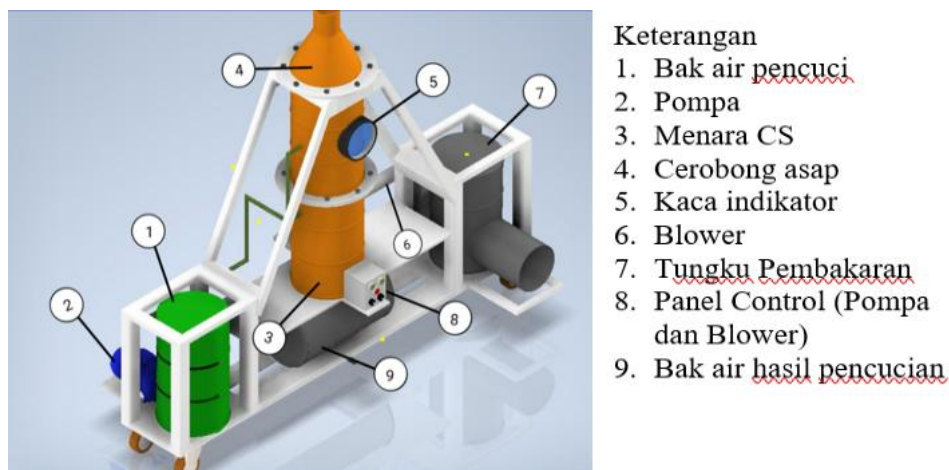
## 2. METODOLOGI

### 2.1. Waktu dan lokasi penelitian

Waktu pembuatan alat dimulai dari bulan Mei sampai dengan bulan Agustus tahun 2024. Tempat pelaksanaan terbagi menjadi dua, yakni pembuatan karbon aktif dan analisis air pencucian dari *Clean Smoke* dilakukan di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia, Kampus Politeknik Negeri Ujung Pandang dan pembuatan alat *Clean Smoke* dilakukan di Bengkel Las Karya Syam yang berada di Jalan Poros Mangga Tiga Blok H5/13, Makassar.

## 2.2. Pembuatan alat *Clean Smoke*

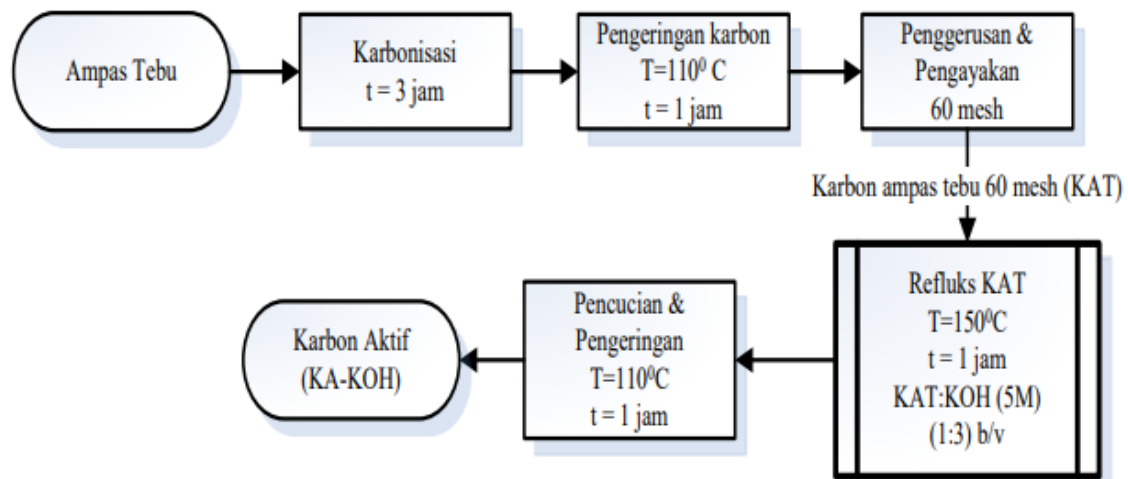
Menara *Clean Smoke* berbentuk silinder berbahan *stainless steel* yang dilapisi dengan *coating* anti karat. Tinggi menara *Clean Smoke* 1,18 meter dengan diameter 30 cm, volume menara *Clean Smoke* sebesar 0,083 m<sup>3</sup>. Bagian dalam menara *Clean Smoke* dilengkapi dengan dua buah pelat karbon aktif yang dipasang sebagai tempat kontak antara gas dan air. Gas masuk kolom *Clean Smoke* dari bagian bawah yang mengalir melewati pelat karbon aktif, sementara air disemprotkan melalui bagian atas kolom *Clean Smoke*. Kontak antara gas dan air terjadi dengan mekanisme lawan arah (*counter current*). Alat *Clean Smoke* dilengkapi dengan alat penunjang berupa alat kontrol, blower, bak air pencuci, pompa, pipa, valve, bak penampungan air hasil pencucian asap, tungku pembakaran dan cerobong gas. Adapun rancangan alat *Clean Smoke* seperti pada **Gambar 1**.



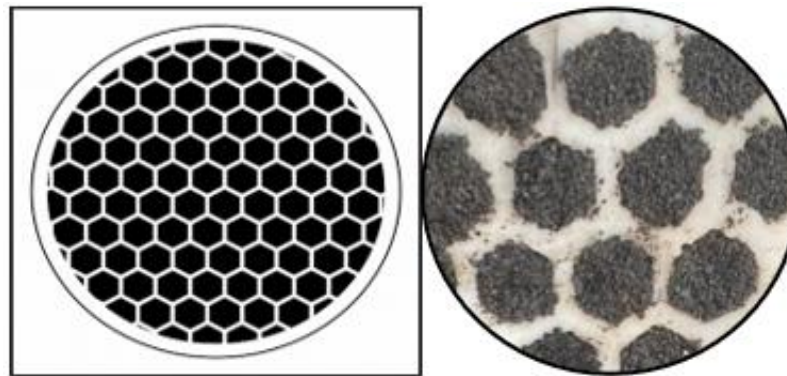
**Gambar 1.** Spesifikasi rancangan alat *Clean Smoke*.

## 2.3. Pembuatan karbon aktif

Arang aktif yang digunakan terbuat dari ampas tebu. Proses pembuatan arang aktif dapat dilihat pada **Gambar 2**. Karbon aktif yang dihasilkan dibentuk pada pelat (PE) tahan korosi yang pada permukaannya di bentuk lubang struktur hexagonal yang diisi dengan karbon aktif. Karbon aktif berukuran 60 mesh dicampur dengan bahan perekat (10%) yang kemudian dicetak pada pelat PE (**Gambar 3**). Pelat karbon aktif dipasang di dalam menara *Clean Smoke* secara bersusun yang berfungsi sebagai tempat kontak antara asap dan air, di samping itu karbon aktif juga sebagai adsorben yang dapat menyerap kandungan pada asap.



**Gambar 2.** Diagram alir proses pembuatan dan aktivasi arang aktif.



**Gambar 3.** Pelat bahan isian karbon aktif.

## 2.4. Pengujian kerja alat *Clean Smoke*

Pengujian alat *Clean Smoke* bertujuan untuk menguji kemampuan alat untuk mencuci dan memurnikan asap. Tahap pengujian alat *Clean Smoke* melalui dua uji coba yakni; 1) pengujian kandungan gas karbon monoksida (CO) pada asap yang dilewatkan pada menara *Clean Smoke* tanpa semburan air dan pelat isian karbon aktif (kandungan CO awal pada asap); dan 2) pengujian kandungan gas karbon monoksida (CO) pada asap yang dilewatkan pada menara *Clean Smoke* yang dikontakkan dengan semburan air melewati pelat karbon aktif (kandungan CO) yang dicuci dan dimurnikan dalam menara *Clean Smoke*. Alat pengujian gas CO menggunakan alat *smart sensor* ST8900. Sementara material partikulat dipantau dengan mengukur parameter kekeruhan (*turbidity*) air pencuci asap yang keluar pada bagian bawah menara *Clean Smoke* dengan alat Turbidimeter dan komponen pada air pencuci asap dianalisis dengan Gas Kromatografi MS (GC MS).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Prinsip kerja alat *Clean Smoke*

Alat *Clean Smoke* merupakan sebuah prototipe yang bertujuan untuk mereduksi jumlah karbon monoksida (CO) dan partikulat berbahaya di asap pembakaran kayu. Alat ini dibuat dengan memakai alat-alat yang mudah dijangkau dan didapatkan di sekitar kita. Alat *Clean Smoke* dilengkapi dengan alat kontrol yang terdiri atas dua tombol. Tombol sebelah kiri untuk menghidupkan pompa air dan tombol sebelah kanan untuk menghidupkan blower. Blower berfungsi untuk menghisap asap masuk ke dalam menara *Clean Smoke* dengan pengaturan laju alir asap melalui bukaan katup inlet pada blower (1/2) setara dengan laju 0,00838 L/s. Sementara pompa dijalankan melalui panel kontrol sebelah kiri yang mengalirkan air dari bak penampung menuju menara *Clean Smoke*. Laju alir air pencuci asap diatur melalui bukaan valve (1/2) dengan laju alir air berkisar 0,264 L/s.

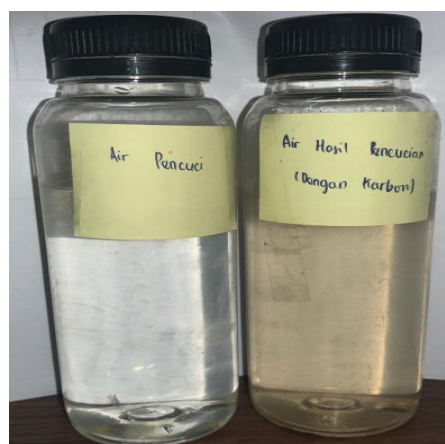
Asap mengalir dari bagian bawah menara *Clean Smoke* melewati pelat karbon aktif dan air disemburkan dari bagian atas menara *Clean Smoke*. Mekanisme kontak antara asap dan air terjadi secara lawan arah (*counter current*) dengan tujuan waktu kontak terjadi lebih lama, sehingga kandungan asap berupa gas CO dan partikulat akan terlucuti. Pelat karbon aktif yang dipasang di dalam Menara *Clean Smoke* berfungsi sebagai tempat kontak antara asap dan air sekaligus sebagai adsorben bahan penjerap kandungan asap. Hasil uji coba alat *Clean Smoke* dengan dua tahapan pengujian yakni penentuan kandungan asap yang dilewatkan pada menara *Clean Smoke* tanpa bahan isian karbon dan tanpa air pencucian. Pada uji coba tahap pertama diperoleh hasil kandungan gas CO pada asap sekitar 520 ppm (CO awal). Kemudian tahapan pengujian kedua dengan melewatkan asap pada menara *Clean Smoke* yang dilengkapi dengan pelat karbon aktif dan pencucian asap dengan air diperoleh hasil gas CO sebesar 111 ppm (CO akhir). Kemampuan alat *Clean Smoke* dalam menurunkan kandungan gas CO dapat ditentukan dengan **Persamaan 1**.

$$\begin{aligned}
 \text{Penurunan gas CO pada asap} &= \frac{\text{gas CO awal} - \text{gas CO akhir}}{\text{gas CO awal}} \times 100\% \dots \dots \dots (1) \\
 &= \frac{(520 - 111) \text{ ppm}}{520 \text{ ppm}} \times 100 \\
 &= 78,6\%
 \end{aligned}$$

Kemampuan alat *Clean Smoke* dalam mencuci dan memurnikan asap diperoleh hasil sebesar 78,6%. Artinya, alat *Clean Smoke* dapat beroperasi dengan baik, namun belum mampu menurunkan kadar gas CO pada asap secara maksimal. Kandungan CO pada asap yang dicuci dan dimurnikan pada alat *Clean Smoke* masih relatif tinggi yakni sebesar 111 ppm jika dibandingkan dengan standar Keputusan Menteri Kesehatan Nomor 261/MENKES/SK/II/1998 tentang Nilai Ambang Batas Karbon Monoksida di tempat kerja sebesar 25 ppm.

### 3.2. Pengujian kekeruhan asap cair

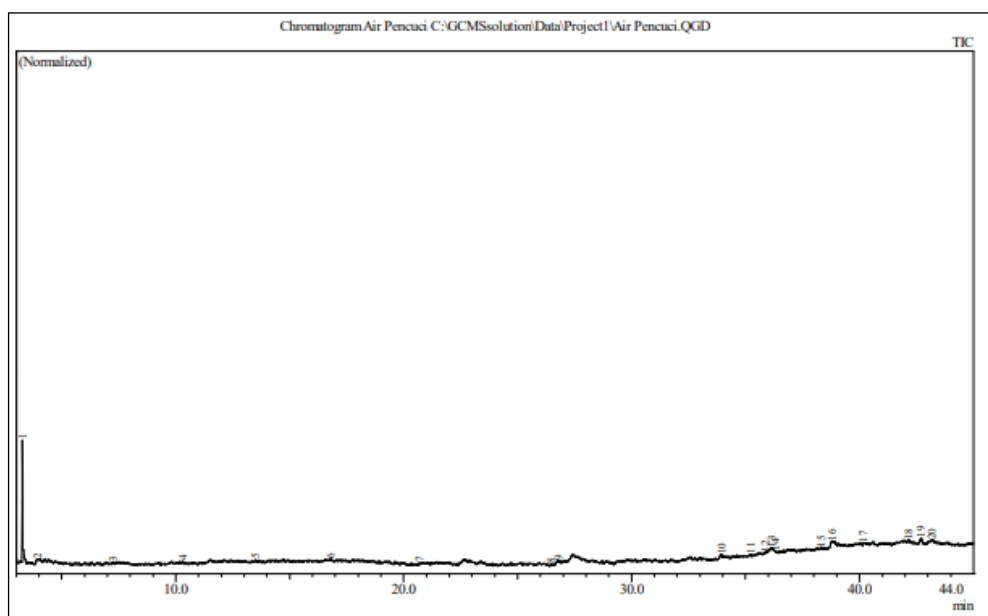
Kemampuan alat *Clean Smoke* untuk menurunkan partikulat asap diuji dengan melihat hasil air pencuci asap. Air pencuci asap diperoleh di bawah menara pada bak penampungan. Adapun air hasil pencuci asap secara visual dapat dilihat pada **Gambar 4**. Secara visual dapat terlihat bahwa air pencuci awal (air di sebelah kiri) mengalami perubahan warna dan turbidity setelah terjadi kontak antara air dan asap (air di sebelah kanan). Perubahan warna terjadi karena kandungan partikulat pada asap tercuci dengan air. Kandungan partikulat diukur dengan parameter kekeruhan (turbidity). Pengujian parameter turbidity air pencuci asap sebesar 4,16 NTU. Sementara turbidity air pencuci (air pencuci awal) diperoleh kadar sebesar 25,5 NTU, artinya ada peningkatan kandungan partikulat sebesar 83,7%. Menurut Handriyani *et al.* (2020), kekeruhan merupakan parameter menggambarkan sifat optik air berdasarkan banyaknya cahaya yang diserap oleh partikulat-partikulat yang terkandung pada air yang dianalisis. Biasanya, padatan tersuspensi (baik itu zat organik maupun anorganik seperti logam) yang menyebabkan kekeruhan dalam air.



**Gambar 4.** Air hasil pencucian asap.

### 3.3. Pengujian kandungan air buangan dengan GC-MS

Metode pengukuran GC-MS merupakan metode identifikasi komponen dalam suatu campuran sampel yang biasanya tergolong sebagai senyawa yang mudah menguap. Alat GC-MS memiliki dua bagian penting, yakni kromatografi gas dan spektrometri massa yang berfungsi sebagai pendeteksi atau detektor. Tujuan dilakukannya pengujian ini agar sampel yang dianalisis dengan berkas elektron dapat dicatat hasilnya secara kuantitatif oleh spektrometri massa yang menghasilkan suatu spektrum fragmen ion positif yang nantinya menampilkan berat molekul dari senyawa yang terkandung dalam sampel (Margareta dan Wonorahardjo 2023). Air hasil pencucian asap selanjutnya diuji dengan instrumen GC-MS untuk mendeteksi komponen yang terkandung dalam air hasil pencucian. Melalui pembacaan kromatogram air pencuci (**Gambar 5**), ditemukan setidaknya berbagai variasi senyawa organik yang terkandung dalam air pencuci.



**Gambar 5.** Kromatogram air pencuci.

Puncak-puncak yang terlihat pada kromatogram menunjukkan bahwa air hasil pencucian asap mengandung 20 jenis senyawa organik yang merupakan asam lemak atau turunannya. Dari 20 senyawa tersebut, terdapat 4 senyawa dominan yang direpresentasikan oleh puncak 1, 2, 13 dan 16. Keempat senyawa dominan tersebut secara berurutan dengan kelimpahan relatif dan waktu retensi (menit) secara berurutan adalah 1 1-Aminoisopropane-1-Carboxylic Acid-D3(30,71%/3,276), 2



Acetic Acid (8,50%/3,94), 13 Lupeol (10,44%/36,16) dan 16 .gamma.-Sitostenone (11,20%/38,79).

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pengujian alat menunjukkan kemampuan alat *Clean Smoke* untuk menurunkan gas karbon monoksida (CO) sebesar 78,65%. Kandungan pada air pencuci asap memiliki kekeruhan sebesar 25,5 NTU yang menunjukkan ada peningkatan kekeruhan sebesar 83,7% yang disinyalir merupakan kandungan partikulat pada asap yang terikut dengan air pencuci. Kandungan pada air pencuci asap memiliki kandungan senyawa volatil yang terdiri atas 20 puncak dengan komponen dominan adalah 1 1-Aminoisopropane-1-Carboxylic Acid-D3(30,71%/3,276), 2 Acetic Acid (8,50%/3,94), 13 Lupeol(10,44%/36,16) dan 16 .gamma.-Sitostenone (11,20%/38,79).

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Andrew P A, Mason PE, Jones JM, Barimah EK, Jose G, Brown AE, Ross AB and Williams A. 2021. The impact of fuelwood moisture content on the emission of gaseous and particulate pollutants from a wood stove. *Combustion Science and Technology* 195(1):133-152.
- Bianchini A, Pellegrini M, Rossi J and Saccani C. 2018. Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers. *Biomass and Bioenergy* 116.
- Chanana I, Sharma A, Kumar P, Kumar L, Kulshreshtha S, Kumar S and Patel S. 2023. Combustion and stubble burning: a major concern for the environment and human health. *Fire* 79(6).
- Flanagan E, Malmqvist E, Rittner R, Gustafsson P, Källén K and Oudin A. 2023. Exposure to local, source-specific ambient air pollution during pregnancy and autism in children: a cohort study from Southern Sweden. *Scientific Reports* 13.
- Handriyani KATS, Habibah N and Dhyanaputri IGAS. 2020. Analisis kadar timbal (Pb) pada air sumur gali di kawasan tempat pembuangan akhir sampah Banjar Suwung Batan Kendal Denpasar Selatan. *Jurnal Sains dan Teknologi* 9(1):68-75.

- Harni SD, Saarikoski S, Kuula J, Helin A, Aurela M, Niemi JV, Kousa A, Ronkko T and Timonen H. 2023. Effects of emission sources on the particle number size distribution of ambient air in the residential area. *Atmospheric Environment* 293:2.
- Kashtan YS, Nicholson M, Finnegan C, Ouyang Z, Lebel ED, Michanowicz DR, Shonkoff SBC and Jackson RB. 2023. Gas and propane combustion from stoves emits benzene and increases indoor air pollution. *Environmental Science and Technology* 57:9653.
- Margareta MAH dan Wonorahardjo S. 2023. Optimasi metode penetapan senyawa eugenol dalam minyak cengkeh menggunakan gas chromatography-mass spectrum dengan variasi suhu injeksi. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains* 6(2):95-103.
- Martins NR and da Graça GC. 2023. Health effects of PM<sub>2.5</sub> emissions from woodstoves and fireplaces in living spaces. *Journal of Building Engineering* 79:2.
- Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 416 Tahun 1990 tentang syarat-syarat dan pengawasan kualitas air.
- Nassan FL, Wang C, Kelly RS, Lasky-Su JA, Vokonas PS, Koutrakis P and Schwartz JD. 2021. Ambient PM<sub>2.5</sub> species and ultrafine particle exposure and their differential metabolomic signatures. *Environment International* 151.
- Pillarisetti A, Alnes LWH, Ye W, McCracken JP, Canuz E and Smith KR. 2023. Repeated assessment of PM<sub>2.5</sub> in Guatemalan kitchens cooking with wood: implications for measurement strategies. *Atmospheric Environment* 295.
- Sjafruddin R, Fajar, Lasire, Rosalin, Fitri Z dan Aisyah N. 2021. Adsorpsi metilen biru dengan karbon tanpa aktivasi dan teraktivasi larutan KOH. *SNP2M* 6.
- Sukmajaya I, Arifin J dan Mujibburahman. 2023. Rancang bangun filter tungku pembakaran sampah minim asap untuk mengurangi pencemaran udara.
- Suriyawong P, Chuetor S, Samae H, Piriyakarnsakul S, Amin M, Furuuchi M, Hata M, Inerb M and Phairuang W. 2023. Airborne particulate matter from biomass burning in Thailand: recent issues, challenges, and options. *Heliyon* 9.
- World Health Organization. 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.